

Furação robotizada para criação de peças de design singulares

João Miguel Martins Braga

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Paulo Abreu

Coorientador: Prof. Manuel Barbosa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2019

*“People are not remembered by how few times they fail,
but by how hoften they succed.”*

Resumo

Atualmente, o setor industrial procura soluções cada vez mais flexíveis para a realização dos seus processos produtivos. Esta procura demonstra-se pela utilização, cada vez maior, de células robóticas. Contudo, na área da maquinagem, o seu uso ainda é limitado, sendo a maioria das operações realizadas por máquinas CNC. Isto deve-se à baixa rigidez e à baixa exatidão dos sistemas robóticos, comparativamente às máquinas CNC. Porém, a utilização de robôs na realização de operações de maquinagem em casos particulares de peças de grandes dimensões ou com formas complexas e com requisitos de precisão dimensional mais exigentes é já comum.

Nesta dissertação são analisadas as possibilidades da utilização de uma célula robótica para a obtenção de peças de design singulares através de operações de furação. Para tal, são analisados softwares CAD (SolidWorks e Rhinoceros) para a obtenção do modelo de peças singulares caracterizadas pela incorporação de padrões de furos, parametrizáveis. Verificou-se que a utilização do Rhinoceros com o seu *plug-in* Grasshopper são uma solução poderosa para este efeito. Após a obtenção do modelo da peça, foi analisada a utilização de um software CAD/CAM, Mastercam, para a definição dos percursos de maquinagem. A utilização do Mastercam, apesar do seu vasto leque de operações, apresentou algumas limitações na obtenção expedita dos percursos de furação. Foi possível ultrapassar essas limitações na definição dos percursos, nomeadamente através da análise de formatos de importação/exportação entre o software Rhinoceros e Mastercam e da sua configuração mais adequada. Determinado o formato mais indicado, foram obtidos os percursos de maquinagem por um método expedito. Para a geração dos programas em linguagem de programação de robôs foi utilizado um *add-on* do Mastercam, Robotmaster. Este permite uma fácil configuração do robô e ferramenta a utilizar, para além de permitir a validação e simulação dos percursos gerados. Após a geração do programa na linguagem do robô, a sua implementação no software de programação e simulação de robô é imediata, sem ser necessário a edição do programa. O robô utilizado neste trabalho foi um robô da ABB (IRB 2400/16), pelo que os programas foram gerados em linguagem Rapid e o software de programação e simulação do robô utilizado foi o RobotStudio. Este software demonstrou ser uma ferramenta poderosa na validação dos percursos de maquinagem. O RobotStudio possui uma cópia do controlador real do robô o que permite uma simulação, o mais próximo da realidade possível, das operações de maquinagem. Numa fase final, foi implementado um programa na célula robótica disponível para a realização de operações de furação numa peça. Para esta implementação, para além da validação offline do programa, foi necessária a calibração da ferramenta e da localização da peça na célula robótica. Foram executadas operações de furação numa peça. A partir das análises realizadas neste trabalho foi possível concluir que a utilização do Rhinoceros mais Grasshopper oferece uma enorme flexibilidade para a obtenção de peças singulares. O RobotStudio, apesar de oferecer bastantes ferramentas para a definição de percursos, não é expedito na obtenção de percursos de maquinagem, pelo que a utilização de um software CAM é essencial para a fácil obtenção dos mesmos.

Robotic drilling for the creation of unique design object

Abstract

Currently, the industrial sector is looking for increasingly flexible solutions to the realization of its productive processes. This demand is demonstrated by the increasing use of robotic cells. However, in the machining area, its use is still limited, with most operations being carried out by CNC machines. This is due to the low rigidity and low accuracy of robotic systems compared to CNC machines. However, the use of robots to perform machining operations in particular cases of large or complex parts and with more stringent dimensional accuracy requirements is already common.

This dissertation analyzes the possibilities of using a robotic cell to obtain unique design objects through drilling operations. To this end, CAD software (SolidWorks and Rhinoceros) is analyzed for obtaining a singular object model. The acquisition of unique objects is characterized by the incorporation of parameterized hole patterns. Using Rhinoceros with its Grasshopper plug-in has been found to be a powerful solution for this purpose. After obtaining the object model, the use of the CAD/CAM software, Mastercam, was analyzed for the definition of the machining paths. The use of Mastercam, despite its wide range of operations, demonstrated some limitations for the expeditious obtaining of the drilling paths. It was possible to overcome these limitations in the definition of the paths, namely through the analysis of import/export formats between the software Rhinoceros and Mastercam and its most appropriate configuration. In the most suitable format, the machining paths were obtained by a very efficient method. For the generation of programs in robot programming language an add-on of Mastercam, Robotmaster, was used. This allows an easy configuration of the robot and tool to be used, besides allowing the validation and simulation of the generated paths. After the generation of the program in the language of the robot, its implementation in the robot programming and simulation software is immediate, without being necessary the edition of the program. The robot used in this work was an ABB robot (IRB 2400/16), so the programs were generated in Rapid language and the robot programming and simulation software used was RobotStudio. This software has proven to be a powerful tool in the validation of machining paths. RobotStudio has a copy of the actual controller of the robot which allows a simulation, as close to the reality as possible, of the machining operations. In a final phase, a program was implemented in the robotic cell available for performing drilling operations. For this implementation, besides the offline validation of the program, it was necessary to calibrate the tool and the location of the object in the robotic cell. Drilling operations were performed on a object. From the analysis carried out in this work it was possible to conclude that the use of Rhinoceros plus Grasshopper offers an enormous flexibility to obtain unique objects. Although RobotStudio offers a number of tools for path definition, it is not expedient to obtain machining paths, so the use of CAM software is essential for easy paths acquisition.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Paulo Abreu e Professor Manuel Romano Barbosa, por todo o apoio e tempo disponibilizados ao longo da realização desta dissertação, das críticas construtivas e conhecimento que me transmitiram, sem os quais não teria sido possível concretizar este trabalho.

Ao Sr. Joaquim por disponibilizar todas as condições no Laboratório de Robótica.

À minha família, por toda a ajuda e apoio que me deram durante o meu percurso académico. Sem dúvida, não teria sido possível sem ela.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo destes anos. Por todo o apoio que disponibilizaram, e pelas longas noites de estudo.

Índice de Conteúdos

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos do projeto	8
1.2 Estrutura da dissertação.....	9
2 Incorporação de padrões de furação em peças	11
2.1 Criação de padrões.....	11
2.2 Softwares CAD	13
2.3 Metodologia de implementação	19
3 Programação de operações de furação com robô industrial.....	25
3.1 Estratégias de programação.....	25
3.2 Programação com Mastercam	28
3.3 Validação no RobotStudio	35
3.4 Conclusões.....	37
4 Casos de estudo	39
4.1 Introdução	39
4.2 Caso 1.....	40
4.3 Caso 2.....	50
4.4 Caso 3.....	59
4.5 Conclusões.....	63
5 Implementação da célula robótica	65
5.1 Introdução	65
5.2 Procedimentos para a realização das operações de furação	66
5.3 Execução do programa	69
6 Conclusões	71
Referências.....	73

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Tipos de Automação Industrial [1].....	2
Figura 1.2 - Fornecimento anual de robôs industriais por área de aplicação [2].....	3
Figura 1.3 - Relação entre custo unitário e volume de produção para distintas tecnologias de produção [4].....	4
Figura 1.4 - Flexibilidade necessária na maquinagem de peças com mudanças no seu design [6].....	4
Figura 1.5 - Utilização de uma célula robótica para furação de componentes aeronáuticos [8].	5
Figura 1.6 - Robô a realizar operações de furação numa aeronave [14].....	7
Figura 1.7 - Death Star 2018 (peça obtida através de furação robotizada) [16].....	8
Figura 2.1 - a) Padrão natural [17]; b) Padrão criado pelo homem [18].....	12
Figura 2.2 - Obtenção de peças singulares pela incorporação de padrões parametrizáveis.....	12
Figura 2.3 - Exemplo de uma macro para a criação de círculos segundo uma linha.....	14
Figura 2.4 - Criação de um círculo utilizando a programação do Grasshopper.	15
Figura 2.5 - Bloco “Deconstruct Brep” com as saídas de superfícies, linhas e pontos.	16
Figura 2.6 - Implementação de um padrão de pontos em forma de grelha (<i>Divide Surface</i>) numa subsuperfície criada através do bloco <i>IsoTrim</i>	17
Figura 2.7 - Esquema do programa criado no Grasshopper.	18
Figura 2.8 – Subsuperfície criada através do Grasshopper no ambiente do Rhinoceros.	18
Figura 2.9 - Cilindros criados na subsuperfície da peça para conceção dos furos no ambiente do Rhinoceros.	19
Figura 2.10 - Seleção da superfície lateral de um cone importado do SolidWorks, no ambiente do Rhinoceros.	20
Figura 2.11 - Esquema da transferência do modelo digital entre softwares.	23
Figura 3.1 - Modelo digital da célula robótica do Laboratório de Robótica do DEMec.	27
Figura 3.2 - Exemplo de uma peça 3D obtida no Mastercam [19].....	29
Figura 3.3 - Simulação de uma operação de furação no Mastercam.	29
Figura 3.4 - Validação de um percurso de maquinagem através da opção <i>Optimization</i> no Robotmaster.....	30
Figura 3.5 - Simulação de percursos de maquinagem efetuados por um robô no Robotmaster.	31
Figura 3.6 - Código, em linguagem Rapid, gerado pelo pós-processamento do programa de comando numérico.....	31
Figura 3.7 - Janela de seleção de operação e definição dos parâmetros de maquinagem.....	32
Figura 3.8 - Dimensões geométricas da ferramenta e parâmetros de maquinagem.	33
Figura 3.9 - Seleção dos centros dos furos através da opção <i>Window Points</i>	34
Figura 3.10 - Seleção da superfície no Mastercam para definição da orientação da ferramenta.	35

Figura 3.11 - Programa Rapid, obtido através do Robotmaster, no ambiente de programação do RobotStudio.	36
Figura 3.12 - Simulação dos percursos de maquinagem no RobotStudio.....	36
Figura 3.13 - Procedimento para a obtenção de peças singulares através de furação robotizada.	37
Figura 4.1 – Modelo da peça do Caso 1 obtido no Rhinoceros.....	40
Figura 4.2 - Modelo da peça do Caso 1 obtido no SolidWorks.....	41
Figura 4.3 – Bloco <i>Divide Surface</i> utilizado para a geração do padrão linear.	42
Figura 4.4 – Esquema da incorporação do padrão linear de furos.....	42
Figura 4.5 – Bloco <i>Populate Geometry</i> utilizado para a geração do padrão aleatório.	42
Figura 4.6 - Esquema da incorporação do padrão aleatório de furos.....	43
Figura 4.7 - Modelo do Caso 1 (obtido no Rhinoceros) após a incorporação dos padrão linear de furos.....	43
Figura 4.8 - Modelo do Caso 1 (obtido no Rhinoceros) após a incorporação dos padrão aleatório de furos.....	43
Figura 4.9 - Superfície cônica do modelo do Caso 1, gerado com SolidWorks e processada em Rhinoceros/Grasshopper, dividida durante o processo de incorporação dos padrões.	44
Figura 4.10 - Percursos de maquinagem obtidos no modelo Rhinoceros.	45
Figura 4.11 - Gráficos <i>Optimization</i> dos percursos obtidos para o modelo do Rhinoceros.....	46
Figura 4.12 – Percursos gerados para o Caso 1 após a definição manual da sequência de operações.	47
Figura 4.13 - Gráficos <i>Optimization</i> dos percursos obtidos para o modelo do Caso 1 com o padrão aleatório de furos.	47
Figura 4.14 – Padrão linear incorporado no modelo do Caso 1 com 6 furos (esquerda) e 60 furos (direita).	48
Figura 4.15 – Padrão aleatório incorporado no modelo do Caso 1 com 6 furos (esquerda) e 60 furos (direita).	48
Figura 4.16 – Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 1 com o padrão linear.	49
Figura 4.17 - Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 1 com o padrão aleatório.....	50
Figura 4.18 – Modelo da peça do Caso 2 obtido no Rhinoceros.....	50
Figura 4.19 - Modelo da peça do Caso 2 obtido no SolidWorks.....	51
Figura 4.20 - Superfície lateral do modelo do Caso 2, obtido pelo SolidWorks, dividida durante o processo de incorporação dos padrões de furos.	52
Figura 4.21 - Percurso de maquinagem tangente à superfície da peça.	52
Figura 4.22 – Linhas, perpendiculares à superfície nos centros dos furos, criadas no modelo do caso 2.....	53
Figura 4.23 - Percurso gerado pela definição da orientação do eixo da ferramenta como paralelo ao eixo do furo.....	54
Figura 4.24 – Padrão linear de pontos incorporado no modelo do Caso 2.	55

Figura 4.25 – Definição manual da profundidade dos furos no Mastercam.	55
Figura 4.26 – Percursos de maquinagem gerados para o modelo do Caso 2 com o padrão linear de pontos.....	56
Figura 4.27 – Janela <i>Optimization</i> obtida para o modelo do Caso 2 com o padrão linear de pontos.	56
Figura 4.28 – Percursos de furação gerados para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de furos.....	57
Figura 4.29 - Janela <i>Optimization</i> obtida para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de pontos.	57
Figura 4.30 - Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 2 com o padrão linear.	58
Figura 4.31 - Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 2 com o padrão aleatório.	59
Figura 4.32 – Modelo do Caso 3, obtido no Rhinoceros.	60
Figura 4.33 – Modelo do Caso 3 com o padrão linear de furos.	60
Figura 4.34 – Percursos obtidos para o modelo do Caso 3 com o padrão linear de furos.	61
Figura 4.35 – Modelo do Caso 3 com o padrão aleatório de furos.....	61
Figura 4.36 - Percursos obtidos para o modelo do Caso 3 com o padrão aleatório de furos. ...	62
Figura 4.37 – Simulação do percurso no RobotStudio para o Caso 3 com o padrão linear.....	62
Figura 4.38 – Simulação do percurso no RobotStudio para o Caso 3 com o padrão aleatório.	63
Figura 5.1 – Esquema da incorporação do padrão de furos.	65
Figura 5.2 - Modelo da peça durante a incorporação do padrão de furos.....	66
Figura 5.3 - Calibração do TCP.....	67
Figura 5.4 - Referencial da peça (peça em vista <i>WireFrame</i>).	67
Figura 5.5 - Pontos a determinar pelo robô.	68
Figura 5.6 – Método para a determinação do referencial da peça.	68
Figura 5.7 - Robô a determinar a localização de um dos pontos.....	68

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Produtos e processos de maquinagem em diferentes áreas utilizando robôs [9].	6
Tabela 2 - Análise de modelos exportados do SolidWorks para o Rhinoceros.....	20
Tabela 3 - Análise dos formatos de exportação do Rhinoceros para o Mastercam.....	21
Tabela 4 - Fornecedores de robôs e respetivos softwares de simulação.	26
Tabela 5 – Modelos gerados para cada caso de estudo.....	39
Tabela 6 – Número de modelos analisados no Mastercam e no RobotStudio.	40
Tabela 7 – Modelos do Caso 1: nº de superfícies observadas no Rhinoceros.....	41
Tabela 8 – Modelos do Caso 2: nº de superfícies observadas no Rhinoceros.....	51

1 Introdução

Atualmente com o aumento da competitividade entre empresas, em particular, empresas associadas à indústria, assiste-se a uma procura de métodos e processos mais eficientes com o objetivo de reduzir o tempo e custo de produção, mantendo ou até melhorando a qualidade do produto. Por outro lado, as empresas têm-se afastado do modelo de “produção em massa”, onde se produz uma grande quantidade do mesmo produto, para adotarem um modelo de “customização em massa”, onde são capazes de produzir uma maior variedade de produtos, mantendo os custos baixos. Isto leva a uma necessidade de linhas de produção que permitam uma maior flexibilidade na variedade de produtos a serem produzidos. Como resultado, a indústria tem apostado na automação dos seus processos.

A automação faz uso de sistemas mecânicos, elétricos, eletrónicos e de computação para efetuar o controlo de processos produtivos. Podem-se distinguir três tipos de automação industrial [1]:

- Automação fixa: produção de um único produto, ou produtos com pequenas variações entre eles, em volumes de produção elevados; utilização de máquinas projetadas para o produto a ser produzido;
- Automação programável: obtenção de volumes de produção baixos, mas com grande variedade de produtos; utilização de máquinas adaptáveis por meio de programação;
- Automação flexível: obtenção de volumes de produção médios, mas em que a máquina pode ser programada para produzir outro produto, ainda que semelhante; a máquina utilizada deve ser adaptável a um número grande de produtos similares, normalmente através de sistemas complementares com reduzidos tempos de preparação (*setup*) para produtos diferentes; esta automação partilha características da automação fixa e programável;

Na Figura 1.1, é ilustrada a relação entre volume de produção e diversidade de produtos para os processos de automação descritos.

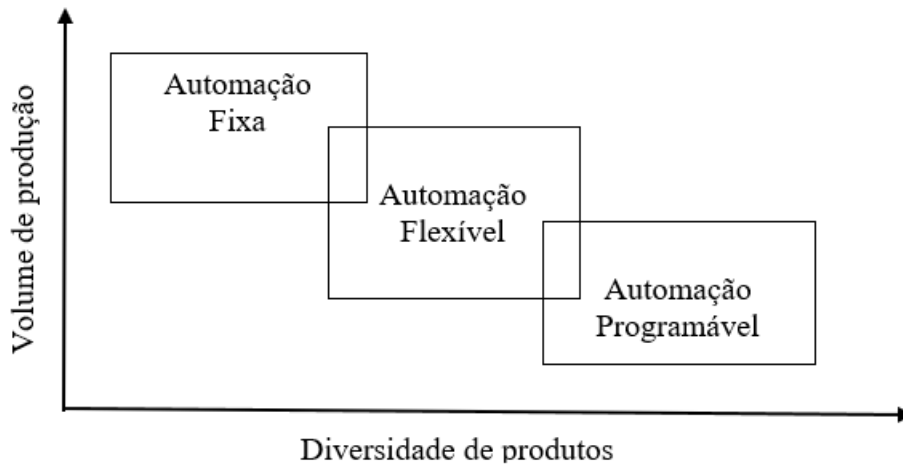


Figura 1.1 – Tipos de Automação Industrial [1].

A utilização de robôs na indústria tem tido um papel fundamental na automatização de processos, podendo-se observar a utilização destes para as mais variadas funções. A aplicação de células robóticas enquadra-se na automação flexível e programável, pois trata-se de máquinas capazes de realizar os mais diversos movimentos programados, podendo-se adaptar às necessidades operacionais de determinadas tarefas e utilizar uma vasta gama de ferramentas. A maioria das atividades de robôs industriais nos processos de produção envolvem operações de transporte/manipulação de materiais, processos ou inspeção e teste:

- Manipulação de materiais/produtos:
 - Transferência de matérias/produtos entre localizações fixas;
 - Alimentação de máquinas;
- Processos:
 - Soldadura por pontos ou contínua por arco elétrico;
 - Pintura e envernizamento de superfícies;
 - Corte através de processos de plasma, laser, oxi-corte ou jato de água;
 - Aplicação de colas e vedantes;
 - Maquinagem leve;
- Inspeção e teste:
 - Inspeção com sistemas de visão;
 - Manuseamento de equipamentos de medição.

Na Figura 1.2, está apresentado o fornecimento anual de robôs industriais por área de aplicação entre 2015 e 2017. Desde 2010, a indústria automóvel, a maior utilizadora de robôs industriais, tem aumentado o investimento em aplicações robóticas, tendo atingido um crescimento de 22% no ano 2017. A venda total de robôs para as indústrias, exceto a indústria automóvel e eletrónica, teve um crescimento de 32% no ano 2017 [2].

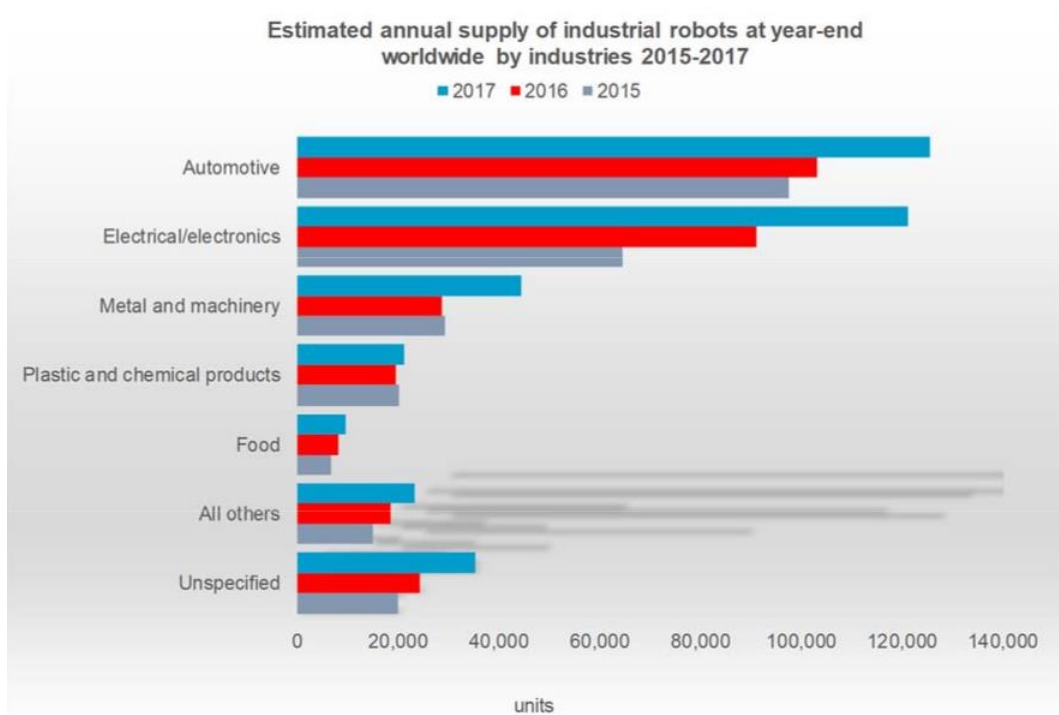


Figura 1.2 - Fornecimento anual de robôs industriais por área de aplicação [2].

A forte aposta nos sistemas robóticos deve-se a várias vantagens que estes oferecem nos processos produtivos [3], tais como:

- *Redução de custos dos produtos fabricados*, através da diminuição do número de pessoas envolvidas na produção, aumento da quantidade de produtos em um dado período (produtividade), melhor utilização de matéria-prima (redução de perdas, otimização do aproveitamento), economia de energia;
- *Melhoria das condições de trabalho* do ser humano, por meio da eliminação de atividades perigosas ou insalubres de contato direto;
- *Melhoria da qualidade* do produto através de melhor controle dos parâmetros de produção.

Para além destas vantagens, os robôs industriais são, de todas as máquinas usadas na automação industrial, os equipamentos que oferecem o melhor índice de custo de produção por unidade de produto, em função do volume de produção, para pequenos/médios volumes de produção [4]. Na Figura 1.3, é ilustrada a relação entre custo unitário e volume de produção para robôs, máquinas dedicadas e trabalho manual.

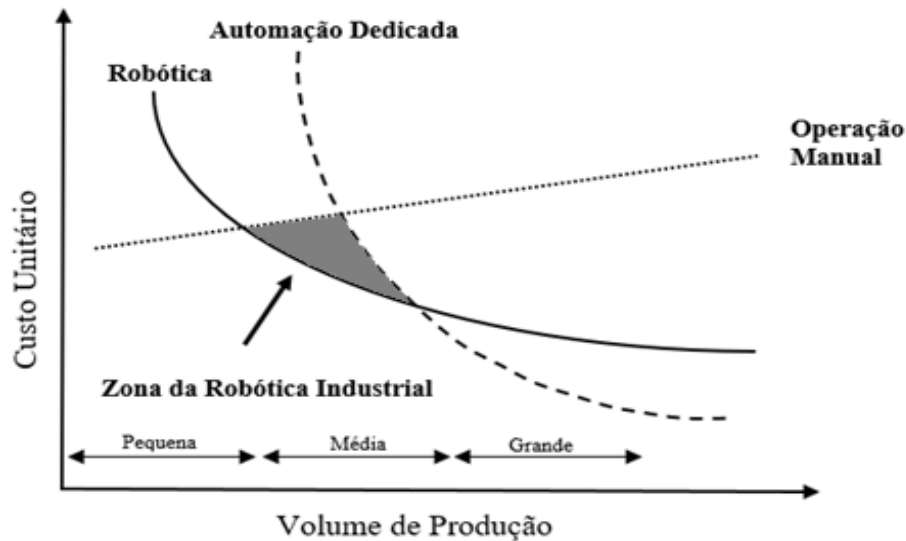


Figura 1.3 - Relação entre custo unitário e volume de produção para distintas tecnologias de produção [4].

Esta é talvez a razão fundamental para a crescente utilização de robôs em ambiente industrial, pois dadas as características do mercado (elevada concorrência, influência do consumidor nos produtos, produtos com tempo de vida curtos, exigência de melhor qualidade a mais baixo preço), as empresas tendem a produzir essencialmente por encomenda sem criação de grandes stocks, pelo que as produções tendem a ser de baixo/médio volume de produção.

Uma área que tem recentemente apostado na implementação de células robóticas para a realização de operações é a área da maquinagem de peças [5]. A maquinagem, dominada pelo uso de máquinas-ferramentas, tem sentido a pressão do mercado para a adaptação a volumes de produção baixos/médios com elevada variedade, o que requer soluções de produção mais flexíveis. A utilização de máquinas ferramenta, CNC, apesar de serem capazes de enfrentar quase qualquer desafio de maquinagem e apresentarem várias vantagens, como a sua elevada exatidão e rigidez, características fundamentais para uma maquinagem precisa, não possuem o nível de flexibilidade dos sistemas robóticos [6]. Na Figura 1.4, é ilustrada a relação entre a flexibilidade necessária e a variação do design de uma peça.

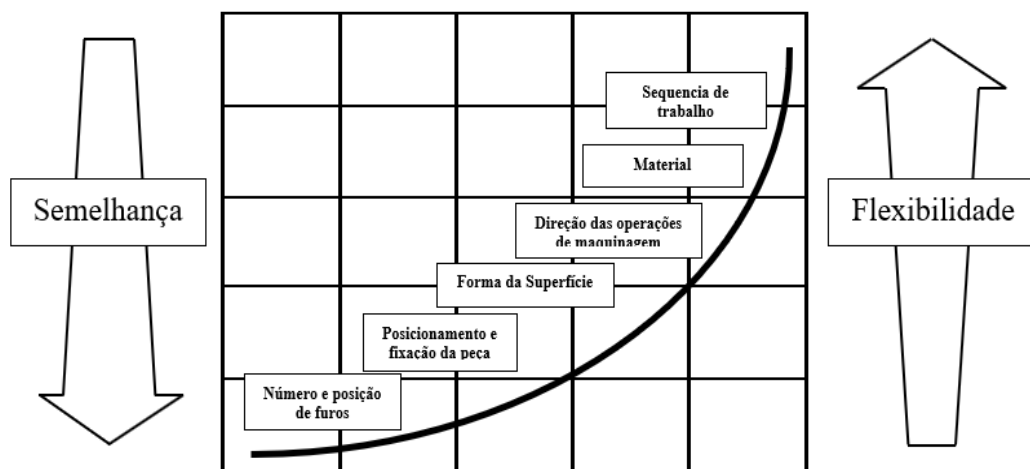


Figura 1.4 - Flexibilidade necessária na maquinagem de peças com mudanças no seu design [6].

Uma das maiores desvantagens na utilização de máquinas ferramenta convencionais é a área de trabalho limitada que oferecem, o que implica, para produtos de grande dimensão, a maquinagem por partes de uma peça ou até a divisão da peça em diferentes componentes para

serem maquinados em separado. Assim, uma solução flexível para a concretização de operações de maquinagem em peças de grandes dimensões pode passar pela utilização de robôs. Esta solução já é utilizada com sucesso em operações de soldadura e polimento, e com o seu constante desenvolvimento, tanto a nível mecânico como a nível de programação, tem sido adaptada a operações mais exigentes, como a fresagem e a furação. Em comparação com máquinas convencionais, um robô apresenta a vantagem de poder maquinar peças de enormes dimensões devido ao seu volume de trabalho que usualmente abrange 7.5 m^3 , chegando aos 20 m^3 com a sua capacidade de rotação [7], volume que ainda pode ser aumentado com a implementação do robô numa plataforma móvel. Na Figura 1.5, pode-se observar um robô instalado sobre um carril, para realização de operações de furação em componentes aeronáuticos de grande dimensão.



Figura 1.5 - Utilização de uma célula robótica para furação de componentes aeronáuticos [8].

Contudo, a aplicação de células robóticas para operações de maquinagem tem limitações. Uma das desvantagens é a baixa exatidão que estes mecanismos oferecem, sendo altamente dependente do processo de calibração. A baixa rigidez dos robôs, comparativamente a máquinas-ferramentas, traduz-se na incapacidade de o robô contrariar as forças induzidas pela operação de remoção de material. Este é o principal problema que impede a utilização de robôs industriais em aplicações de maquinagem pesada. Apesar destas desvantagens, a versatilidade dos robôs aliada ao seu custo (para o mesmo volume é mais barato que uma máquina ferramenta e com capacidade para outras tarefas) tornam a utilização de robôs na maquinagem bastante atrativa, quando as tolerâncias de operação assim o permitem. Na Tabela 1, são apresentadas algumas áreas de aplicação de maquinagem robotizada.

Tabela 1 - Produtos e processos de maquinagem em diferentes áreas utilizando robôs [9].

Áreas	Processo	Produto
Aeronáutica	Desbaste, polimento, furação, corte	Lâminas de turbina, fuselagem
Automóvel	Rebarbagem, desbaste, furação, fresagem, corte	Motores, painéis,
Moda	Fresagem, polimento	Moldes de manequim
Fundição	Rebarbagem, fresagem, furação, acabamento	Moldes
Marinha	Fresagem	Casco de barcos
Medicina	Desbaste, polimento	Próteses
Entretenimento	Fresagem	Adereços de filmagem
Plásticos	Fresagem	Moldes, capacetes
Madeira	Fresagem	Moldes, mobiliário

A implementação de sistemas robóticos para operações de maquinagem tem vindo a aumentar na indústria aeronáutica [10]. Sendo a construção de aeronaves caracterizada pela manipulação e maquinagem de peças de grande porte, a utilização de robôs é uma solução economicamente rentável, principalmente na montagem da fuselagem [11]. Esta operação, antigamente realizada à mão, envolve a produção de inúmeros furos em painéis e posterior rebitagem. Este processo influencia diretamente a performance e segurança da aeronave e a sua qualidade é dependente da perpendicularidade do eixo do furo com a superfície. É requerido que a folga entre o furo e o rebite seja inferior a 0.05 mm, o que devido ao erro de posicionamento de um robô e às variações dinâmicas durante o processo pode ser difícil de assegurar. Deste modo, a utilização de robôs neste processo tem de ser acompanhada de sistemas externos que assegurem as tolerâncias exigidas. Foram realizados vários estudos para a obtenção de sistemas de melhoramento da exatidão de robôs na operação de furação, como o *Robotic Drilling Precision System (RDPS)* que assegura a perpendicularidade do eixo do furo através de um dispositivo, denominado *multi-function end effector (MFFE)*, dotado de sensores que verifica a perpendicularidade do eixo da ferramenta em relação à superfície da peça durante a operação de furação [12]. A Figura 1.6, ilustra um robô na operação de furação da fuselagem de uma aeronave. Na furação utilizando um sistema robótico, outra estratégia para assegurar a qualidade do furo é o comando do robô com controlo de força [13]. Deste modo a força exercida pelo robô sobre a superfície inicial de furação é mantida constante durante o processo. Este tipo de controlo pode reduzir os riscos de deslizamento da ferramenta durante o contacto com a peça, melhorando assim a qualidade do furo.



Figura 1.6 - Robô a realizar operações de furação numa aeronave [14]

Contudo, este tipo de controlo não ultrapassa as limitações mecânicas de um robô, como a sua rigidez. De modo a obter melhores resultados, foi desenvolvida outra solução. Esta consiste na aplicação de uma pressão controlada contra a peça a ser maquinada com recurso a um tripode adaptado à ferramenta, e um sistema de movimentação da ferramenta relativamente ao tripode. Com este sistema é possível controlar a perpendicularidade do eixo da ferramenta com a superfície e evitar o deslizamento da ferramenta sobre a superfície da peça durante o processo. Assim, é possível assegurar uma exatidão de 0.2 mm, mesmo com a presença de forças induzidas pela operação de furação [15].

As soluções apresentadas são essenciais para a utilização de robôs em processos de furação quando a exatidão requerida não é satisfeita pelas características do robô a utilizar ou para materiais de elevada dureza. Porém, o controlo em trajetória e velocidade pode para a furação de materiais homogêneos e de baixa dureza produzir resultados satisfatórios.

A área de design também tem encontrado como solução a utilização de robôs em operações de maquinagem. O interesse desta área na utilização de células robóticas é a obtenção de peças de design de grande porte ou de formas complexas, peças que utilizando os métodos tradicionais teriam um custo demasiado elevado ou até a impossibilidade de as obter. Um exemplo é a peça criada pela Neoset Designs (www.neosetdesigns.com) para o artista Robert Longo. A peça, intitulada Death Star 2018, consiste numa esfera com 40 000 furos nos quais foram inseridos tubos de cobre. Trata-se de uma peça maciça com um peso total de 1000 kg, o que pela dimensão e peso limita a utilização de uma máquina tradicional CNC. Na Figura 1.7, está ilustrada a peça final.



Figura 1.7 - Death Star 2018 (peça obtida através de furação robotizada) [16].

1.1 Objetivos do projeto

O objetivo desta dissertação é a escolha, seleção e teste de um procedimento para a obtenção de peças de design singulares através de furação robotizada. A conceção de peças singulares deverá ser obtida pela incorporação de padrões de furos, facilmente configuráveis, de modo a obter peças “únicas”. A programação envolverá a utilização de software para a obtenção, em ambiente virtual, da peça e dos percursos de maquinagem para de seguida se obter o programa a usar na célula robótica. O trabalho terá como foco os softwares utilizados para a criação das peças e a transferência de informação entre eles de modo a esquematizar uma solução expedita, quase automatizada, para a obtenção de peças singulares. Tendo por base o objetivo principal definiram-se os seguintes passos intermédios:

- identificação e teste de ferramentas, ou softwares, que permitam definir padrões de furos facilmente configuráveis ou modificados nos modelos digitais das peças consideradas;
- definição e teste dos procedimentos para interface dos modelos digitais usados ao longo das várias fases desde o desenvolvimento das peças e respetivos padrões, até à definição e teste dos percursos de maquinagem a serem executados pelo robô em sistemas CAD/CAM;
- simulação e validação dos programas de maquinagem;
- implementação e teste dos programas de maquinagem na célula real.

Será utilizado um robô ABB IRB 2400, disponível no Laboratório de Robótica do DEMec da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, equipado com um motor árvore (*spindle*) para a realização das operações de furação.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, incluindo este capítulo de introdução, seguidos das referências bibliográficas e dos anexos.

No segundo capítulo são estudadas soluções para a incorporação de padrões de furos para a criação de peças singulares, com recurso a ferramentas digitais. São avaliadas as possibilidades e limitações de softwares CAD para este intuito.

No terceiro capítulo são testados métodos de programação de um robô para a concretização de operações de maquinagem, tendo em conta os modelos digitais das peças obtidos através da solução encontrada no capítulo anterior. De entre as possibilidades são avaliadas o uso direto do software de simulação e programação do robô (RobotStudio) e o uso de um software CAM genérico com capacidade para gerar programas de maquinagem para robôs através do software Mastercam/Robotmaster.

No quarto capítulo são apresentados casos de estudo de peças que servem de exemplo para aplicação e teste dos processos envolvidos na definição e execução de peças singulares. Os três casos são caracterizados pela criação de uma peça inicial e a incorporação de um padrão de furos de modo a obter uma peça singular, e depois a obtenção, a partir dessa peça, da programação da célula robótica para as operações de furação.

No quinto capítulo é testada a maquinagem de um padrão de furos numa peça real na célula robótica. A partir da programação obtida em modo offline será produzida em ambiente real uma peça singular. São expostos os procedimentos necessários à implementação na célula robótica da programação desenvolvida, nomeadamente a calibração da ferramenta e a identificação da localização da peça na célula robótica.

No último capítulo são apresentadas as conclusões finais de todo o trabalho elaborado e são sugeridos trabalhos que poderão ser feitos em continuidade desta dissertação.

2 Incorporação de padrões de furação em peças

Neste capítulo são estudadas soluções para a incorporação de padrões de furos na criação de peças singulares. Atualmente, a maioria da concepção de peças para maquinagem tem como recurso a utilização de softwares que facilitam a produção, como por exemplo, softwares CAD e CAM. Assim denota-se nas empresas uma incorporação e gestão digital de todas as etapas do processo. Tendo o mesmo foco, nesta dissertação efetuou-se uma pesquisa para identificar um software CAD que vá de encontro às necessidades específicas deste trabalho. Para a incorporação de padrões são impostos os seguintes requisitos aos softwares CAD:

- Capacidade de incorporar padrões em peças concebidas no próprio software ou noutro software CAD;
- Permitir a configuração/parametrização do padrão de modo a obter peças singulares;
- Obter modelos digitais da peça que permitam a programação de forma expedita da célula robótica para executar as operações de maquinagem.

Pretende-se assim obter, com recurso a um software CAD, um método para incorporação de padrões de furos numa peça, concebida ou importada de outro software, com a possibilidade de configuração desses padrões de modo a criar peças singulares e obter modelos que facilitem a posterior programação das operações de maquinagem na célula robótica. Foram estudados dois softwares CAD, o SolidWorks e o Rhinoceros 3D, e os seus *plug-ins* mais adequados para este trabalho. Para além das suas capacidades de modelação de peças foram analisados os formatos de importação/exportação disponíveis nos softwares, questão de interesse para a programação da célula robótica.

2.1 Criação de padrões

Padrões visuais podem ser encontrados das mais variadas formas, desde padrões naturais até padrões criados pelo ser humano. De uma forma geral, um padrão pode ser caracterizado pela repetição de um elemento constituinte desse padrão. Na natureza, podemos observar distintos padrões, como por exemplo, a forma das folhas de uma planta ou a disposição das penas de um pavão. Desde muito cedo, o homem replicou estes padrões visíveis na natureza em diferentes áreas como na arte, no design, na arquitetura. Na Figura 2.1, estão ilustrados exemplos de padrões visuais.



Figura 2.1 - a) Padrão natural [17]; b) Padrão criado pelo homem [18].

Nesta dissertação, o foco será a criação de padrões incorporados numa peça de modo a criar diferentes efeitos visuais. Como o objetivo deste trabalho é o uso de uma célula robótica para a execução de operações de furação, os padrões serão caracterizados pela disposição dos furos na superfície dessa peça. Portanto, a criação de padrões terá como meta a incorporação de um padrão de furos circulares na superfície de uma peça. De forma a obter peças singulares, o padrão de furos deverá ser configurável de modo a criar facilmente peças distintas. Com este objetivo em mente, o uso de softwares de CAD convencionais, que permitem a criação individual de cada peça, apresentam algumas limitações. Estes softwares permitem a modelação 3D de praticamente qualquer peça imaginável, mas mostram-se limitados na capacidade de implementar, neste caso, um padrão em qualquer peça (modelo digital) concebida ou fornecida e de configurar esse padrão de uma forma expedita. Como as funcionalidades de base destes softwares não satisfazem estes requisitos, será necessário o uso de *plug-ins* existentes ou até de outros softwares que possam dar resposta a este problema. Na Figura 2.2, podemos ver esta questão na forma de um esquema.

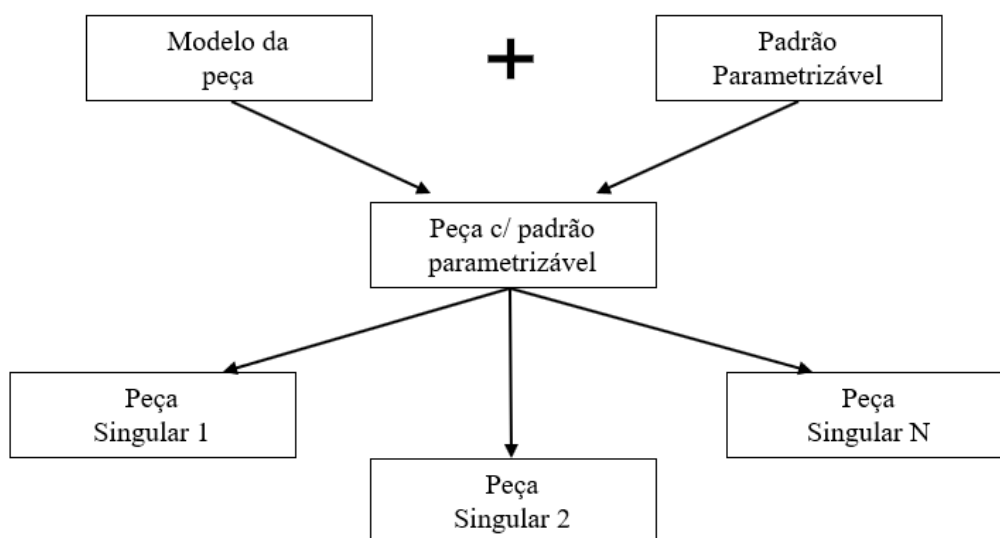


Figura 2.2 - Obtenção de peças singulares pela incorporação de padrões parametrizáveis.

2.2 Softwares CAD

Para a modelação da peça e posterior incorporação de um padrão de furos, foram testados dois softwares CAD, o SolidWorks e o Rhinoceros. Ambos permitem a modelação 3D de uma peça, sendo o foco dos testes realizados a avaliação da sua capacidade em implementar um padrão configurável na superfície de uma peça. O SolidWorks apresenta uma funcionalidade de criação de macros, onde através de uma linguagem de programação se podem definir comandos para a realização de operações de modelação para a obtenção de peças. O Rhinoceros possui um *plug-in* chamado Grasshopper, que disponibiliza uma programação visual/gráfica, com recurso a blocos de funções, para a criação das mais variadas formas de um modo paramétrico. Foram testadas ambas as funcionalidades destes softwares para a incorporação de padrões.

SolidWorks

O SolidWorks (www.solidworks.com) é um software de modelação 3D, CAD, criado em 1995 pela SolidWorks Corporation e adquirido pela multinacional Dassault Systems em 1997. Este software tem como base a computação paramétrica, obtendo-se formas tridimensionais através de operações geométricas elementares. De uma forma simplificada, o SolidWorks cria formas tridimensionais a partir de desenhos 2D, *sketch*, que depois são transformados por uma operação num modelo tridimensional, *feature*. O desenho 2D ou *sketch* consiste em geometrias como pontos, linhas, splines, arcos, elipses entre outras, que podem ser configuradas quanto às suas dimensões e localização no espaço. As operações ou *features* são o que dão a forma tridimensional à peça, havendo dois tipos: operações baseadas em *sketch*, onde o desenho 2D é extrudido para adicionar ou remover material da peça; operações não baseadas em *sketch*, em que não é necessário um desenho 2D para obter a forma pretendida, por exemplo, operações para criação de chanfros, *fillets*, entre outros. Para além das capacidades de modelação, o SolidWorks também dispõe de operações de simulação de movimentos e de análise estrutural de peças, componentes que pela sua irrelevância para esta dissertação não são abordados.

Estamos perante um software CAD poderoso que permite a conceção de peças simples ou complexas, de uma forma expedita dependendo apenas da experiência do utilizador. Contudo, atendendo aos requisitos impostos para a incorporação de um padrão, o uso convencional do SolidWorks (criação de *sketchs* e utilização de *features*) não vai de encontro aos objetivos deste trabalho e, portanto, será necessário ter outra abordagem ao problema. Após uma pesquisa das restantes funcionalidades do software foi observado que o mesmo é dotado de uma API (*Application Programming Interface*) que permite a gravação de uma série de operações realizadas no software numa linguagem de programação, criando uma macro. Esta funcionalidade mostra-se útil quando existe a repetição dos mesmos passos para a criação de um *sketch* ou até de uma forma tridimensional. Depois de criar uma macro, esta pode ser utilizada repetidamente para conceber o mesmo *sketch* ou peça. Para além da gravação dos passos efetuados no software também é possível a criação de uma macro de raiz, sendo necessário o conhecimento de uma linguagem de programação e dos comandos relacionados com o software. No SolidWorks é possível a criação de macros utilizando diferentes linguagens de programação, desde VBA, C#, C++, VB.net. Devido à experiência existente de programação na linguagem VBA foi decidido a utilização desta, apesar de as outras linguagens poderem apresentar vantagens na criação de macros mais complexas.

Como esta ferramenta permite a programação de macros para a criação de desenhos ou peças, e estas depois poderem ser repetidas de um modo automático, foi tido como interessante a sua utilização para a incorporação de padrões e, portanto, foram testadas as capacidades de programação de macros para responder aos requisitos impostos.

Após a criação de várias macros, foi observado que através da programação é possível, de uma forma automatizada, produzir padrões, em forma de *sketch*, parametrizáveis. Para tal, é necessária a parametrização de comandos existentes na programação das macros. Na Figura 2.3, é apresentado um exemplo onde os parâmetros do comando *CreatCircle* foram alterados para variáveis, que através da programação podem ser manipuladas podendo-se alterar a localização e o diâmetro do círculo criado. Com a criação de uma janela, a utilização e alteração dos parâmetros torna-se expedita.

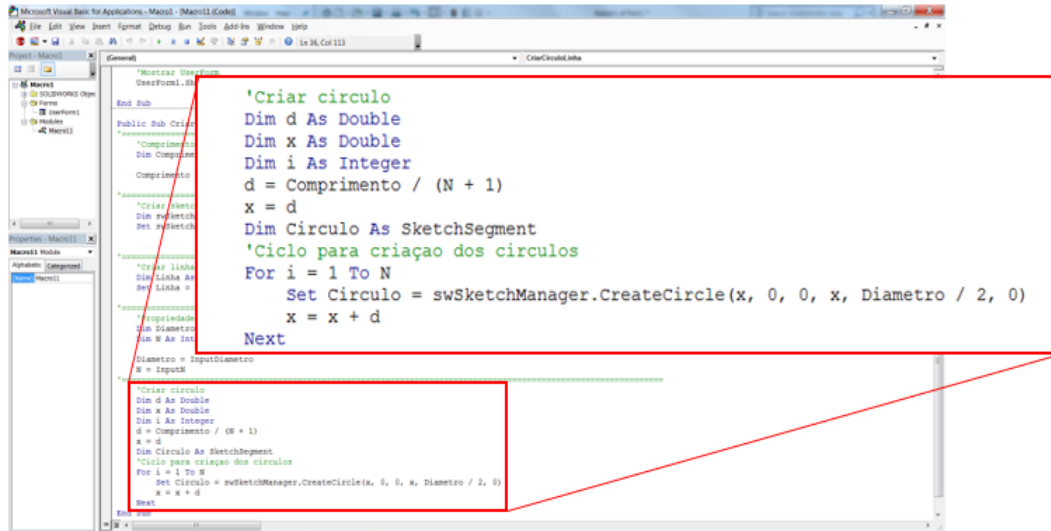


Figura 2.3 - Exemplo de uma macro para a criação de círculos segundo uma linha.

Neste código foram criados círculos segundo uma linha reta, em que os centros dos círculos dividem a linha em segmentos iguais. Para a utilização desta macro é necessário fornecer como entrada a dimensão da linha (Comprimento), o número de furos (N) e o diâmetro dos furos (Diâmetro). A forma dos padrões criados é definida na programação, podendo-se obter padrões mais complexos com a criação de códigos mais complexos. Dos comandos observados, alguns destacaram-se pela sua utilidade para a criação de padrões, o *Linearpattern* e o *Circularpattern*. Contudo, a criação de padrões utilizando macros no SolidWorks apresenta limitações que não permitem satisfazer os requisitos definidos:

- Não é possível incorporar padrões em qualquer peça utilizando a mesma macro criada;
- A criação de padrões em superfícies curvas requer uma complexidade de programação elevada.

Como requisito para a incorporação de padrões numa peça, era necessária a capacidade de incorporar um padrão em qualquer peça, concebida de raiz ou fornecida pelo cliente. Na criação de macros foi observada a incapacidade de esta responder ao requisito. Devido ao seu modo de funcionamento, não é possível fornecer uma peça como entrada na programação da macro para esta se adaptar à peça, por exemplo, selecionar uma superfície de uma peça existente no ambiente SolidWorks para incorporar um padrão na mesma. Isto implica que para cada peça seria necessário criar uma macro específica para incorporar um padrão, tendo em conta as suas dimensões geométricas. Para além desta limitação, a criação de padrões em superfícies curvas demonstrou elevar a complexidade de programação. Esta complexidade deve-se ao modo de funcionamento do SolidWorks, que como base tem a criação de um desenho num plano previamente definido para depois criar uma peça tridimensional. Como na furação da peça é pretendido que o eixo dos furos sejam perpendiculares à superfície, cada círculo, representativo do furo, teria de estar contido num plano perpendicular à normal da superfície no ponto onde se pretende obter esse furo. Deste modo, seria necessária a definição de um plano para cada

furo, cuja orientação seria dependente da superfície, o que no caso de superfícies complexas não é possível definir de um modo expedito. Tornam-se assim evidentes as dificuldades associadas na programação para obter este resultado.

Em suma, a incapacidade de incorporar um padrão em qualquer peça de forma expedita aliada a elevada complexidade de programação tornam o uso do SolidWorks pouco atrativo para este trabalho.

Rhinoceros 3D

O Rhinoceros 3D (www.rhino3d.com) é um software de modelação 3D, CAD, baseado no modelo matemático NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) para definir as entidades geométricas como curvas e superfícies de forma livre. Este software foi criado pela Robert McNeel & Associates, empresa fundada em 1980, inicialmente como um *plug-in* do AutoCad mas com o aumento de popularidade e desenvolvimento, evoluiu para uma aplicação independente.

O RhinoCeros 3D é utilizado em várias áreas, desde *design* a engenharia, principalmente devido à multiplicidade de operações, capacidade de integração com outros programas e à sua relação custo-benefício, comparativamente a outros softwares de modelação 3D. Para além das variadas operações que permite, os utilizadores podem personalizar o software e a troca de informação entre os utilizadores e os produtores é estimulada de forma a desenvolver o software de encontro com as necessidades dos utilizadores. O Rhino3D oferece um SDK (*Software Development Kit*) com o qual é possível desenvolver interfaces, comandos e menus diferentes. Como tal, este software possui inúmeros *plug-in*'s que complementam e expandem as suas capacidades para áreas específicas.

Um *plug-in* que se destacou para esta dissertação foi o GrassHopper, que já é parte integrante do Rhinoceros a partir da versão 6. Trata-se de uma linguagem de programação visual desenvolvida por David Rutten. O Grasshopper possui uma enorme biblioteca de blocos com variadas funções, podendo-se dividir entre variáveis, componentes (funções similares às *features*) e conexões. Na Figura 2.4, podemos ver um exemplo da utilização do Grasshopper para a criação de um círculo.

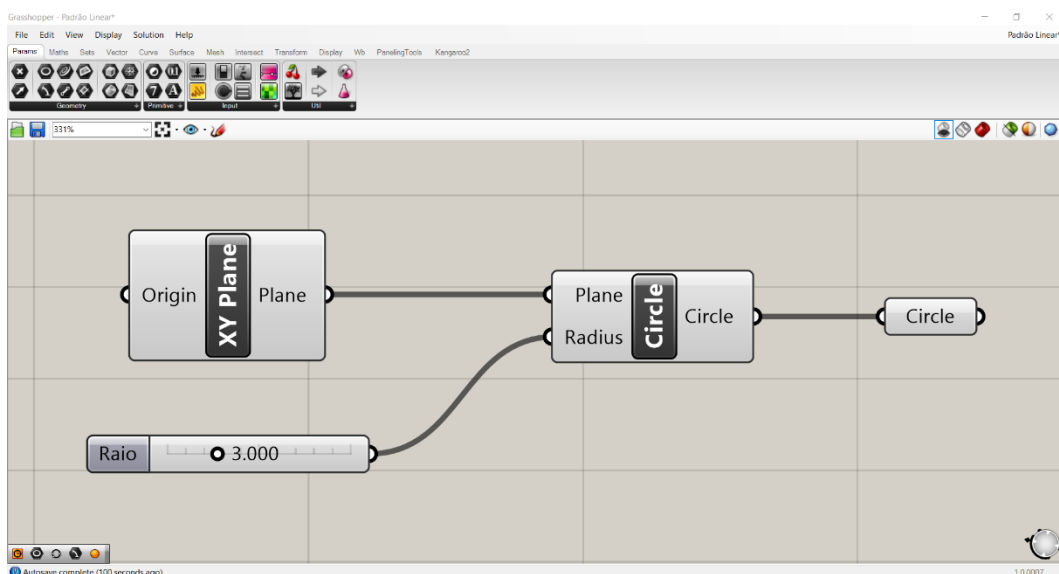


Figura 2.4 - Criação de um círculo utilizando a programação do Grasshopper.

Devido à multiplicidade de operações e à rápida curva de aprendizagem, este software demonstra-se adequado para esta dissertação. Deste modo, foram testadas as capacidades deste para a incorporação de padrões numa peça.

Uma particularidade na utilização do Grasshopper é a possibilidade de fornecer uma peça, ou elementos dessa peça, como uma “entrada” na programação. Assim sendo, pode-se seleccionar uma superfície de uma peça criada no Rhinoceros para ser utilizada e manipulada na programação do Grasshopper. Tal capacidade vai de encontro com o requisito imposto anteriormente de ser capaz de incorporar um padrão em qualquer peça, concebida ou fornecida.

Durante a avaliação do software foi observado que, dependente do formato, peças importadas podem ser definidas apenas como um objeto, ou seja, não permitem a seleção direta de uma superfície na qual se pretende incorporar um padrão. Contudo, o Grasshopper disponibiliza um bloco *DeconstructBrep* que possibilita a divisão de um objeto em todos os seus elementos constituintes como vértices, arestas e superfícies (Figura 2.5). Assim sendo, este software cumpre com o primeiro requisito imposto. Ainda quanto à seleção de superfícies, foi observado outro bloco de interesse chamado *IsoTrim* que permite a geração de um subconjunto isoparamétrico criado a partir de uma superfície seleccionada (Figura 2.6). Este bloco mostra-se interessante porque na definição de um padrão de furos, pode ser necessário evitar os limites da superfície seleccionada para não incorrer em problemas durante as operações de maquinagem, como por exemplo, realizar um furo demasiado próximo de uma aresta da peça.

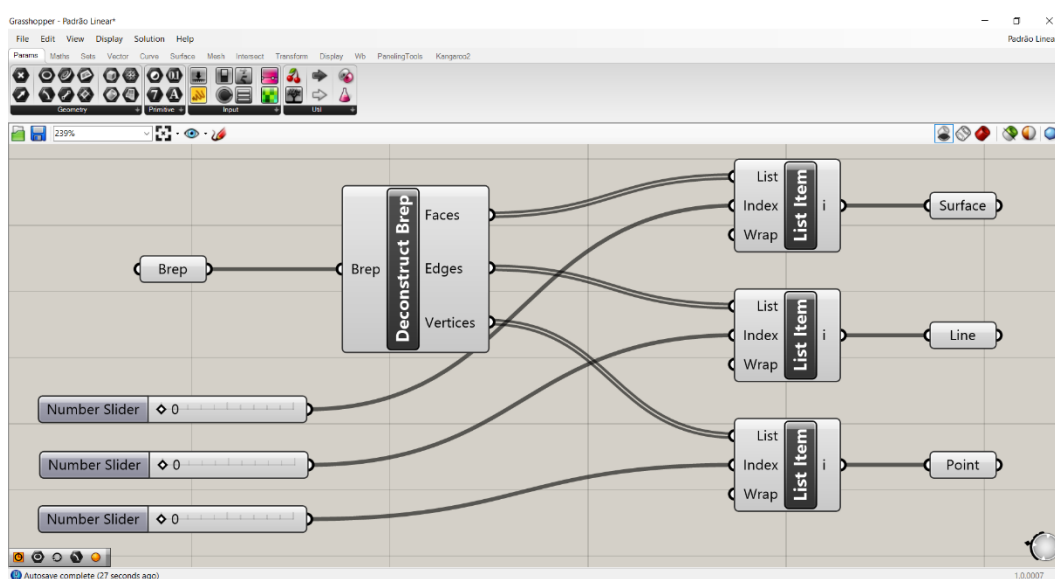


Figura 2.5 - Bloco “Deconstruct Brep” com as saídas de superfícies, linhas e pontos.

O Grasshopper, sendo um software de elevado uso em design, fornece múltiplas funções para a criação de padrões. Com esta multiplicidade de funções, a criação de padrões é apenas limitada pela imaginação do utilizador. Outro aspeto de interesse na programação utilizando o Grasshopper é o facto de os blocos que efetuam operações serem parametrizáveis, sendo possível estipular intervalos de variação para estes parâmetros. Assim, após a criação de um programa de incorporação de um padrão, este pode ser facilmente alterado obtendo-se diferentes configurações do mesmo padrão, gerando assim peças singulares. Na Figura 2.6, está apresentado o bloco *DivideSurface* que divide uma superfície numa grelha e fornece como saída os pontos de intersecção das linhas e colunas dessa grelha. Este bloco tem como entrada a superfície a dividir e dois parâmetros que definem o número de linhas e de colunas. Com este bloco, é possível criar um padrão de pontos em forma de grelha e as suas entradas permitem uma rápida configuração do número e localização dos pontos.

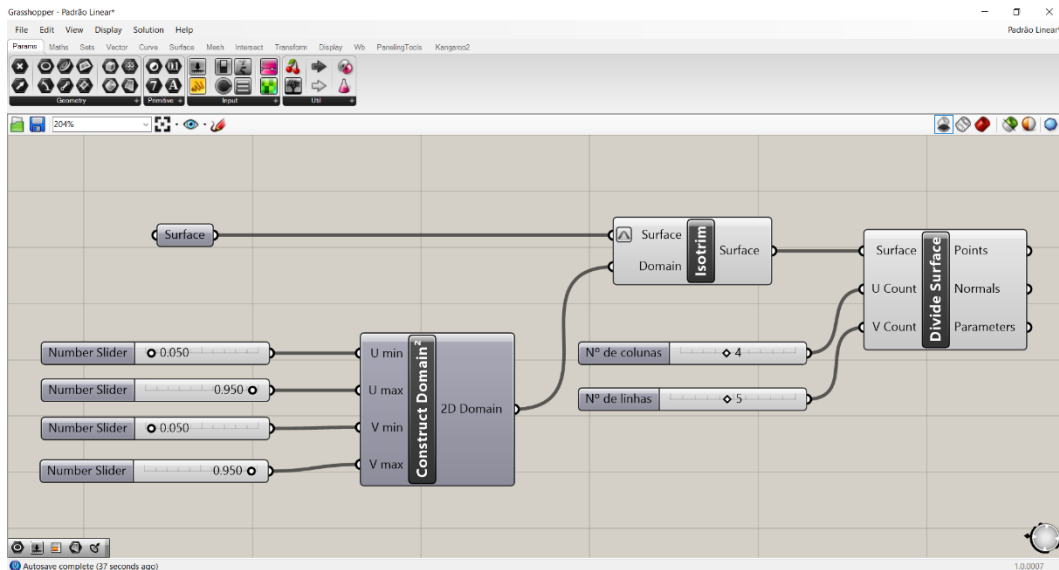


Figura 2.6 - Implementação de um padrão de pontos em forma de grelha (*Divide Surface*) numa subsuperfície criada através do bloco *IsoTrim*.

Na utilização do Grasshopper, depois de elaborado um programa, qualquer função implementada que produza como saída um elemento geométrico (pontos, linhas, superfícies, sólidos) pode ser utilizada para criar o elemento no ambiente do Rhinoceros. Com isto, apesar de se criar um programa para a incorporação de um padrão de furos, o programa para além de criar o padrão pode criar qualquer elemento utilizado na geração desse mesmo padrão. Esta particularidade é de elevado interesse pois facilita a posterior programação da célula robótica para as operações de maquinagem.

Em conclusão, o software Rhinoceros com o Grasshopper revelam ser a ferramenta a utilizar para a incorporação de padrões pois apresentam uma elevada versatilidade nas operações possíveis e cumprem todos os requisitos impostos. Após a criação de um programa no Grasshopper, este pode ser utilizado com qualquer peça, desde que o formato seja compatível com o software Rhinoceros. Permite ainda a configuração do padrão através da variação de parâmetros; os modelos das peças obtidos permitem a programação expedita da célula robótica para as operações de maquinagem.

De uma forma simplificada, os programas que foram criados através do Grasshopper podem ser divididos em três partes (Figura 2.7):

1. Seleção e manipulação da superfície na qual se pretende incorporar o padrão;
2. Geração de um padrão constituído por pontos na superfície selecionada;
3. Utilização dos pontos gerados para a criação de furos.

Desta forma, a primeira e última partes do programa podem ser sempre mantidas independentemente do padrão gerado. Assim, se for pretendido usar outros blocos para a geração de um padrão apenas se tem de alterar a segunda parte do programa sem ser necessária a criação de um programa de raiz.

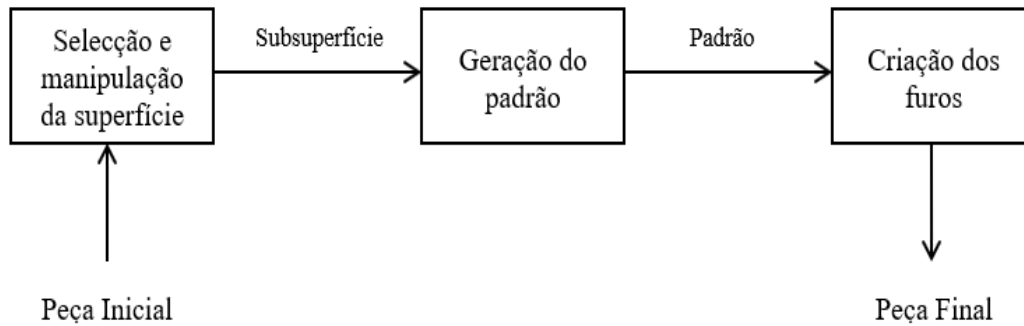


Figura 2.7 - Esquema do programa criado no Grasshopper.

Na Figura 2.8 é apresentado no ambiente do Rhinoceros a utilização da primeira parte do programa criado no Grasshopper. Foi criado um cilindro no Rhinoceros através da utilização de uma ferramenta de sólidos que permite a criação de formas elementares (cubos, cilindros, cones). Por se ter utilizado esta ferramenta, a forma criada é representada no software como um objeto e não permite a seleção dos seus elementos constituintes (arestas, superfícies), de modo a que para selecionar uma superfície do objeto no Grasshopper é necessário a utilização do bloco *Deconstruct Brep*. Depois de utilizada esta função é possível selecionar a superfície desejada, neste caso a superfície lateral do cilindro, e com o bloco *Iso Trim* criar um subconjunto da superfície selecionada. Os parâmetros do *Iso Trim* permitem definir os limites do subconjunto criado. A Figura 2.8, apresenta o subconjunto criado na superfície de uma peça por utilização destas funções.

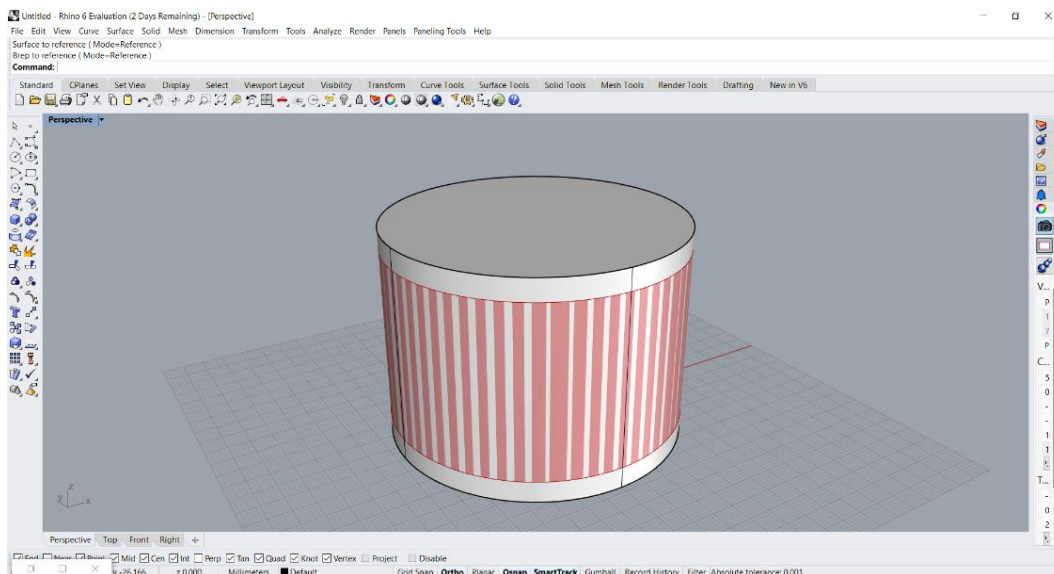


Figura 2.8 – Subsuperfície criada através do Grasshopper no ambiente do Rhinoceros.

Depois de criado o subconjunto da superfície desejada, pode ser implementado um padrão de pontos usados para a criação de furos nessa peça. Na Figura 2.9, está ilustrado o resultado da implementação de um padrão de pontos criado através do bloco *Divide Surface* e a utilização desses mesmo pontos para a criação dos furos. A concepção dos furos é obtida através da criação de cilindros com o centro da base nos pontos do padrão e a remoção desses cilindros da peça original. A orientação dos cilindros foi definida através dos vetores perpendiculares à superfície em cada ponto do padrão. Assim o diâmetro dos cilindros criados define o diâmetros dos furos e a altura dos cilindros define a profundidade dos furos.

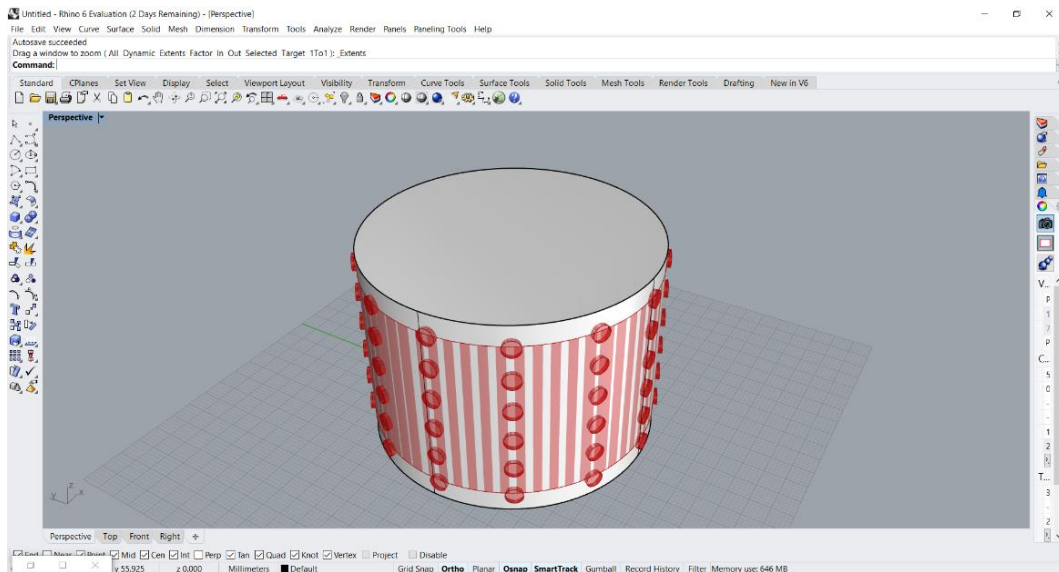


Figura 2.9 - Cilindros criados na subsuperfície da peça para concepção dos furos no ambiente do Rhinoceros.

Em conclusão, dos softwares testados o Rhinoceros demonstrou ser a melhor escolha para a incorporação de padrões em peças, tendo cumprido os requisitos impostos. O SolidWorks, apesar de ser uma ferramenta útil e amplamente utilizada na área de engenharia mecânica, demonstrou limitações e pouca versatilidade para solucionar o problema proposto.

2.3 Metodologia de implementação

A incorporação de padrões de furos parametrizáveis em modelos digitais de peças é realizada através da programação no Grasshopper. Foram considerados três casos para a criação de uma peça, modelo digital, e incorporação de um padrão de furos nessa mesma peça:

- Concepção do modelo digital de uma peça num software CAD qualquer, importação do modelo para o Rhinoceros e utilização do Grasshopper para a incorporação dos padrões de furos;
- Criação de uma peça no ambiente do Rhinoceros e incorporação dos padrões de furos através do Grasshopper;
- Utilização do Grasshopper para a criação de uma peça e incorporação de padrões de furos.

O Rhinoceros tem uma elevada capacidade de integração com outros softwares CAD, sendo possível a importação direta a partir desses softwares CAD sem ser necessário a gravação dos modelos num formato neutro (STEP, IGES). Assim, é possível importar diretamente modelos de peças definidos em formato proprietário do SolidWorks (.sldpart, .sldasm). Na situação de o Rhinoceros não ser compatível com o formato proprietário de um software CAD, é necessária a importação do modelo da peça num formato neutro. De forma a determinar alguma particularidade na incorporação de padrões em modelos importados para o Rhinoceros foi definida uma peça modelo em SolidWorks e exportado o modelo dessa peça no formato (.sldpart) e em formatos neutros (STEP, IGES), sendo posteriormente incorporado um padrão com a utilização do Grasshopper. Na Tabela 2, estão apresentados os resultados desta análise.

Tabela 2 - Análise de modelos exportados do SolidWorks para o Rhinoceros.

Formato	Representação no Rhinoceros	Seleção de superfície	Incorporação de padrões
SolidWorks (.sldparts)	<i>Closed Solid Polysurface</i>	Utilização do bloco <i>Deconstruct Brep</i>	✓
IGES (.igs)	Conjunto de <i>Trimmed Surfaces</i>	Seleção direta	✓
STEP (.stp)	<i>Closed Solid Polysurface</i>	Utilização do bloco <i>Deconstruct Brep</i>	✓

Foi verificado que qualquer um dos formatos testados pode ser utilizado, obtendo-se uma correta incorporação de padrões. Os modelos importados no formato SolidWorks e STEP são representados no Rhinoceros como um objeto (*Closed Solid Polysurface*). Devido a esta representação, a seleção de superfície no Grasshopper requer a utilização do bloco *Deconstruct Brep* para a seleção da superfície desejada. Ao contrário, o modelo importado no formato IGES é representado como um conjunto de superfícies, o que permite a seleção das mesmas superfícies selecionadas nos modelos SolidWorks e STEP, sem ser necessário o uso do bloco *Deconstruct Brep*. Como a modelação dos furos no modelo é realizada através de uma função de subtração entre sólidos (*Solid Difference*), para a incorporação de padrões neste modelo (IGES) é necessário o uso do bloco *Brep Join*, bloco no qual se podem introduzir múltiplas superfícies para a obtenção de um sólido (este bloco só funciona com superfícies, se estas formarem um objeto “fechado”), depois de utilizado este bloco a programação mantém-se igual.

Uma particularidade dos modelos importados do SolidWorks é a divisão de superfícies contínuas. A peça criada para estes testes foi um cone truncado, sendo selecionada a superfície lateral para a incorporação de um padrão. Como se pode observar na Figura 2.10, quando se pretende selecionar a superfície lateral do cone esta está dividida em duas partes. Contudo esta particularidade não limita a capacidade de incorporar um padrão através do Grasshopper, pois é possível considerar as duas partes da superfície na programação.

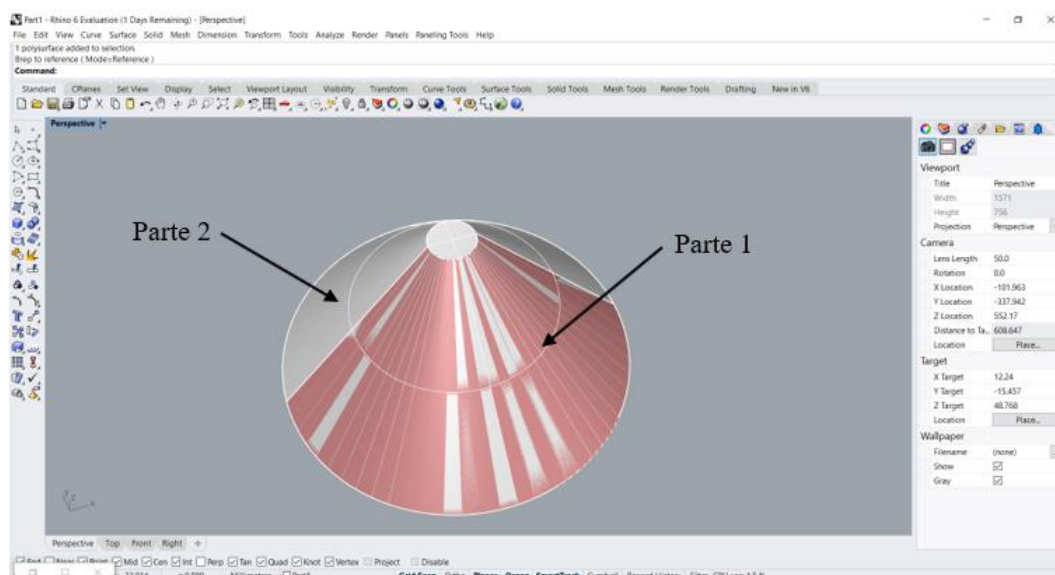


Figura 2.10 - Seleção da superfície lateral de um cone importado do SolidWorks, no ambiente do Rhinoceros.

A criação do modelo da peça no Rhinoceros para a posterior incorporação de padrões de furos verificou ser, como esperado, de fácil concretização. A principal diferença entre a criação da peça no Rhinoceros ou no Grasshopper é a capacidade de parametrizar o modelo da peça. A utilização do Grasshopper para a criação simultânea da peça inicial e incorporação do padrão

de furos, permite a obtenção de uma peça inicial parametrizável, podendo-se alterar as dimensões sem ser necessária a criação da peça de raiz. Esta solução tem algum interesse se a peça original puder ser alvo de alterações dimensionais, podendo-se ter uma visão imediata da peça final com o padrão de furos.

Independentemente da origem da peça inicial, depois de incorporado o padrão e obtida a peça final, esta terá de ser gravada e exportada para um software CAM para a determinação dos percursos de maquinagem. O software CAM utilizado neste trabalho é o Mastercam X5. Este software é compatível com o Rhinoceros permitindo a importação de ficheiros no seu formato (.3dm). Contudo, foi determinado que para uma fácil utilização das ferramentas do Mastercam é necessário a importação de pontos criados nos centros dos furos e estes não são exportados no formato do Rhinoceros. Para além dos centros dos furos, a superfície na qual será incorporado o padrão de furos, deverá ser representada como uma superfície contínua, situação que não ocorre em todos os formatos. Deste modo, podemos identificar dois requisitos necessários na exportação do modelo da peça final:

- Devem ser exportados os centros dos furos;
- A superfície sobre a qual se incorpora o padrão de furos deve ser representada como uma superfície contínua (deve ser possível seleccionar uma superfície que contenha o padrão completo).

Considerados estes requisitos, foram testados vários formatos de modo a determinar o mais adequado a ser utilizado na exportação do modelo da peça. Na Tabela 3, podemos ver os formatos testados e os resultados obtidos.

Tabela 3 - Análise dos formatos de exportação do Rhinoceros para o Mastercam.

Formato	Versão	Importação para o Mastercam	Análise dos elementos geométricos no Mastercam	Importação de pontos auxiliares na definição dos percursos
Rhinoceros (.3dm)	Rhino5 ou anterior	Conjunto de superfícies	Não determina pontos	✓
ACIS (.sat)	ACIS 4.0	Superfície fechada	Determina centros e interseções	×
IGES (.igs)	Mastercam X	Conjunto de superfícies	Não determina pontos	✓
Parasolid (.x_t)	Mastercam	Superfície fechada	Determina interseções	×
		Conjunto de superfícies	Determina interseções	×
STEP (.stp)	AP203	Superfície fechada	Determina centros e interseções	✓
		Conjunto de superfícies	Determina interseções	✓

O Mastercam possui ferramentas de análise geométrica que permitem determinar pontos pertencentes a entidades (extremidades de linhas, pontos médios de linhas, centro de círculos). A partir da análise realizada foi possível determinar que estas ferramentas não identificam pontos nos modelos importados no formato Rhinoceros e IGES. O centro dos furos não é possível de ser determinado, independentemente do formato, tal deve-se aos furos serem o resultado da projeção de um círculo sobre uma superfície, que no caso de não ser uma superfície plana o resultado da projeção não é um círculo. Deste modo, para uma definição expedita dos percursos no Mastercam é necessário importar os pontos criados no centro dos furos e estes apenas são exportados no formato Rhinoceros, IGES e STEP. Após a seleção dos pontos ainda é necessário selecionar uma superfície para definir os percursos de maquinagem. Os modelos são representados de forma diferente dependendo do seu formato, podendo ser representado como um conjunto de superfícies ou uma superfície fechada que engloba todas as superfícies do modelo. A forma mais expedita para a definição dos percursos é a seleção de uma superfície que engloba todo o padrão de furos. Considerando apenas os formatos que exportam os centros dos furos foi verificado que o formato Rhinoceros e IGES permitem selecionar a superfície desejada, porém o Mastercam não gera os percursos pretendidos, deste modo. Para ambos os formatos, a definição dos percursos necessita a seleção da superfície que engloba o fundo dos furos, o que significa que a definição do percurso tem de ser realizada individualmente para cada furo, o que torna o uso destes formatos pouco atrativo. O formato STEP permite a configuração da importação da peça, pode ser importada como sólido ou *trimmed surfaces*. Se importada como *trimmed surfaces*, a peça é representada como um conjunto de superfícies e a definição dos percursos é semelhante à definição utilizando os formatos Rhinoceros e IGES. Se a peça for importada como sólido, é representada como uma superfície fechada, permite a seleção da superfície que engloba todas as superfícies do modelo e os percursos são gerados como pretendido. Desta forma, o formato STEP permite no Mastercam a seleção dos pontos importados e da superfície que engloba todo o padrão, gerando os percursos de maquinagem. Tendo sido o formato (STEP) que permitiu a definição mais expedita dos percursos no Mastercam, é este o formato a ser utilizado.

Posto isto, fica definido o método de incorporação de padrões em modelos digitais de peças. O software utilizado é o Rhinoceros conjuntamente com o Grasshopper. Fica verificada a possibilidade de importar modelos obtidos em outros softwares CAD e a capacidade de implementar um padrão de furos em qualquer modelo, independentemente da sua forma/geometria. Estabeleceu-se também que para a geração expedita dos percursos de maquinagem, a peça final obtida (peça com o padrão de furos) tem de ser acompanhada pelos pontos do centro dos furos e que o formato de exportação a utilizar é o formato STEP, configurado para importação de modelo sólido. Na Figura 2.11, é apresentado um esquema que sintetiza a transferência do modelo digital da peça considerando as possíveis aplicações CAD e CAM testadas. O modelo pode ser criado no Rhinoceros ou importado de outro software CAD, independentemente, o modelo é manipulado pelo Grasshopper para gerar uma peça singular e o modelo resultante é exportado no formato STEP para um software CAM, para a geração dos percursos de maquinagem.

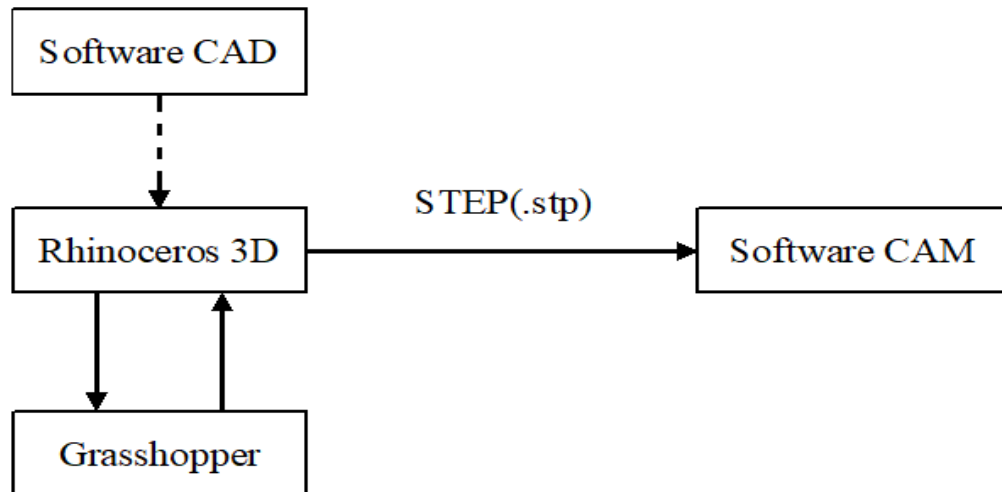


Figura 2.11 - Esquema da transferência do modelo digital entre softwares.

3 Programação de operações de furação com robô industrial

Neste capítulo é abordada a programação de uma célula robótica, referenciando os diferentes métodos para a sua obtenção. A obtenção da programação do robô tem como foco a utilização de um software CAD/CAM (Mastercam) e o software de programação e simulação offline da ABB (RobotStudio), uma vez que o robô utilizado é da ABB (IRB 2400/16). A utilização do Mastercam para a programação de robôs recorre à aplicação adicional (*add-on*) Robotmaster, integrada no Mastercam. Com a utilização de várias aplicações que utilizam modelos digitais das peças, assumem particular importância as diferentes possibilidades de conversão entre formatos (conversão direta ou via formato neutro) para importação/exportação entre os softwares CAD, CAD/CAM ou de simulação e programação de robôs, utilizados neste trabalho.

3.1 Estratégias de programação

Os robôs são máquinas que efetuam operações automatizadas, em que para a sua programação é necessária a definição de percursos e parâmetros de movimento para uma determinada operação. Na fase inicial da implementação de células robóticas, a programação era obtida utilizando diretamente o robô e, gravando os movimentos realizados. Com o desenvolvimento das capacidades computacionais e de softwares de simulação, é possível hoje obter a programação num ambiente virtual, onde se programam e simulam as operações a realizar pelo robô. Assim podemos distinguir dois modos de programação de sistemas robóticos:

- Programação Online;
- Programação Offline.

A programação online diz respeito a programação direta utilizando o robô. Neste método, o programador movimenta o robô para as posições pretendidas e grava essas posições e instruções na memória do controlador do robô, criando-se assim um programa que representa os movimentos ensinados. As posições pretendidas podem ser ensinadas ao robô de dois modos: manual *leadthrough* ou *teach-pendant*. No modo manual *leadthrough*, o programador desloca manualmente o punho, ou outra ferramenta que esteja adaptada na extremidade do robô, para as posições pretendidas. No segundo modo, *teach-pendant*, o programador utiliza a consola de interface do robô, dando instruções de movimento para atingir as posições desejadas. A programação online apresenta alguns problemas como o risco de colisão entre o programador e o robô, pois nem sempre é possível manter uma distância de segurança entre os dois durante a programação. Uma das maiores desvantagens na programação online é a necessidade de parar a célula robótica, o que num ambiente industrial se traduz numa perda de produtividade.

A programação online do robô não foi considerada neste trabalho, devido a não se tratar de uma solução expedita para a programação de operações de maquinagem. A definição da localização e orientação dos furos através da programação online é um processo demorado e não garante o mesmo rigor obtido pela programação offline. Deste modo, na programação do robô para a

realização das operações de maquinagem apenas foi considerada a programação offline, diretamente no software de simulação e programação do robô ou com recurso a um software CAD/CAM com capacidade de gerar códigos na linguagem de programação do robô.

Na programação offline, o programador tem como recurso a utilização de um software de simulação onde pode estipular as trajetórias pretendidas, sem ser necessária a movimentação direta do robô, e verificar se os movimentos são possíveis e se não incorreu em nenhum erro. Esta validação é obtida num ambiente virtual onde se simula a célula robótica que se pretende programar. A programação consiste na criação de linhas de código, numa linguagem específica do robô, que traduzem as trajetórias e os parâmetros de movimento. Para além destes, é possível a integração de sinais de sensores externos ao robô no código. Depois de criado o programa e verificada a sua validade, este pode ser transferido para o controlador do robô. A linguagem usada na programação varia entre os fornecedores, sendo que cada um disponibiliza um software específico para a programação offline dos seus robôs. Na Tabela 4, são apresentados alguns dos principais fornecedores de robôs e os respetivos softwares de simulação.

Tabela 4 - Fornecedores de robôs e respetivos softwares de simulação.

Fornecedores	Software
ABB	RobotStudio
FANUC	ROBOGUIDE
KUKA	KUKA SIM
STÄUBLI	SRS
MOTOMAN	MotoSim EG

A célula robótica disponível para a realização das operações de furação é constituída por um robô ABB (IRB 2400/16), pelo que o software de simulação e programação utilizado foi o RobotStudio. O RobotStudio é um software proprietário da ABB, que permite a simulação e programação offline de robôs ABB. Este software permite criar, em ambiente virtual, células robóticas disponibilizando numa biblioteca inúmeros equipamentos fornecidos pela ABB, como robôs, mesas posicionadoras, eixos lineares, entre outros. Para além dos equipamentos disponibilizados, o RobotStudio permite a importação ou modelação de outros equipamentos no ambiente virtual, ou seja, dispõe de funcionalidades encontradas em softwares CAD.

O RobotStudio tem a particularidade de incorporar um modelo virtual do controlador dos robôs reais. Isto permite que a simulação no ambiente virtual seja a mais próxima da realidade, garantindo de certa forma que se um programa for validado em ambiente virtual este funcionará na célula robótica real. Esta funcionalidade também inclui um modelo virtual da consola de programação, possibilitando a programação do robô virtual de forma idêntica a programação online. A linguagem utilizada na programação de robôs ABB é a linguagem Rapid, linguagem proprietária da ABB. Os programas obtidos pelo RobotStudio podem ser diretamente utilizados nos controladores de robôs reais, não necessitando de qualquer conversão ou pós-processamento. O RobotStudio é definitivamente um software de grande utilidade permitindo simulações realistas e obtenção de programas prontos a implementar na célula robótica. De uma forma geral, podem salientar-se as seguintes funcionalidades úteis do RobotStudio para a criação de programas Rapid:

- Importação de modelos CAD;
- Otimização de trajetórias e deteção de possíveis pontos de singularidade;
- Verificação tridimensional de trajetórias;

- Detecção de colisões;
- Verificação da aplicabilidade na célula real;
- Implementação direta dos programas gerados na célula real.

Quanto à utilização do RobotStudio para a programação de células robóticas, é de salientar três funcionalidades essenciais para a sua obtenção: criação de sistemas de coordenadas; definição de pontos, *targets*; definição de percursos, *paths*. Os sistemas de coordenadas no RobotStudio possuem uma estrutura hierárquica, onde cada sistema de coordenadas é definido em relação a um referencial antecessor. A correta definição dos sistemas de coordenadas é essencial para a obtenção da programação do robô. A criação de um *target* é a definição de uma localização no espaço que o robô deve atingir. Um *path* é constituído por um conjunto de *targets* que o robô deve percorrer segundo uma determinada ordem sequencial. Assim um *path* é constituído por uma sequência de instruções de movimentos que permitem mover o robô entre vários *targets*. A compreensão destes termos é crucial para uma correta programação do robô e uma fácil implementação na célula real.

Posto isto, a criação dos percursos de maquinagem no RobotStudio requerem a criação de uma célula robótica, em ambiente virtual, que representa a célula real a ser utilizada. Na Figura 3.1, é apresentada a célula criada à semelhança da célula robótica existente no Laboratório de Robótica do DEMec com o robô ABB IRB 2400.

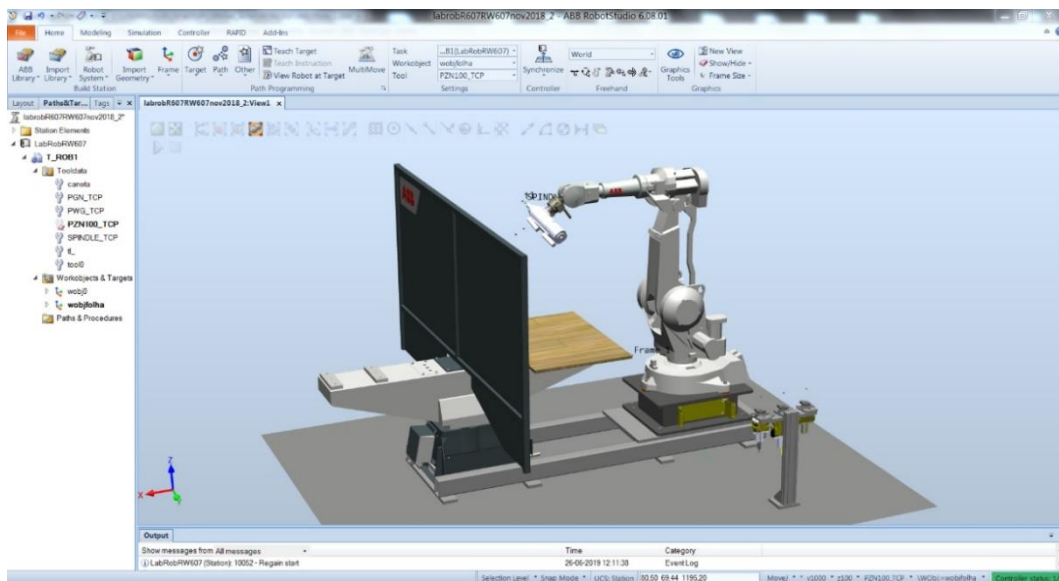


Figura 3.1 - Modelo digital da célula robótica do Laboratório de Robótica do DEMec.

Tendo a célula definida, é necessário a importação da peça com os padrões de furos para depois serem definidos os *targets* e os *paths* que representam as operações de furação. Os *paths*, para além de se poderem definir segundo um conjunto de *targets*, podem ser definidos automaticamente segundo uma aresta de um objeto ou uma curva.

Depois de analisadas as capacidades de criação de trajetórias utilizando o RobotStudio foi identificado que não é o método mais expedito para a geração de percursos de maquinagem. Para cada furo é necessário determinar o centro do furo e a sua orientação, definir os movimentos de avanço e recuo durante a operação de furação e os movimentos entre furos. No caso de o furo não poder ser realizado com apenas uma passagem da ferramenta é necessário

definir *targets* intermédios e os percursos de avanço e recuo entre esses pontos. A definição de todos estes movimentos tem de ser realizada manualmente, sendo que uma peça pode ter um número elevado de furos, o que torna o processo demorado e de difícil obtenção. Não possibilitando uma programação expedita dos percursos será avaliada a utilização de um software CAM para a criação dos percursos de maquinaria.

3.2 Programação com Mastercam

Com o desenvolvimento de máquinas ferramenta de comando numérico (CN/CNC) por parte de diferentes produtores surgiu a necessidade de normalizar a linguagem de programação utilizada. Como tal, foi adotado o padrão ISO 6983, também conhecido por códigos G, como linguagem de programação de máquinas CNC, o que levou ao surgimento de inúmeros programas CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) que facilitam a geração de percursos de maquinaria independentemente da geometria da peça. O desenvolvimento conjunto destes softwares CAM e os softwares de programação de sistemas robóticos possibilitou a interação entre os dois, permitindo obter códigos de programação de robôs referentes a percursos de maquinaria obtidos através de softwares CAM. Neste trabalho foi analisada a utilização do software CAM, Mastercam, e do seu *add-on*, Robotmaster, para a obtenção de programas na linguagem do robô.

O Mastercam é um software CAD/CAM desenvolvido pela CNC software Inc. (www.Mastercam.com), fundada em 1983. Trata-se de um dos softwares CAD/CAM mais utilizados no mundo, tendo por isso aplicações em diversas áreas como a área de moldes, prototipagem, automóvel, aeronáutica, médica e de produtos de consumo. Este software é estruturado em módulos, de modo a ser configurável de acordo com o tipo de aplicação. Oferece suporte para vários tipos de máquinas, com diferentes níveis de funcionalidades, e módulos opcionais para maquinaria em 4 e 5 eixos. Os níveis de funcionalidades determinam as operações possíveis de se realizarem. Com este tipo de estrutura, a utilização do Mastercam pode ser direcionada para uma aplicação em específico, sendo o utilizador a decidir as funcionalidades que necessita.

As funcionalidades CAD do Mastercam permitem a criação de desenhos 2D e 3D (Figura 3.2). A modelação 3D deste software é semelhante ao SolidWorks, obtém-se formas tridimensionais por operações de extrusão de desenhos 2D anteriormente criados, contudo apresenta-se mais limitado e a obtenção de formas complexas não é tão expedita como num software específico para CAD. Também possui funcionalidades de análise de entidades geométricas, determinação da localização de entidades e medição de distâncias. Uma funcionalidade importante do Mastercam é a capacidade de importação/exportação de modelos de peças em diversos formatos (SolidWorks, ACIS, STEP, IGES, entre outros), possibilitando a criação de modelos mais complexos em softwares específicos de CAD.

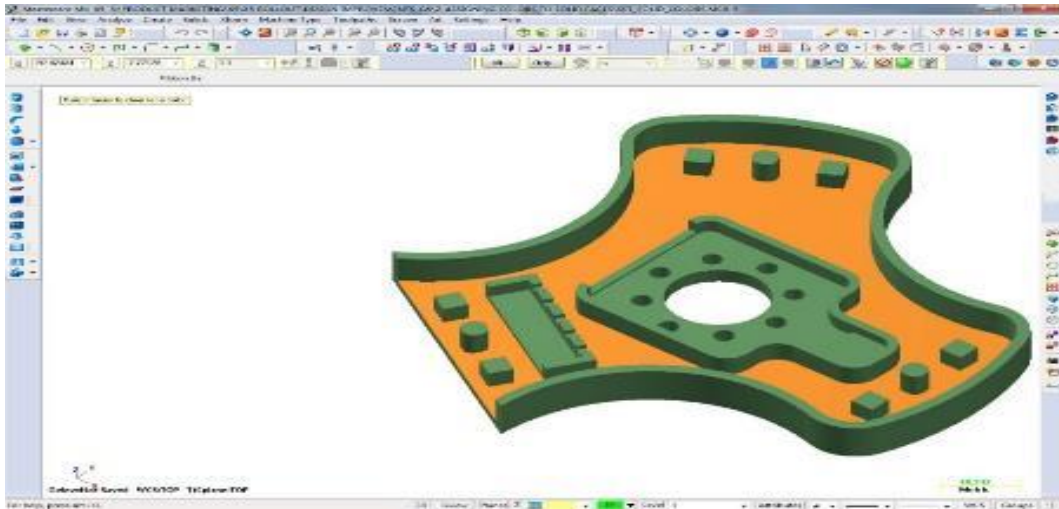


Figura 3.2 - Exemplo de uma peça 3D obtida no Mastercam [19].

Quanto às funcionalidades CAM, o Mastercam permite a seleção de módulos específicos para determinadas máquinas, como fresadoras, tornos, máquinas de eletroerosão, máquinas para maquinagem em madeira, máquinas multi-eixos e um módulo específico para design. Após selecionar o tipo de máquina, o Mastercam oferece uma variedade de operações referentes ao módulo selecionado, como desbaste, furação, contorno, facejamento, abertura de *pockets*, acabamento, operações multi-eixos, entre outras. Selecionada a operação pretendida é necessário definir a ferramenta e os parâmetros de maquinagem específicos dessa operação.

O Mastercam, para além de definir os percursos de maquinagem, permite a simulação desses percursos, sendo possível visualizar, em ambiente virtual, a peça, os percursos de maquinagem e a ferramenta. Esta funcionalidade tem como interesse a determinação da exequibilidade dos percursos e a deteção de possíveis colisões entre a máquina e a peça. Na Figura 3.3, é ilustrada a simulação de uma operação de furação no Mastercam.

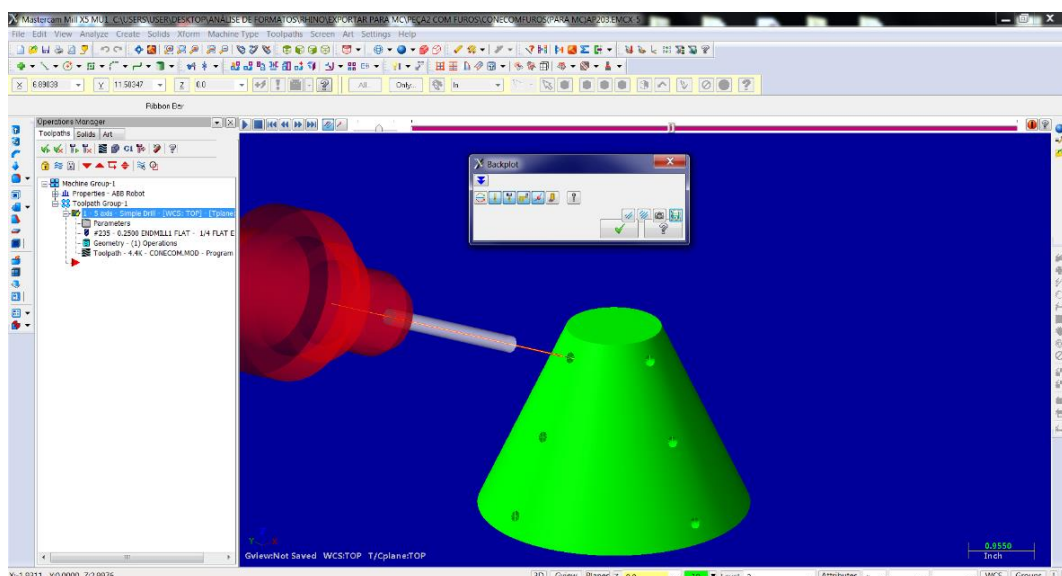


Figura 3.3 - Simulação de uma operação de furação no Mastercam.

O Mastercam permite, tal como outros sistemas de CAM, a geração de programas de CN para máquinas através da utilização de programas de conversão específicos para cada máquina (pós-processadores).

Para a programação de robôs, o Mastercam possibilita o pós-processamento dos códigos gerados para linguagem de vários fabricantes de robôs, como a FANUC, ABB, STÄUBLI e KUKA, através do *add-on* Robotmaster. Este *add-on*, para além do pós-processamento do código gerado para diferentes linguagens de programação de robôs, permite a simulação e validação dos percursos. Na geração dos percursos de maquinagem utilizando o Robotmaster, é necessária a configuração do sistema robótico. Esta configuração divide-se em 2 passos:

- Configuração Global – Definição do robô e da ferramenta a utilizar, especificação da localização da peça em relação ao robô e ajuste dos parâmetros da ferramenta e do movimento;
- Configuração Local – Configuração da orientação da ferramenta, validação dos percursos e definição, se existente, de um eixo externo (linear ou rotativo).

Configurada a orientação da ferramenta, a validação do percurso de maquinagem é realizada através da opção *Optimization*, onde numa janela são apresentadas zonas coloridas referentes a zonas de singularidades, zonas não atingíveis pelo robô, limites das juntas, zonas de colisão durante a execução das trajetórias e uma linha representativa do percurso. Esta linha é ajustável pelo utilizador. Na Figura 3.4, pode-se observar a validação de uma trajetória evitando as zonas amarelas (a cor amarela simboliza o limite das juntas). A validação é confirmada quando a linha ajustável se torna verde.

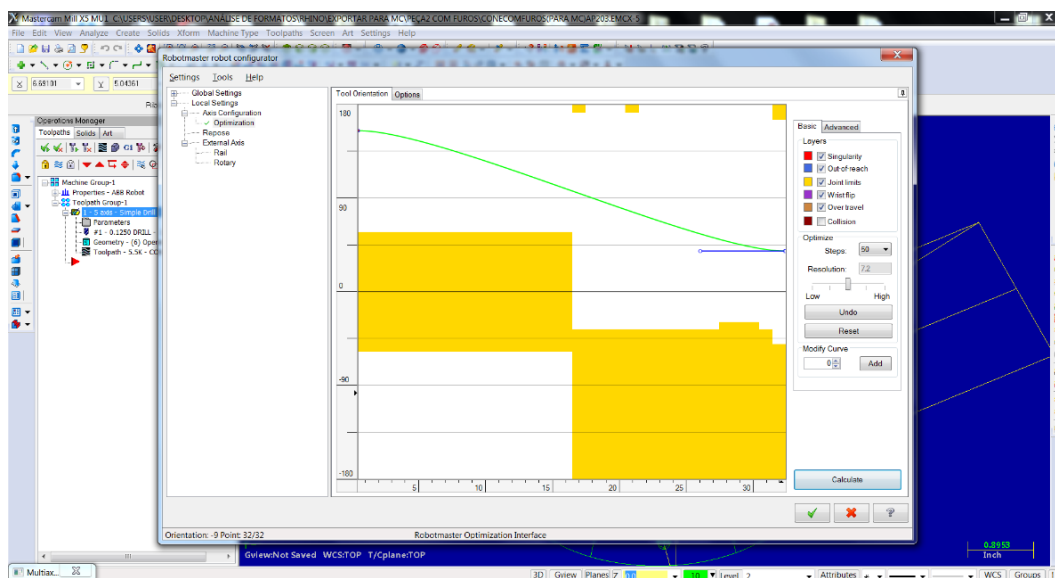


Figura 3.4 - Validação de um percurso de maquinagem através da opção *Optimization* no Robotmaster.

Tendo concluído todas as opções de configuração e validado as trajetórias percorridas pelo robô é possível através do Robotmaster simular os percursos gerados. Nesta simulação é possível ver o robô e a ferramenta selecionada, a peça e as trajetórias do TCP (*Tool Center Point*). Na Figura 3.5, é ilustrado um exemplo de simulação através do Robotmaster. Durante a simulação é possível ver o código referente aos movimentos efetuados e a variação dos ângulos das juntas do robô.

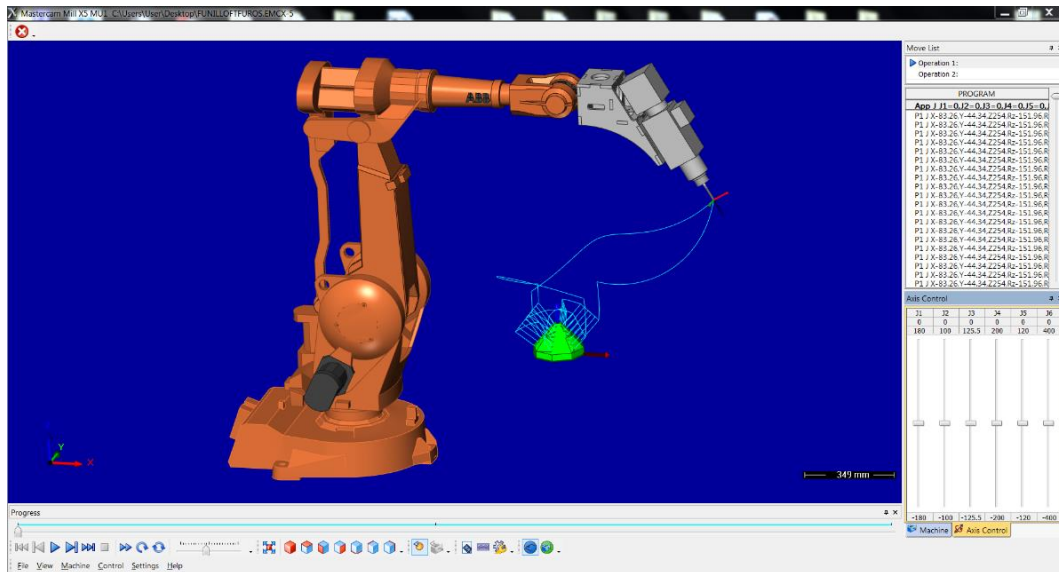


Figura 3.5 - Simulação de percursos de maquinagem efetuados por um robô no Robotmaster.

O pós-processador do Robotmaster, após validar os percursos, gera um programa na linguagem do robô selecionado. Neste programa para além das instruções dos movimentos está definida a localização do referencial da peça (*Work Object Data*) e a informação da ferramenta (*Tool Data*). Depois de gerado o código, este pode ser copiado diretamente para um software de programação offline de um robô para uma segunda validação dos percursos de maquinagem ou diretamente para o controlador do robô. Na Figura 3.6, é apresentado um programa em linguagem Rapid gerado pelo Robotmaster.

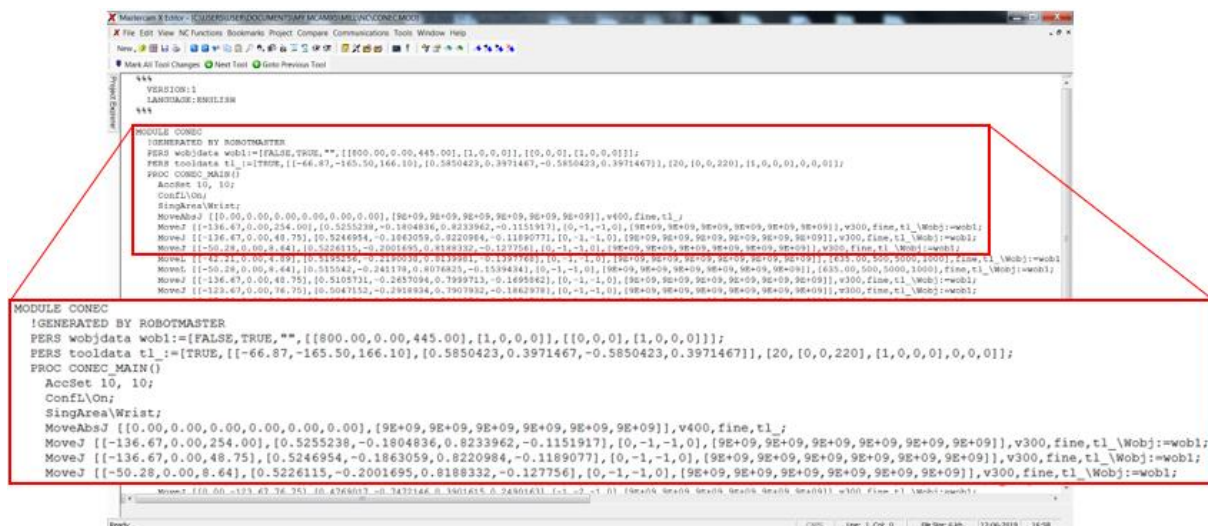


Figura 3.6 - Código, em linguagem Rapid, gerado pelo pós-processamento do programa de comando numérico.

Para a programação de percursos de maquinagem que envolvem um número elevado de furos, a utilização de um software de CAM (Mastercam) com pós-processador para manipuladores robóticos (Robotmaster) revelou-se como sendo o processo mais expedito e versátil.

No procedimento elaborado para a obtenção dos percursos de maquinagem, o modelo da peça com o padrão de furos é importado para o Mastercam no formato STEP. Após a importação da peça é necessária a seleção do módulo da máquina a utilizar, neste caso o robô. Após esta seleção é escolhida a opção “maquinagem de múltiplos eixos”, tendo em consideração que o padrão de furos poderá requerer múltiplas orientações relativamente à superfície das peças.

Após selecionar o tipo, é necessário definir a operação de maquinagem e os parâmetros associados a essa operação. Na Figura 3.7, é apresentada a janela de seleção do tipo de operação e os parâmetros a definir para a “maquinagem de múltiplos eixos”.

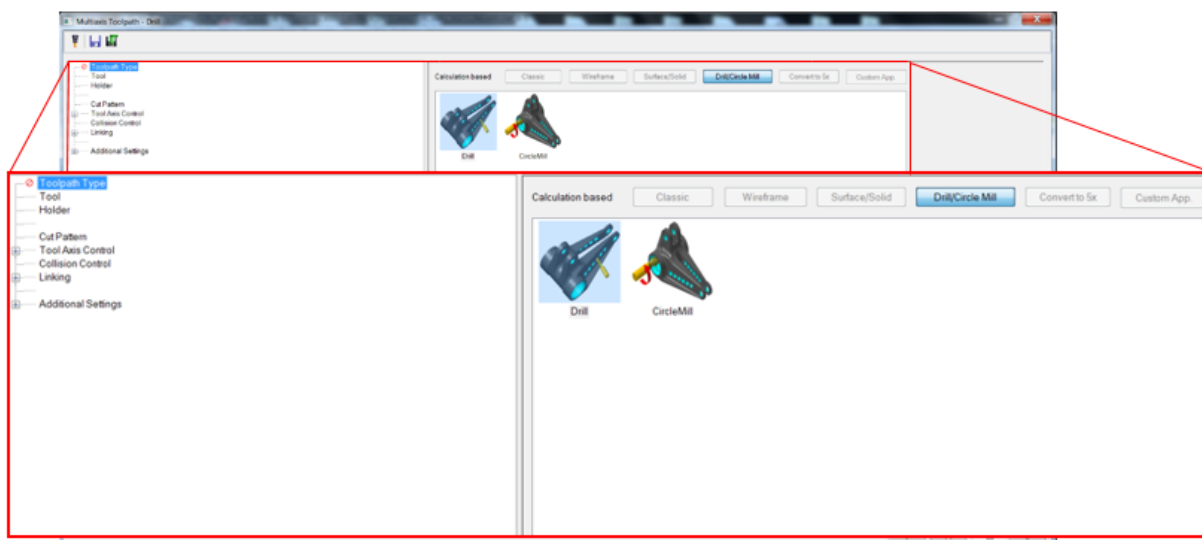


Figura 3.7 - Janela de seleção de operação e definição dos parâmetros de maquinagem.

As operações disponíveis são a fresagem (com diferentes tipos de definição, desde fresagem através da seleção de uma superfície, de múltiplas superfícies, segundo uma curva, entre outras) e a furação. Quanto à operação de furação é possível selecionar dois tipos: *Drill*, referente a operação tradicional de furação; *CircleDrill*, referente a obtenção de furos circulares através de fresagem. A operação utilizada neste trabalho é a operação *Drill*, cujos parâmetros a definir são os seguintes:

- Ferramenta a utilizar;
- Localização dos furos;
- Eixo da ferramenta durante a operação;
- Parâmetros de aproximação da ferramenta à peça.

Para além destes parâmetros é possível definir, se necessário, um suporte para a ferramenta. A seleção da ferramenta é feita a partir de uma biblioteca, para cada uma são apresentadas as suas dimensões e parâmetros de maquinagem, como a velocidade de avanço e velocidade de rotação, que podem ser alterados pelo utilizador (Figura 3.8). A velocidade de avanço no Mastercam é estipulada em mm/min, contudo no RobotStudio é estipulada em mm/s. Ao gerar o programa na linguagem de programação do robô não é efetuada uma conversão das unidades, pelo que se torna necessário considerar esta diferença durante a definição da velocidade no Mastercam.

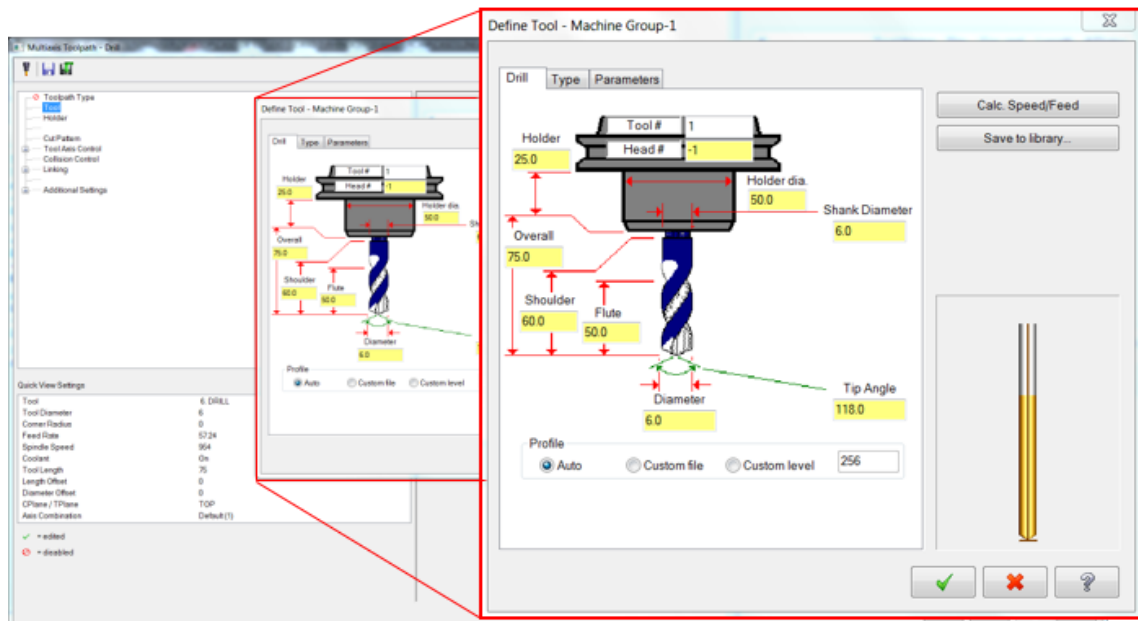


Figura 3.8 - Dimensões geométricas da ferramenta e parâmetros de maquinagem.

A localização dos furos pode ser definida de duas formas:

- Ponto - Requer a seleção do centro do furo;
- Ponto/Linha - Requer a seleção do centro do furo e de uma linha com a orientação do furo e passante no centro desse furo.

Na definição da localização dos furos é ainda possível definir o tipo de furo (se é obtido com uma passagem da ferramenta ou se a ferramenta faz várias passagens até obter a profundidade desejada). O método utilizado para definir a localização do furo foi a seleção do seu centro. Para determinar o centro, o Mastercam é capaz de identificar automaticamente o centro de um círculo, contudo foi verificado que o software não identifica o centro de círculos projetados em superfícies curvas (situação recorrente neste trabalho). A solução para este problema foi a criação de pontos nos centros dos furos, durante a modelação da peça, e a importação para o Mastercam desses pontos no modelo da peça. Como foi discutido no Capítulo 2, o Rhinoceros permite a criação desses pontos, e a sua importação é possível no formato STEP. Assim a definição dos centros dos furos passa pela seleção dos pontos importados. Esta solução apresenta uma vantagem que é a possibilidade de selecionar todos os pontos de uma só vez através da opção *Window Points*, tornando-se numa operação eficiente e expedita (Figura 3.9).

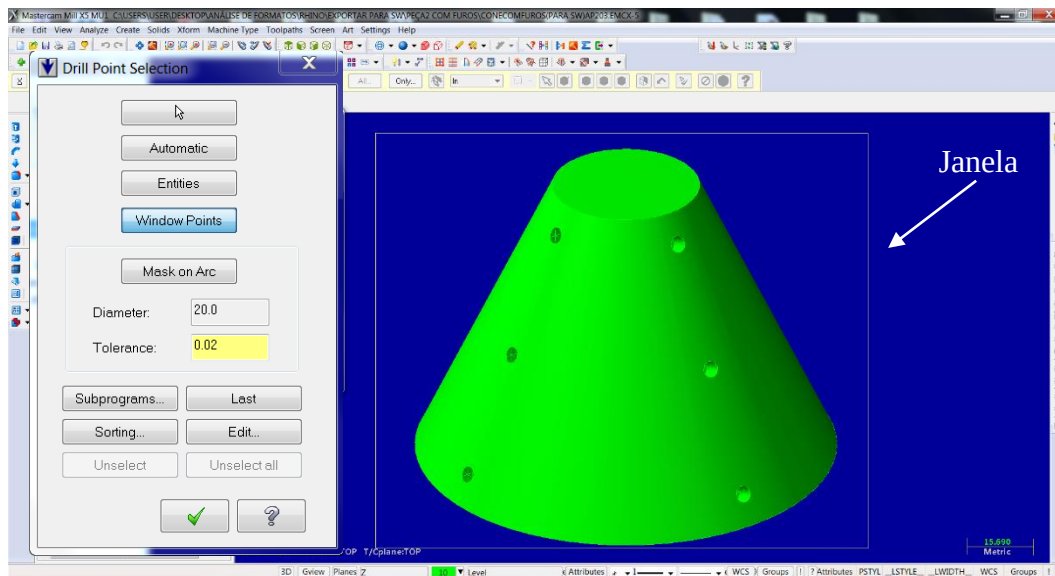


Figura 3.9 - Seleção dos centros dos furos através da opção *Window Points*.

Durante a seleção dos pontos, o Mastercam permite a definição da ordem sequencial das operações de furação (*Sorting*). O tipo de ordem define a ordem dos pontos onde serão realizadas as operações de furação, sendo que o Mastercam disponibiliza três tipos:

- *2D sort* - ordem utilizada quando os pontos se encontram distribuídos numa superfície plana;
- *Rotary sort* - ordem para padrões circulares;
- *Cross sort* - ordem utilizada quando os pontos se encontram distribuídos numa superfície cilíndrica.

O tipo de ordem utilizado é dependente da geometria da peça, pelo que a escolha é decidida tendo em conta o modelo da peça a maquinar.

Para a definição do eixo da ferramenta durante a operação de furação são disponibilizadas três opções:

- Paralelo a uma linha - necessária a seleção de uma linha com a orientação do furo;
- Superfície - requer a seleção de uma superfície perpendicular à orientação do furo (o eixo da ferramenta torna-se normal à superfície selecionada);
- Plano - requer a seleção de um plano perpendicular ao eixo do furo.

Ainda nesta secção é necessário definir o número de eixos da máquina, entre 3 a 5 eixos, sendo selecionada a opção de 5 eixos, uma vez que vai ser utilizado um robô industrial. O modo de definição do eixo da ferramenta utilizado foi o modo *Surface*, o que possibilita a seleção da superfície que contém o padrão de furos, definindo o eixo da ferramenta como normal à superfície em todos os pontos selecionados (Figura 3.10).

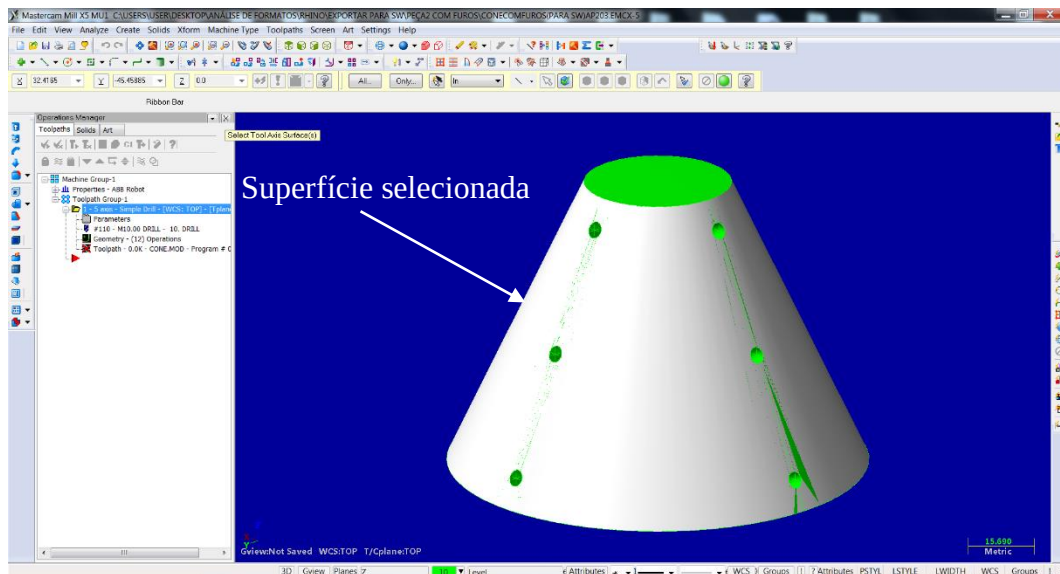


Figura 3.10 - Seleção da superfície no Mastercam para definição da orientação da ferramenta.

Deste modo, a seleção dos furos e a definição dos percursos de maquinagem torna-se num processo de rápida execução, requerendo a seleção de todos os centros dos furos e a seleção da superfície que contém todo o padrão de furos em dois passos. Realizada esta definição ainda é possível definir os parâmetros de aproximação da ferramenta à peça. Aqui podem ser definidas as distâncias a que a ferramenta se movimenta da peça entre as localizações dos furos. Após ter definidos todos os parâmetros, o Mastercam gera os percursos de maquinagem e apenas é necessário configurar os parâmetros do Robotmaster (*Global Configuration* e *Local Configuration*) e validar os percursos obtidos.

Nos parâmetros globais é necessário definir-se o robô, a ferramenta a utilizar, o referencial da peça em relação ao robô e os parâmetros do movimento (tipo de movimento e velocidade). Para a seleção da ferramenta, a biblioteca de ferramentas do Robotmaster não possui a ferramenta (*spindle*) presente no Laboratório de Robótica, pelo que é necessária uma definição manual. Os valores utilizados foram obtidos experimentalmente a partir da célula robótica. A localização do referencial da peça é definida tendo em conta a célula robótica, onde existe uma mesa rotativa para a fixação das peças.

Definidos os parâmetros globais, é necessário passar à definição dos parâmetros locais. Aqui procede-se à configuração do eixo da ferramenta. Foi definida a inexistência de rotação segundo o eixo da ferramenta durante a operação de furação. De seguida pode-se validar o percurso obtido e gerar o respetivo programa Rapid.

3.3 Validação no RobotStudio

Depois de validado o percurso no Robotmaster podemos gerar o programa Rapid referente aos percursos de maquinagem e transferi-lo para o RobotStudio para uma validação final. Como referido anteriormente, o programa gerado não necessita de alterações para ser aplicado no RobotStudio. A Figura 3.11, apresenta um programa gerado pelo Robotmaster copiado para o ambiente de programação do RobotStudio.

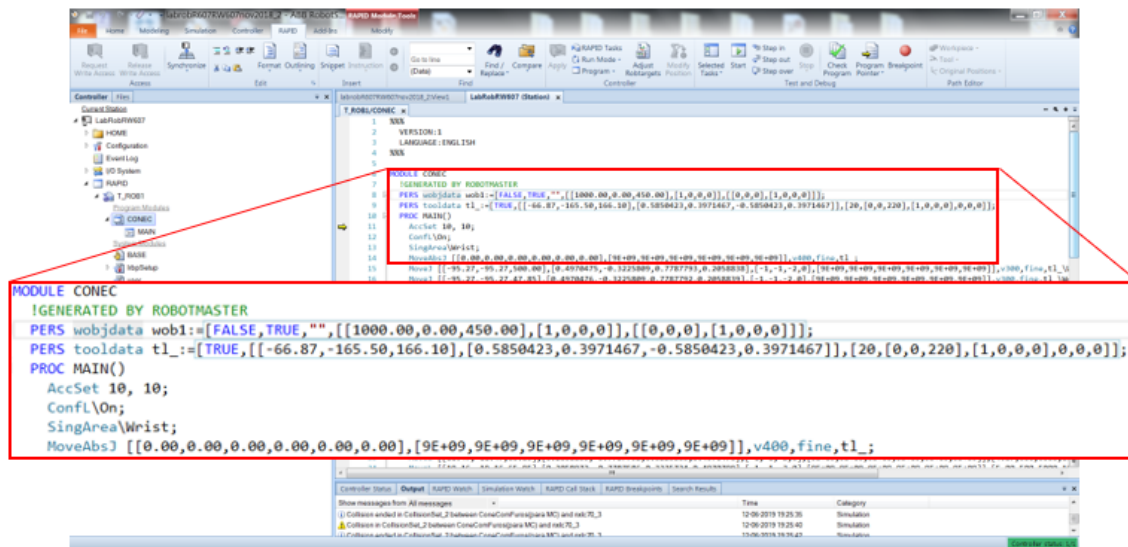


Figura 3.11 - Programa Rapid, obtido através do Robotmaster, no ambiente de programação do RobotStudio.

Após a transferência do programa para o RobotStudio é possível verificar a existência de erros. Verificada a inexistência de erros no código estamos em condições de sincronizar o programa para a estação da célula robótica e simular os percursos de maquinagem. De modo a validar as trajetórias executadas pelo robô é necessário ter na estação do RobotStudio o modelo da célula robótica que se pretende utilizar e o modelo da peça a maquinar. O modelo da peça pode ser importado em vários formatos, tendo sido utilizado o formato ACIS. Na Figura 3.12, é ilustrada a célula robótica e a peça a maquinar. As linhas vermelhas representam o percurso realizado pelo TCP.

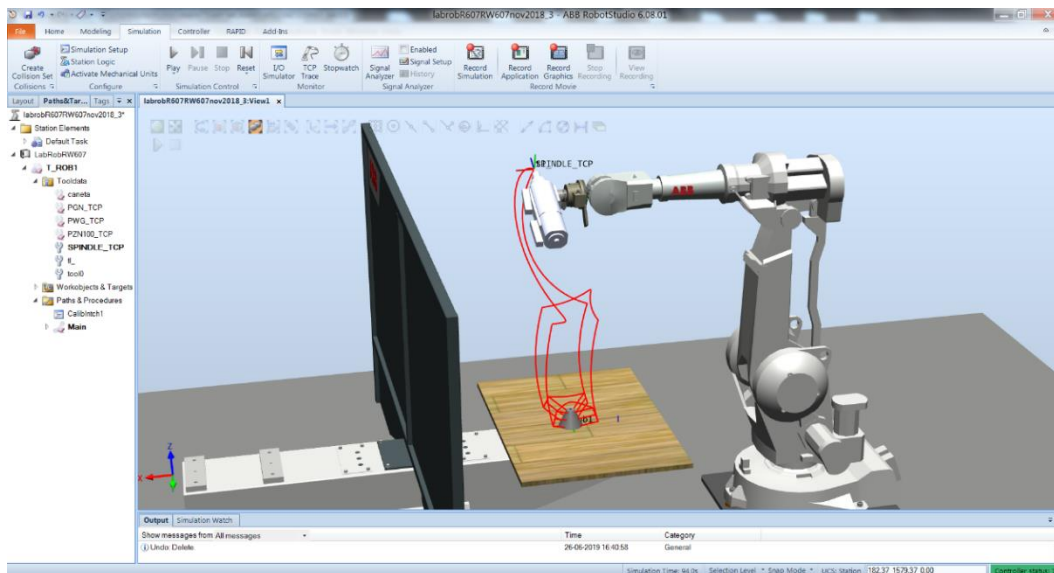


Figura 3.12 - Simulação dos percursos de maquinagem no RobotStudio.

Para determinar a existência de colisões, o RobotStudio permite a seleção de dois objetos para análise durante a simulação dos movimentos. A colisão entre os dois objetos é representada pela mudança de cor dos objetos para vermelho. Assim para a validação dos percursos de maquinagem pode-se determinar se o *spindle* fixado no braço do robô não colide com nenhum objeto (mesa de suporte, peça). Verificada a exequibilidade do programa Rapid e determinada a inexistência de colisões estamos aptos a implementar os percursos de maquinagem numa célula robótica real.

3.4 Conclusões

Através da análise das possibilidades de programação de um sistema robótico, foi possível concluir que a programação online e a programação offline no software de programação e simulação do robô não são soluções adequadas para a programação de percursos de maquinagem. A utilização de um software CAD/CAM com capacidade de gerar códigos na linguagem de programação do robô (Mastercam/Robotmaster) demonstrou ser a solução mais expedita e versátil para a obtenção de percursos de maquinagem. Isto deve-se à sua capacidade de configuração e rápida obtenção de trajetórias complexas referentes às operações de maquinagem. O Robotmaster aliado ao Mastercam permite a geração de códigos em linguagem de programação de vários robôs. A utilização do RobotStudio demonstrou ser fundamental para a validação das operações de maquinagem, obtendo-se uma simulação realista dos percursos gerados.

Depois de obter uma solução para a incorporação de padrões de furos em peças e para a obtenção de percursos de maquinagem podemos definir um procedimento para a obtenção de peças singulares através de furação robotizada. Este procedimento envolve múltiplos aspetos, desde a criação do modelo digital da peça inicial até à geração e validação dos percursos de maquinagem para a obtenção da peça final. Na Figura 3.13, é ilustrado na forma de esquema o procedimento obtido.

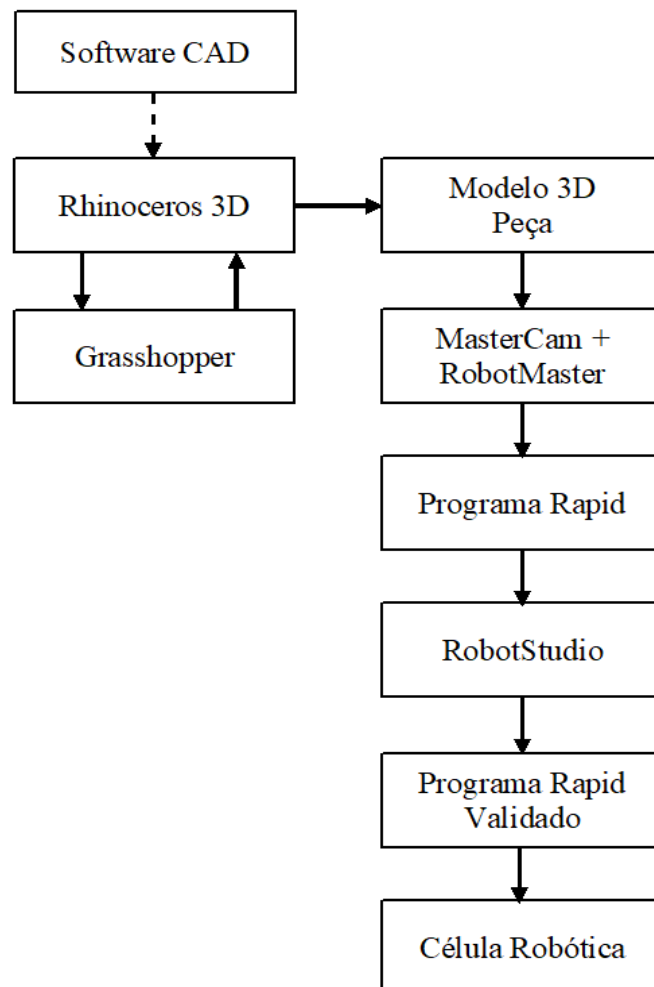


Figura 3.13 - Procedimento para a obtenção de peças singulares através de furação robotizada.

4 Casos de estudo

Neste capítulo é realizada uma análise à implementação da metodologia proposta em modelos de peças. A análise engloba a criação do modelo digital da peça, a obtenção dos percursos de maquinagem, com recurso ao Mastercam/Robotmaster, e a validação dos percursos gerados no RobotStudio. As soluções definidas são testadas em modelos obtidos em dois softwares CAD (Rhinoceros e SolidWorks), é analisada a incorporação de dois padrões de furos distintos (padrão linear e padrão aleatório) e é testada a variação do número de furos incorporados em cada caso de estudo. Desta forma, para além de se poderem considerar as particularidades em peças de geometria diferente, podemos averiguar de que forma a origem da peça, o tipo de padrão e o número de furos influenciam os resultados obtidos.

4.1 Introdução

O procedimento definido para a obtenção de peças singulares através de furação robotizada foi testada em 3 casos. Os casos são caracterizados por peças distintas:

- Caso 1: Peça com superfície cónica;
- Caso 2: Peça cilíndrica com superfície ondulada;
- Caso 3: Pannel com superfície irregular (peça de design).

A análise teve como objetivo validar o procedimento proposto tendo como variáveis: a origem do modelo (SolidWorks ou Rhinoceros); o padrão de furos incorporado (linear ou aleatório) e o número de furos incorporados. Obtiveram-se os diferentes modelos e procedeu-se à obtenção dos percursos de maquinagem com a variação dos diferentes parâmetros. Validado o procedimento na obtenção dos percursos com o Mastercam, foi realizada uma validação dos programas no RobotStudio com a simulação da célula robótica real. Na Tabela 5, estão resumidos os diferentes modelos gerados para cada caso de estudo.

Tabela 5 – Modelos gerados para cada caso de estudo.

Peça	Origem do modelo		Padrão		Número de furos		
	Rhinoceros	SolidWorks	Linear	Aleatório	6	30	60
Caso 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Caso 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Caso 3	✓		✓	✓		✓	

Obtidos os modelos das peças, foi aplicado o procedimento proposto para a obtenção dos percursos de maquinagem no Mastercam. Em cada modelo (Rhinoceros e SolidWorks) foi

incorporado o padrão linear e aleatório de furos com diferente número de furos e testada a obtenção dos percursos de maquinagem. O modelo do Caso 3 foi definido apenas no Rhinoceros devido a tratar-se de uma peça de design.

A validação dos percursos no RobotStudio foi realizada para apenas dois modelos de cada caso de estudo, referentes ao modelo com o padrão linear e o padrão aleatório de furos, com 30 furos. Na Tabela 6, é apresentado o número total de modelos analisados no Mastercam e no RobotStudio para cada caso de estudo.

Tabela 6 – Número de modelos analisados no Mastercam e no RobotStudio.

Peça	Total de casos analisados no MasterCam	Total de casos validados no RobotStudio
Caso 1	12	2
Caso 2	12	2
Caso 3	2	2

4.2 Caso 1

No primeiro caso de estudo, foi criado o modelo de uma peça real, de formato cónico. A escolha desta peça teve por base a sua disponibilidade para a implementação dos percursos de maquinagem na célula robótica real. A peça foi modelada no software SolidWorks e Rhinoceros, seguindo um procedimento semelhante, partindo de uma definição em 2D e realizando uma operação de extrusão para obtenção da forma tridimensional. Na Figura 4.1 e Figura 4.2, são ilustrados os modelos obtidos em Rhinoceros e SolidWorks, respetivamente.

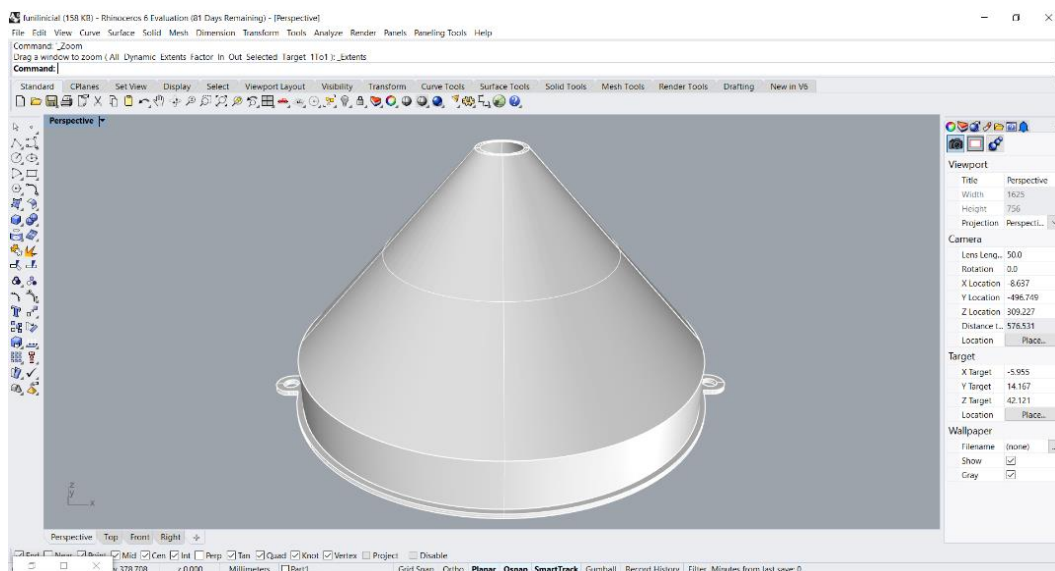


Figura 4.1 – Modelo da peça do Caso 1 obtido no Rhinoceros.

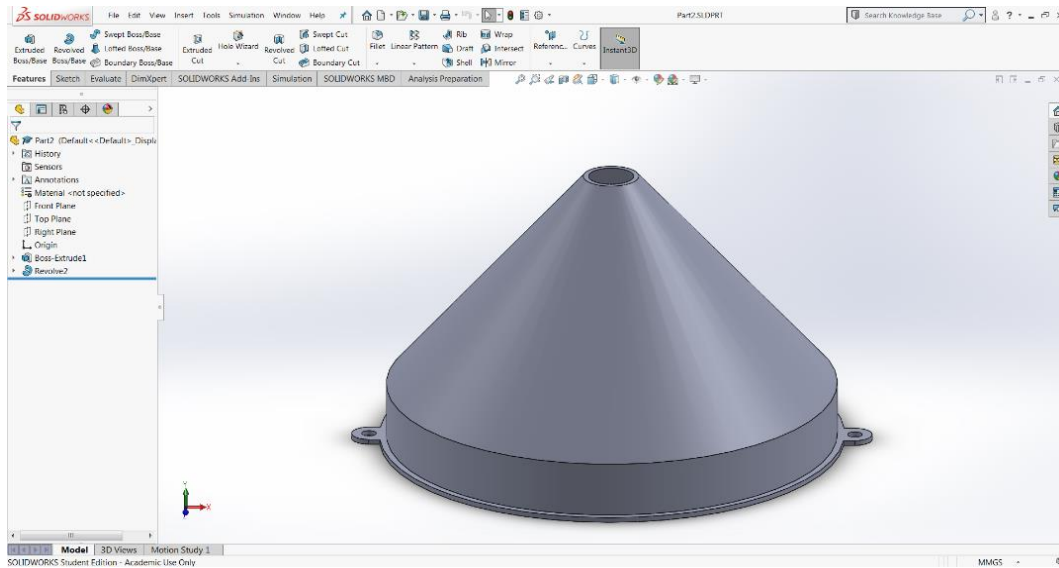


Figura 4.2 - Modelo da peça do Caso 1 obtido no SolidWorks.

De entre os dois softwares utilizados, na obtenção do modelo da peça não se observou nenhuma diferença significativa, tanto a nível de dificuldade de modelação como no tempo necessário para a sua criação. Contudo, depois de obtido o modelo da peça, no caso do SolidWorks, é necessário exportar o ficheiro para o Rhinoceros, enquanto o modelo criado no Rhinoceros está pronto a ser utilizado na incorporação dos padrões. O modelo do SolidWorks foi exportado para o Rhinoceros no formato SolidWorks (.sldparts).

Depois de importado o modelo do SolidWorks para o Rhinoceros, foi analisada a sua representação, de modo a determinar diferenças em relação ao modelo criado diretamente no Rhinoceros. Ambos os modelos são representados como *closed solid polysurface*, contudo o modelo criado no SolidWorks apresenta para a mesma *polysurface* um maior número de superfícies (*polysurface* é um conjunto de superfícies). Esta diferença será notada na incorporação dos padrões de furos. Na Tabela 7, são apresentadas as diferenças dos modelos obtidos, observadas no Rhinoceros.

Tabela 7 – Modelos do Caso 1: nº de superfícies observadas no Rhinoceros.

Origem do modelo	Representação no Rhinoceros	Número de superfícies
Rhinoceros	<i>Closed Solid PolySurface</i>	13
SolidWorks	<i>Closed Solid PolySurface</i>	23

Obtidos os modelos, segue-se a incorporação do padrão de furos. Como padrões teste, foi optado pela incorporação de um padrão linear, em forma de grelha, e de um padrão aleatório, ambos com o mesmo número de furos (30 furos).

Na incorporação dos padrões, como os modelos da peça são representados como um único objeto, é necessário o uso do bloco *Deconstruct Brep* para selecionar a superfície desejada (superfície cónica). Depois de selecionada a superfície foram incorporados os dois padrões de furos.

O padrão linear foi criado utilizando o bloco *Divide Surface*. Este bloco tem como função a divisão de uma superfície segundo linhas e colunas. Para tal, tem como entradas a superfície que se pretende dividir, o número de linhas e o número de colunas. Como saída, este bloco fornece os pontos correspondentes à interseção das linhas com as colunas e o vetor

perpendicular à superfície nesses pontos. Assim, alterando o número de linhas e colunas é possível obter várias configurações distintas do mesmo padrão. Os pontos obtidos são utilizados para definir o centro dos furos e o vetor é utilizado para a definição da orientação do furo. Na Figura 4.3, é apresentado o bloco *Divide Surface*.

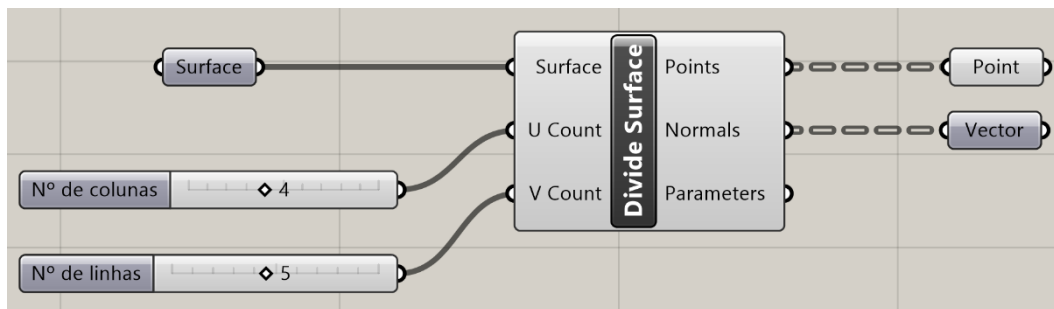


Figura 4.3 – Bloco *Divide Surface* utilizado para a geração do padrão linear.

Na Figura 4.4, é apresentado em forma de esquema o procedimento no Grasshopper para a obtenção do modelo com o padrão linear de furos, destacando-se as variáveis de entrada.

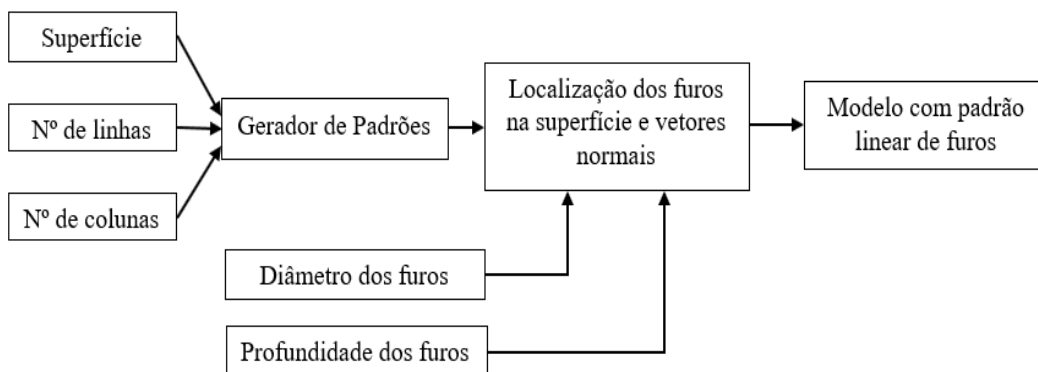


Figura 4.4 – Esquema da incorporação do padrão linear de furos.

O padrão aleatório foi criado utilizando o bloco *Populate Geometry*. Este bloco gera de forma aleatória pontos sobre uma geometria selecionada. Como entrada, este bloco tem a geometria na qual se pretende criar os pontos, o número de pontos e uma variável inteira à qual é associado uma configuração aleatória de pontos. A alteração da variável permite gerar distintos padrões aleatórios. Definidas as entradas, o bloco fornece como saída os pontos gerados. Como este bloco não fornece o vetor normal à superfície nos pontos gerados, é necessário, com recurso a blocos de análise geométrica, determiná-lo para depois poderem-se definir os furos. Na Figura 4.5, é apresentado o bloco *Populate Geometry*.

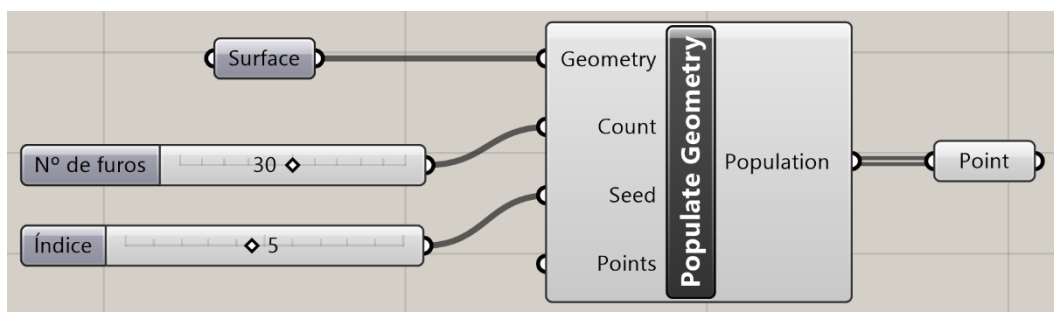


Figura 4.5 – Bloco *Populate Geometry* utilizado para a geração do padrão aleatório.

Na Figura 4.6, é apresentado um esquema sobre o procedimento efetuado para a obtenção do modelo com o padrão aleatório de furos.

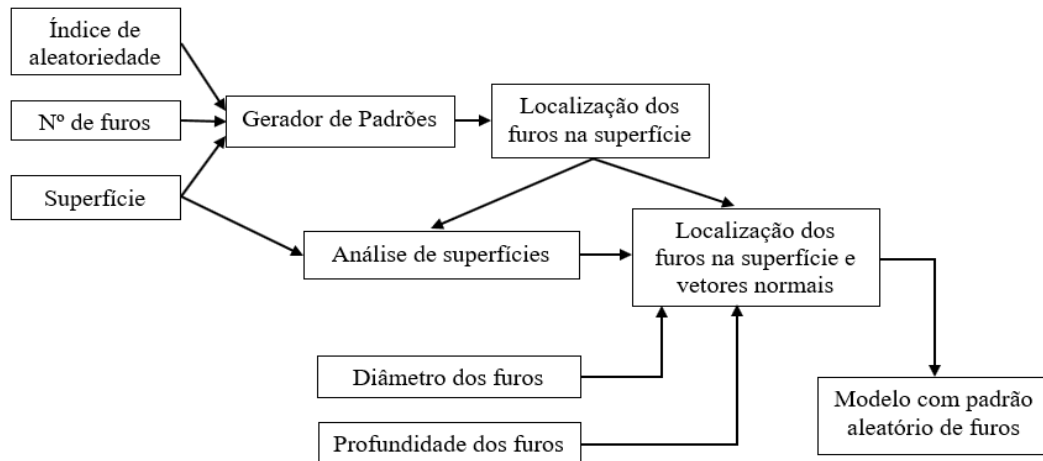


Figura 4.6 - Esquema da incorporação do padrão aleatório de furos.

Na Figura 4.7 e na Figura 4.8, são apresentados os modelos da peça obtidos após a incorporação dos padrões de furos.

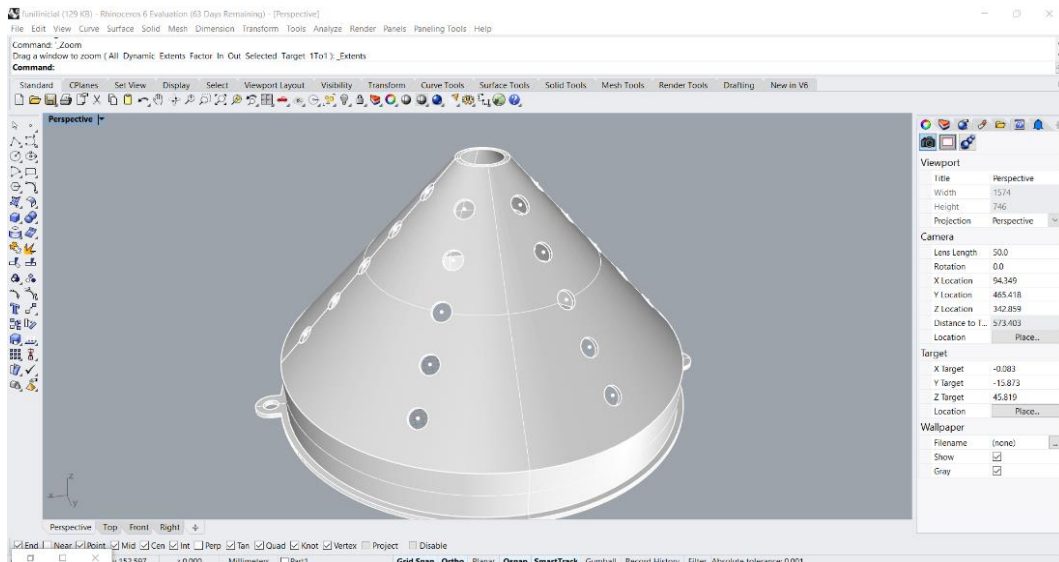


Figura 4.7 - Modelo do Caso 1 (obtido no Rhinoceros) após a incorporação dos padrão linear de furos.

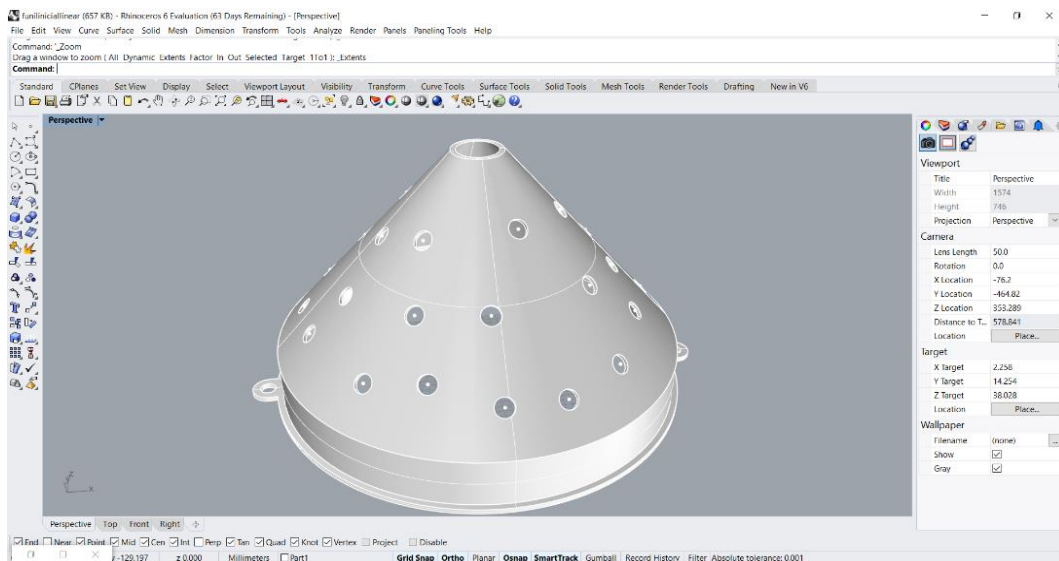


Figura 4.8 - Modelo do Caso 1 (obtido no Rhinoceros) após a incorporação dos padrão aleatório de furos.

Foi observado que no modelo gerado pelo SolidWorks após a utilização do bloco *Deconstruct Brep* a superfície cônica da peça é dividida em duas superfícies, o que requer a seleção de ambas para a incorporação dos mesmos padrões incorporados no modelo obtido pelo Rhinoceros. A diferença nos modelos obtidos pelos dois softwares CAD (diferente número de superfícies) é visível nesta etapa, o modelo obtido pelo SolidWorks é representado por um maior número de superfícies o que se traduz numa divisão de superfícies enquanto que no modelo obtido pelo Rhinoceros são apresentadas como uma só superfície. Na Figura 4.9, é ilustrada esta divisão da superfície.

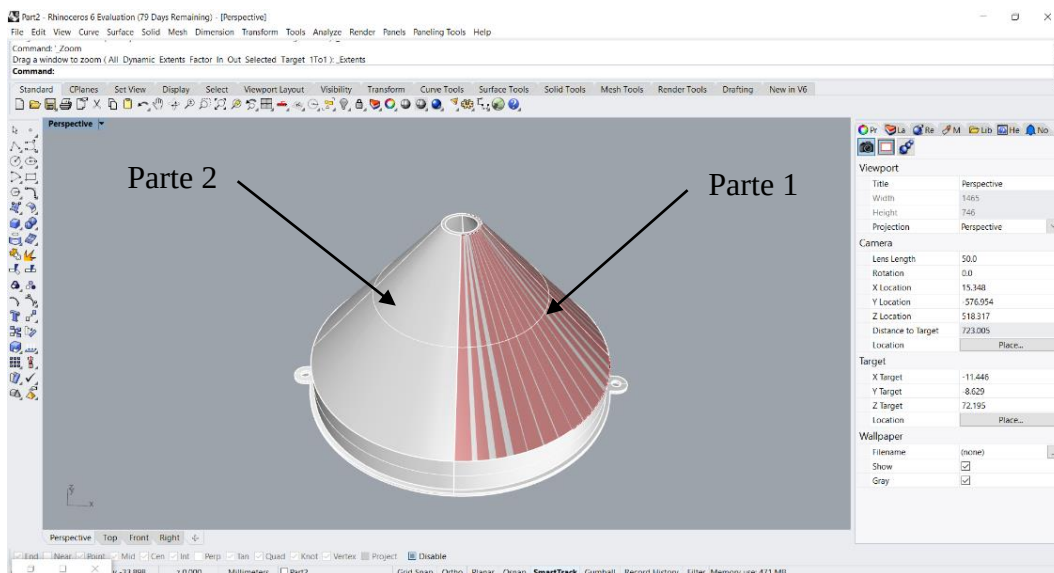


Figura 4.9 - Superfície cônica do modelo do Caso 1, gerado com SolidWorks e processada em Rhinoceros/Grasshopper, dividida durante o processo de incorporação dos padrões.

Após selecionar as duas superfícies, os restantes passos para a incorporação dos padrões de furos mantêm-se iguais. Contudo, o padrão aleatório gerado com as mesmas variáveis de entrada é diferente para os dois modelos (Rhinoceros e SolidWorks), o que pode ser explicado pela diferença na sua representação no Rhinoceros. Após obter o modelo da peça final, para ambos os casos, este tem de ser exportado para o Mastercam para a definição dos percursos de maquinagem e obtenção da respetiva programação do robô. Este modelo é acompanhado pelos pontos dos centros dos furos, criados durante o processo de incorporação do padrão, e o formato de exportação utilizado é o formato STEP.

Programação para peça com padrão linear

Independentemente da origem do modelo, a definição dos percursos de maquinagem é obtida da mesma forma, através dos seguintes passos:

1. Importação do modelo da peça em formato STEP;
2. Seleção da máquina a ser utilizada para as operações de maquinagem;
3. Definição do tipo de percurso e operação a efetuar;
4. Definição dos parâmetros de maquinagem;
5. Configuração dos parâmetros do Robotmaster e validação dos percursos;
6. Pós-processamento do código gerado para a linguagem de programação do robô.

Após importar o modelo da peça é selecionada a máquina a utilizar, neste caso, o robô ABB. Como referido anteriormente, o tipo de percurso (*Toolpath type*) utilizado é o percurso de 5 eixos e a operação selecionada é a furação. Depois de selecionada a operação, é necessário definir os seus parâmetros. A ferramenta selecionada foi uma broca com o mesmo diâmetro dos furos. De seguida, como definido no Capítulo 3, a seleção dos pontos para a furação e a definição da orientação do eixo da ferramenta foi efetuado pela seleção em modo janela (*Window Points*) de todos os pontos criados no centro dos furos e pela seleção da superfície que contém todo o padrão de furos. Estes passos foram repetidos para os modelos obtidos no Rhinoceros e no SolidWorks.

A geração dos percursos para estes modelos não foi possível deste modo. Tal deve-se ao facto de os furos serem passantes, o que não permite a geração automática dos percursos de maquinaria pelo método elaborado. Como solução foram criados modelos da peça em que a parte cónica da peça não é oca. Desta forma os furos incorporados não são passantes, e os percursos de maquinaria gerados continuam válidos para o modelo criado inicialmente. Apenas é necessário definir a correta profundidade dos furos. Esta modificação foi feita em ambos os softwares CAD.

Após esta alteração nos modelos da peça, foram repetidos os passos para a obtenção dos percursos de maquinaria. Em ambos os modelos (Rhinoceros e SolidWorks) os percursos gerados são os desejados (sendo o percurso da ferramenta perpendicular à superfície da peça e não ocorrem colisões entre a ferramenta e a peça). Na Figura 4.10, são ilustrados os percursos obtidos no modelo Rhinoceros.

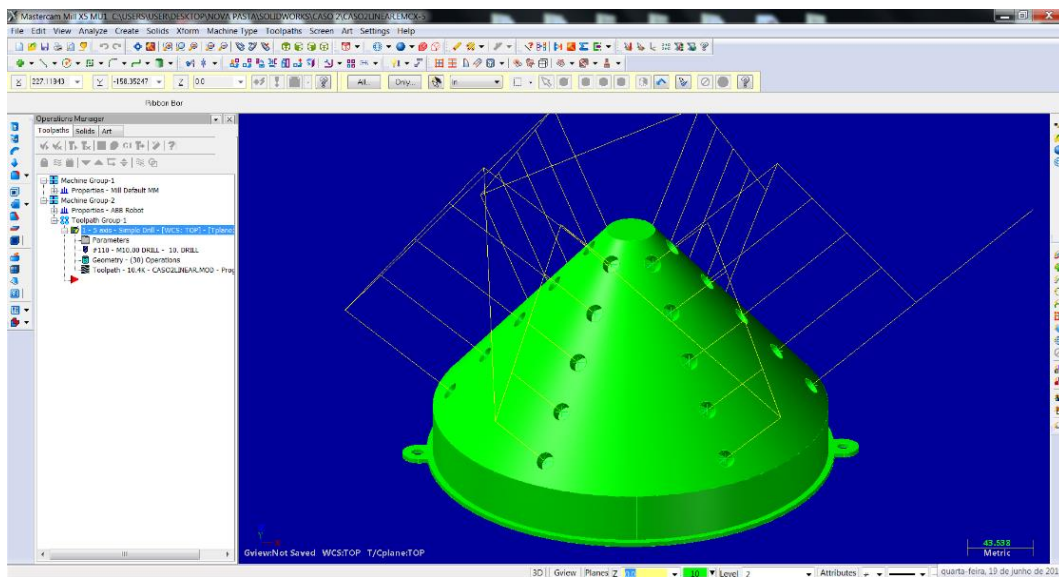


Figura 4.10 - Percursos de maquinaria obtidos no modelo Rhinoceros.

Definidos os parâmetros de maquinaria, passamos à configuração dos parâmetros do Robotmaster. Após a sua configuração foram simulados os percursos de modo a validar a sua exequibilidade. Na Figura 4.11, está apresentado o gráfico da função *Optimization* do Robotmaster para o modelo obtido no Rhinoceros.



Figura 4.11 - Gráficos *Optimization* dos percursos obtidos para o modelo do Rhinoceros.

A configuração do Robotmaster e a validação do percurso foi repetido para o modelo obtido no SolidWorks. Para ambos os modelos, os percursos são validados e podem ser pós-processados para a linguagem Rapid.

Programação para peça com padrão aleatório

O processo de definição dos percursos de maquinagem foi repetido para os modelos incorporados com o padrão aleatório de furos, sendo apenas apresentado os resultados obtidos.

Durante a seleção dos pontos para a definição dos percursos de maquinagem, foi observado que a utilização de algumas opções para a definição da sequência de furação disponibilizadas pelo Mastercam provoca a geração de percursos de maquinagem onde ocorre a colisão entre a ferramenta e a peça. Quando ocorre esta colisão, o Mastercam apresenta o aviso “*Rapid move hits operation surface*”, confirmando ao utilizador a ocorrência de colisões nos percursos gerados. Esta colisão deve-se ao facto de os percursos gerados serem definidos de modo a percorrerem a menor distância entre dois furos consecutivos. Como algumas das ordenações definem uma sequência entre dois furos em lados opostos da peça, o percurso gerado toma a menor trajetória possível entre os dois, o que se traduz num percurso que atravessa a peça. Após uma análise das sequências disponibilizadas pelo Mastercam, foi averiguado que o tipo de ordenação mais adequado ao modelo do Caso 1 são as ordens do tipo *Rotary sort* e *Cross sort*, visto evitarem a colisão entre a ferramenta e a peça e os percursos serem mais eficientes, em termos da movimentação do braço do robô. Em último caso, o Mastercam permite, após a seleção dos pontos, a definição manual da sequência das operações. Este método torna o processo menos expedito, mas permite a definição do percurso mais eficiente para cada peça. Na Figura 4.12, é apresentado um percurso gerado com a ordem sequencial das operações definida manualmente, tornando as operações mais eficientes e evitando as colisões entre a ferramenta e a peça.

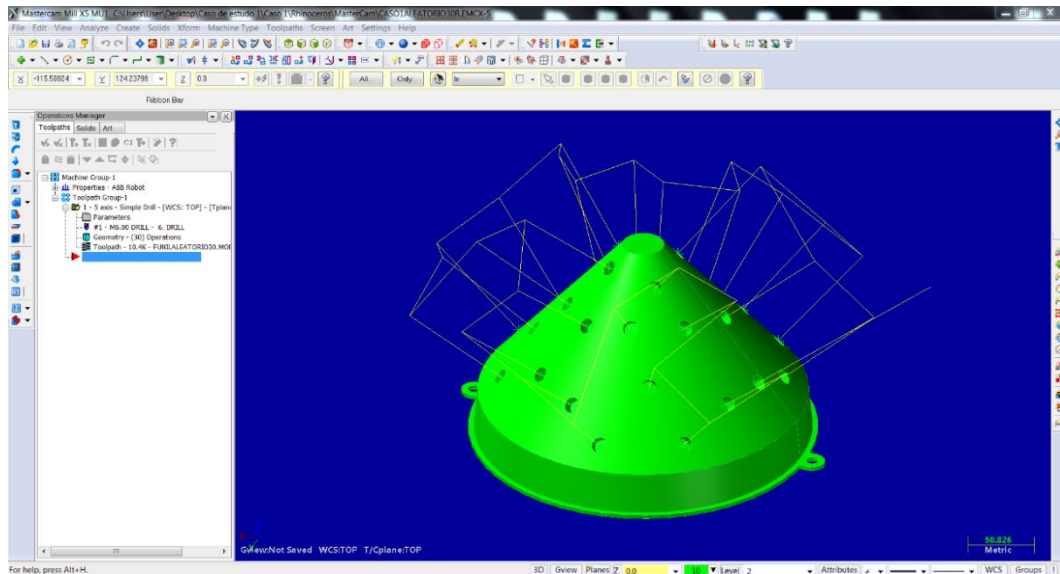


Figura 4.12 – Percursos gerados para o Caso 1 após a definição manual da sequência de operações.

Este processo (alteração da sequência das operações) foi executado para os modelos obtidos por ambos os softwares CAD e os percursos gerados foram os desejados. Após a obtenção dos percursos de furação, foram configurados os parâmetros do Robotmaster e validados os percursos obtidos. Na Figura 4.13, é apresentada a janela *Optimization* obtida para os percursos gerados para o padrão aleatório de furos no modelo do Caso 1, obtido no Rhinoceros.



Figura 4.13 - Gráficos *Optimization* dos percursos obtidos para o modelo do Caso 1 com o padrão aleatório de furos.

Os percursos gerados foram validados para ambos os modelos (Rhinoceros e SolidWorks). Após a simulação e validação dos percursos, o código numérico gerado para as operações pode ser pós-processado para linguagem Rapid.

Variação do número de furos

Determinada a exequibilidade das soluções definidas para os modelos do Caso 1, foi averiguado se a variação do número de furos incorporados tem alguma influência na obtenção dos percursos. Para tal, o modelo do Caso 1 foi incorporado com os mesmos padrões (padrão linear e padrão aleatório) e foi variado o número de furos entre 6, 30 e 60 furos, sendo que o caso dos

30 furos já foi testado na análise anterior. Na Figura 4.14 e na Figura 4.15, são apresentados os modelos incorporados com 6 e 60 furos no padrão linear e no padrão aleatório, respetivamente.

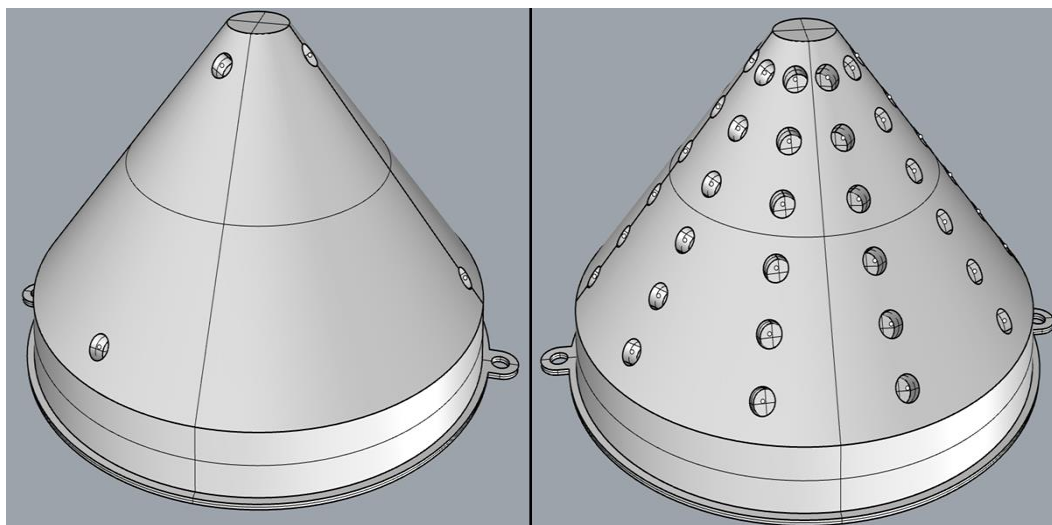


Figura 4.14 – Padrão linear incorporado no modelo do Caso 1 com 6 furos (esquerda) e 60 furos (direita).

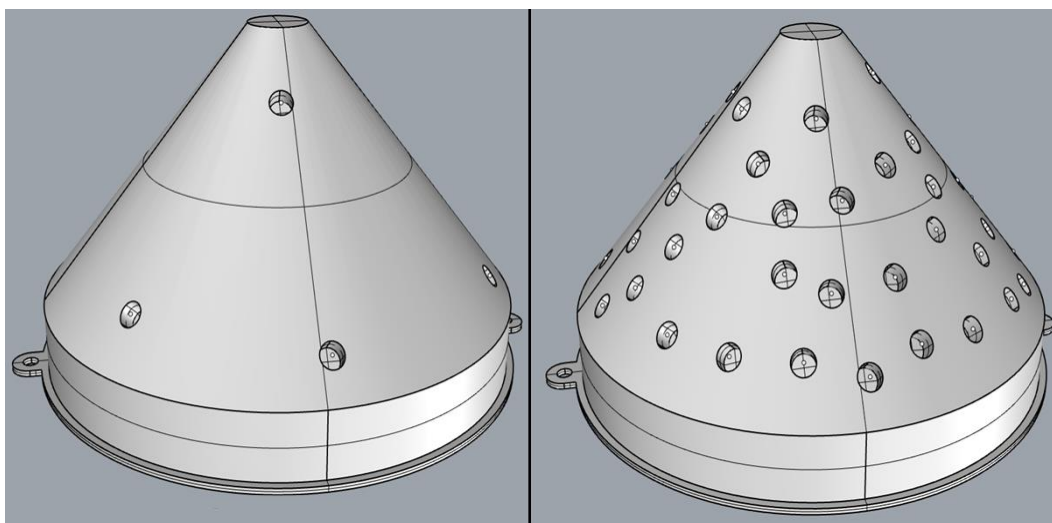


Figura 4.15 – Padrão aleatório incorporado no modelo do Caso 1 com 6 furos (esquerda) e 60 furos (direita).

Obtidos os modelos, foram repetidos os passos para a definição dos percursos de maquinagem. Depois de executados os passos para a definição, foi observado que a variação do número de furos não altera a obtenção dos percursos de maquinagem, nos casos testados. Para todos os casos (6, 30 e 60 furos) os percursos foram obtidos da mesma forma e com os mesmos resultados, sendo apenas de referir que com o aumento do número de furos, qualquer operação manual se torna mais demorada, por exemplo, a definição manual da ordem sequencial das operações de furação. A variação do número de furos foi testada nos modelos obtidos pelo Rhinoceros e pelo SolidWorks, obtendo-se o mesmo resultado.

Validação no RobotStudio

Após a obtenção dos programas em linguagem Rapid, através do Robotmaster, estes podem ser transferidos para o RobotStudio para uma validação final. Apesar de o Robotmaster permitir simular e validar os percursos gerados, a sua validade para a implementação do programa numa célula robótica real não é assegurada. Foram observados dois fatores que ilustram que a validação do programa no Robotmaster não assegura a exequibilidade do programa. O primeiro fator deve-se a uma diferença na amplitude de movimento do eixo 2 e 3 do robô definida no

Robotmaster e no RobotStudio. A amplitude de movimento destes dois eixos é dependente um do outro, ou seja, a amplitude a que se encontra o eixo 2 influencia a amplitude de movimento do eixo 3 e vice versa. Esta relação entre as amplitudes dos dois eixos do robô não é a mesma no Robotmaster e no RobotStudio. Desta forma, movimentos validados no Robotmaster podem não ser executados no RobotStudio devido a ultrapassarem as amplitudes de movimento dos eixos. O segundo fator observado, são as limitações impostas pelo utilizador ao movimento dos eixos do robô. Esta situação ocorre na célula robótica utilizada. Devido ao mecanismo de fixação instalado na extremidade do braço do robô (mecanismo utilizado para a fixação da ferramenta), a amplitude de movimento do eixo 5 é limitada para evitar colisões entre o mecanismo de fixação e o braço do robô. Este eixo, originalmente, com uma amplitude de movimento entre -120° e 120° , é limitado a -97.4° e 97.4° . Esta limitação é imposta no RobotStudio e no próprio controlador do robô. Contudo, o Robotmaster assume a amplitude de movimento original do robô e não permite a sua alteração de forma expedita para a simulação e validação dos percursos. Deste modo, é necessário validar o programa no RobotStudio, onde a simulação dos percursos gerados é a mais próxima da realidade.

Foram transferidos dois programas obtidos para o Caso 1 para determinar a sua exequibilidade na célula real. Os programas utilizados são referentes a execução das operações de furação para o modelo do Caso 1 incorporado com o padrão linear e com o padrão aleatório, com 30 furos em ambos. Para o modelo com o padrão linear de furos, o programa gerado contém um ponto que o robô não consegue atingir devido à limitação de movimento do eixo 5. Contudo, o ponto onde ocorre a paragem do programa é um ponto de passagem, pelo que a sua eliminação do programa não interfere com as operações de maquinagem. Após a edição do programa, foi possível validar e simular os percursos. Na Figura 4.16, é apresentada a simulação dos percursos de maquinagem obtido para o modelo do Caso 1 com o padrão linear de furos. O percurso do TCP (*Tool Center Point*) é representado pela linha vermelha.

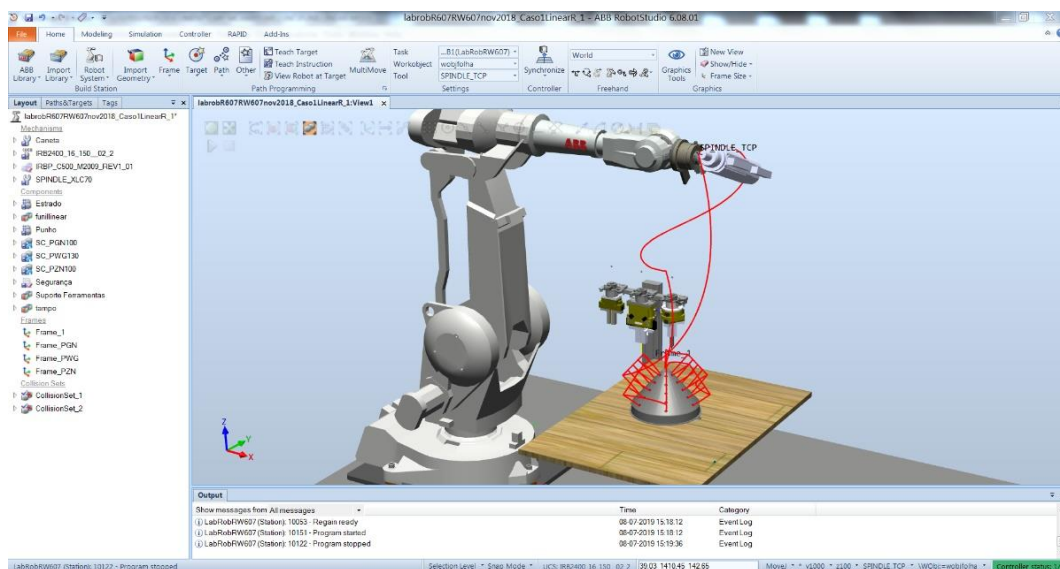


Figura 4.16 – Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 1 com o padrão linear.

O programa gerado para o padrão aleatório de furos também teve de ser editado para obter a sua validação. Foram observados pontos que o robô não é capaz de atingir devido à limitação do eixo 5. Contudo, a sua eliminação das linhas de código correspondentes soluciona a paragem do programa e não interfere com as operações de furação. Na Figura 4.17, é apresentada a simulação do percurso gerado para o modelo do Caso 1 com o padrão aleatório de furos.

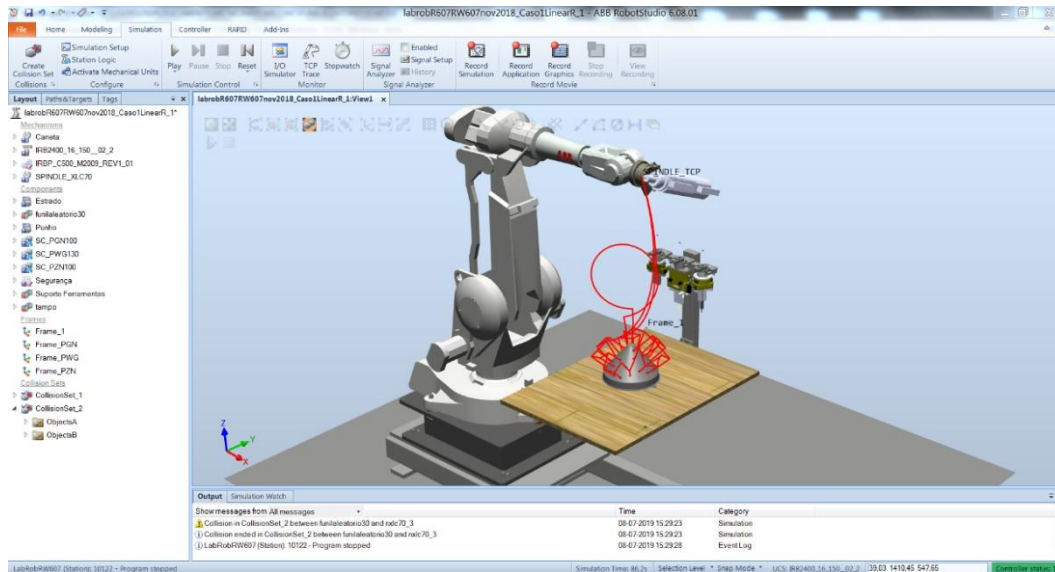


Figura 4.17 - Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 1 com o padrão aleatório.

4.3 Caso 2

No segundo caso de estudo, foi criado o modelo de uma peça cilíndrica com a superfície lateral ondulada. A escolha deste modelo foi devida à sua superfície lateral, que se distingue da natureza regular da superfície do Caso 1. A conceção da peça nos softwares SolidWorks e Rhinoceros foi realizada por um processo semelhante. Foram definidos os diâmetros exteriores da peça e realizada uma operação *loft* para a geração da superfície lateral da peça. Ao contrário do SolidWorks, onde a operação *loft* cria automaticamente um sólido, o Rhinoceros apenas cria a superfície lateral da peça, pelo que é necessário definir as bases do cilindro para obter um sólido. Na Figura 4.18 e na Figura 4.19, são apresentados os modelos do Caso 2 obtidos pelo Rhinoceros e pelo SolidWorks, respetivamente.

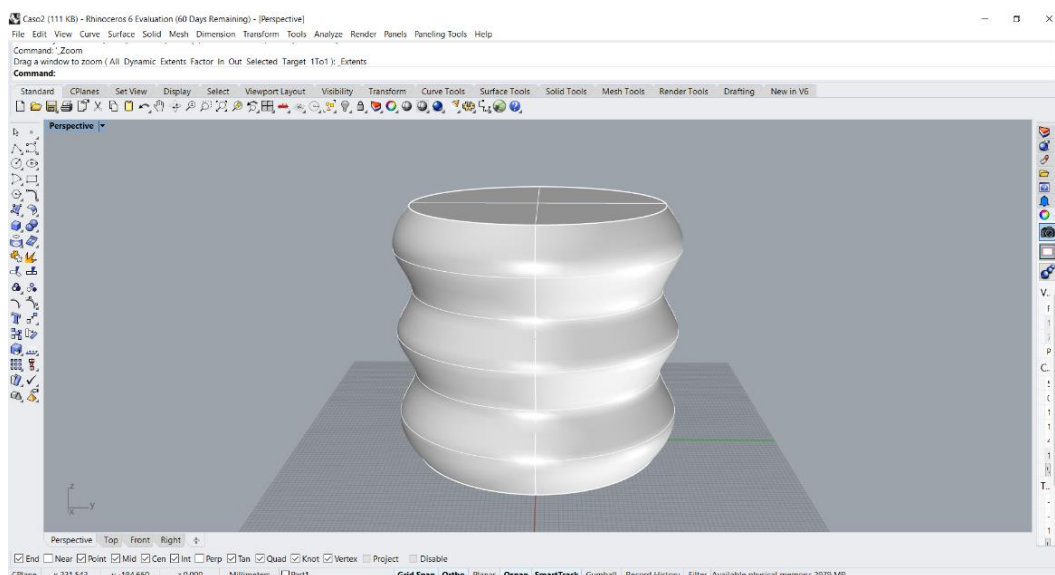


Figura 4.18 – Modelo da peça do Caso 2 obtido no Rhinoceros.

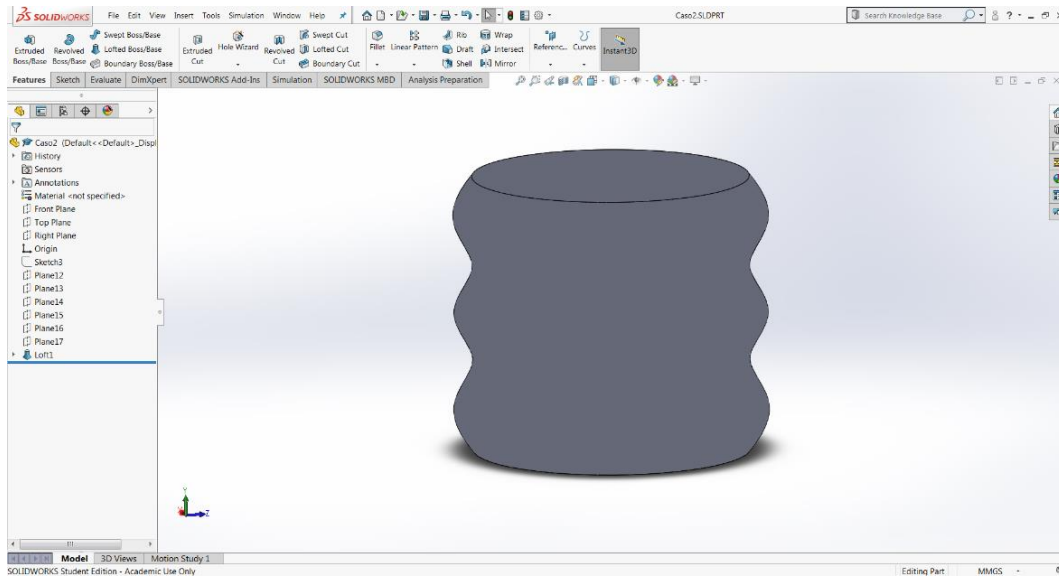


Figura 4.19 - Modelo da peça do Caso 2 obtido no SolidWorks.

Como no Caso 1, não se observaram diferenças significativas na obtenção do modelo da peça através destes softwares CAD, tanto a nível de dificuldade como de tempo necessário para a sua modelação. O modelo criado no SolidWorks foi exportado para o Rhinoceros no formato SolidWorks (.sldpart). Após a importação do modelo do SolidWorks para o Rhinoceros, foi analisada a sua representação no Rhinoceros. Ambos os modelos são representados como *closed solid polysurface*, mas a análise mais detalhada dos modelos revela que os modelos são constituídos por um número distinto de superfícies. Na Tabela 8, são apresentados os resultados da análise dos dois modelos.

Tabela 8 – Modelos do Caso 2: nº de superfícies observadas no Rhinoceros.

Origem do modelo	Representação no Rhinoceros	Número de superfícies
Rhinoceros	<i>Closed Solid PolySurface</i>	3
SolidWorks	<i>Closed Solid PolySurface</i>	4

Após a obtenção dos modelos do Caso 2, procedeu-se à incorporação dos padrões de furos (padrão linear e padrão aleatório) recorrendo aos mesmos programas utilizados no Caso 1. Como estes modelos também são representados como um sólido, a seleção da superfície para a incorporação dos padrões requer a utilização do bloco *Deconstruct Brep*. A utilização deste bloco no modelo obtido através do SolidWorks demonstrou, de novo, a divisão da superfície do modelo, o que gera a necessidade de selecionar duas superfícies para a incorporação do padrão de furos (no modelo obtido através do Rhinoceros é apenas selecionada uma superfície para a incorporação do mesmo padrão). Na Figura 4.20, pode-se observar a divisão da superfície lateral do modelo do Caso 2.

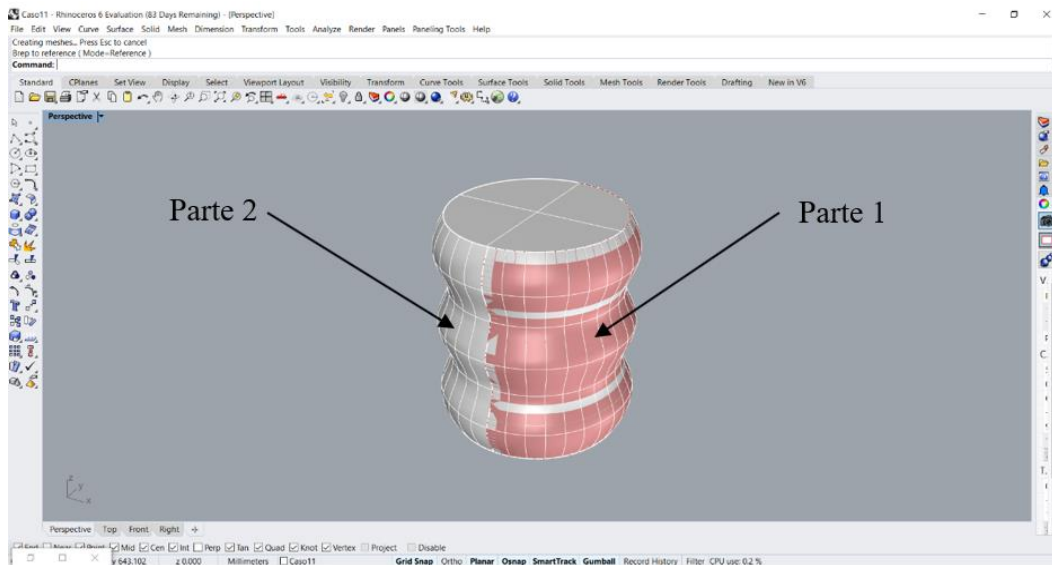


Figura 4.20 - Superfície lateral do modelo do Caso 2, obtido pelo SolidWorks, dividida durante o processo de incorporação dos padrões de furos.

O restante processo de incorporação dos padrões manteve-se igual. Obtidos os modelos finais, com os padrões de furos, foram exportados para o Mastercam, no formato STEP, para a definição dos percursos de maquinagem.

Durante a execução do procedimento elaborado para a obtenção dos percursos de maquinagem no modelo do Caso 2 foi observada a definição indesejada dos percursos. Em alguns dos furos selecionados, os percursos obtidos são tangentes à superfície selecionada, sendo pretendido que o percurso da ferramenta seja perpendicular à superfície. Esta definição dos percursos foi observada em todos os modelos analisados, independentemente da origem do modelo ou do padrão de furos incorporado. Na Figura 4.21, é apresentado um furo do modelo do Caso 2 onde o percurso obtido é tangente à superfície.

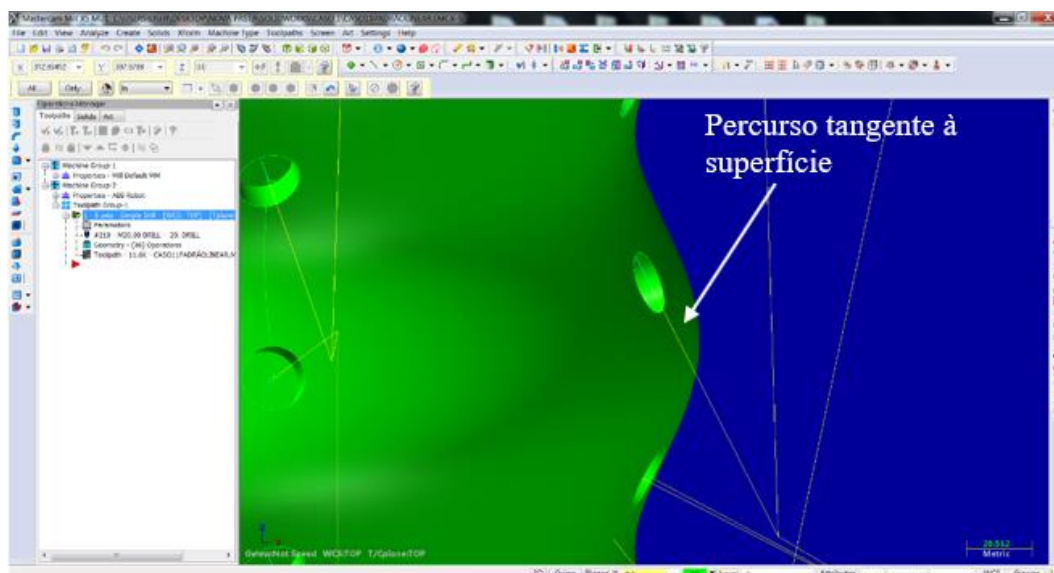


Figura 4.21 - Percurso de maquinagem tangente à superfície da peça.

Através da análise realizada foi possível concluir que esta definição ocorre quando o padrão de furos é incorporado numa superfície irregular, através do procedimento elaborado. A obtenção de percursos tangentes está relacionada com a localização dos furos na peça. Nos modelos com o padrão linear foi observado que os furos onde ocorre o percurso tangente são os mesmo

(mesma localização na peça). Nos modelos com o padrão aleatório, não foi possível verificar esta semelhança devido à localização dos furos não ser a mesma nos modelos obtidos pelo Rhinoceros e SolidWorks. A variação do número de furos não evitou a obtenção de percursos indesejados, verificando-se apenas a variação do número de furos onde o percurso indesejado ocorre. A explicação para esta ocorrência é a definição do percurso utilizando pontos que não estão contidos na superfície selecionada para a definição da orientação do furo. No Caso 1 não foi observado esta definição indesejada devido a tratar-se de uma superfície regular, o que facilita a definição da orientação dos percursos.

Obtidos estes resultados foi concluído que a definição dos percursos de maquinagem pela seleção de todos os centros de furos e da superfície que engloba todo o padrão de furos não gera os percursos pretendidos em qualquer peça, pelo que é necessário encontrar outra solução para a geração dos percursos. Deste modo foram analisados outros modos de definição, tendo-se encontrado duas alternativas.

A primeira alternativa é a definição da orientação do eixo da ferramenta através do modo *Parallel to line*. Neste modo, em vez de selecionar uma superfície para definir a orientação do eixo da ferramenta como perpendicular a essa superfície, o eixo da ferramenta é definido como paralelo a uma linha selecionada. Desta forma, depois de criado o percurso pelo método anterior e observado que alguns percursos são tangentes à superfície, o Mastercam permite a seleção individual dos pontos utilizados para a definição e permite eliminar os pontos onde o percurso gerado não é o pretendido, mantendo os percursos nos restantes pontos inalterados. Após eliminar os pontos pretendidos da definição do percurso anterior, podem-se definir novos percursos nesses pontos utilizando o método *Parallel to line*. Neste método, é necessário selecionar uma linha para definir o eixo da ferramenta, esta linha pode ser qualquer uma contida no modelo da peça, por exemplo, uma aresta. De modo a facilitar esta operação e assegurar que o eixo da ferramenta é perpendicular à superfície é necessário alterar o modelo da peça de forma a criar uma linha perpendicular à superfície em todos os centros dos furos (esta linha pode ser vista como o eixo do furo), durante a incorporação do padrão. Os programas criados no Grasshopper permitem a criação destas linhas sem ser necessário alterações ou adição de novos blocos de funções. Na Figura 4.22, podemos observar esta alteração no modelo da peça.

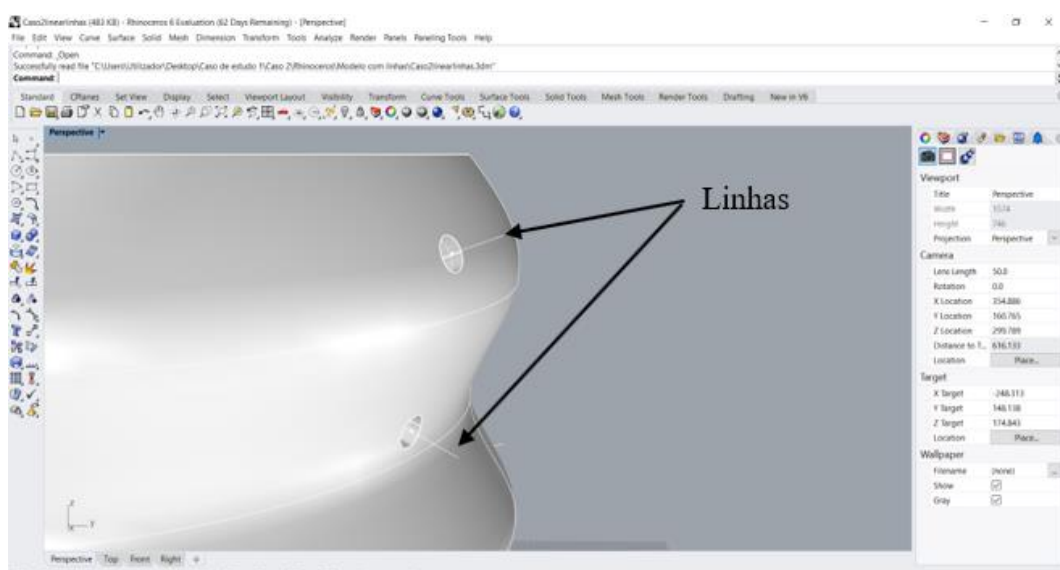


Figura 4.22 – Linhas, perpendiculares à superfície nos centros dos furos, criadas no modelo do caso 2.

Com esta alteração, pode-se criar um percurso de maquinagem adicional para os pontos onde os percursos gerados não foram os pretendidos. Para a definição do percurso, deste modo, é

necessária a seleção do centro do fundo do furo e da linha criada nesse furo (eixo do furo). Na Figura 4.23, podemos ver um percurso definido deste modo.

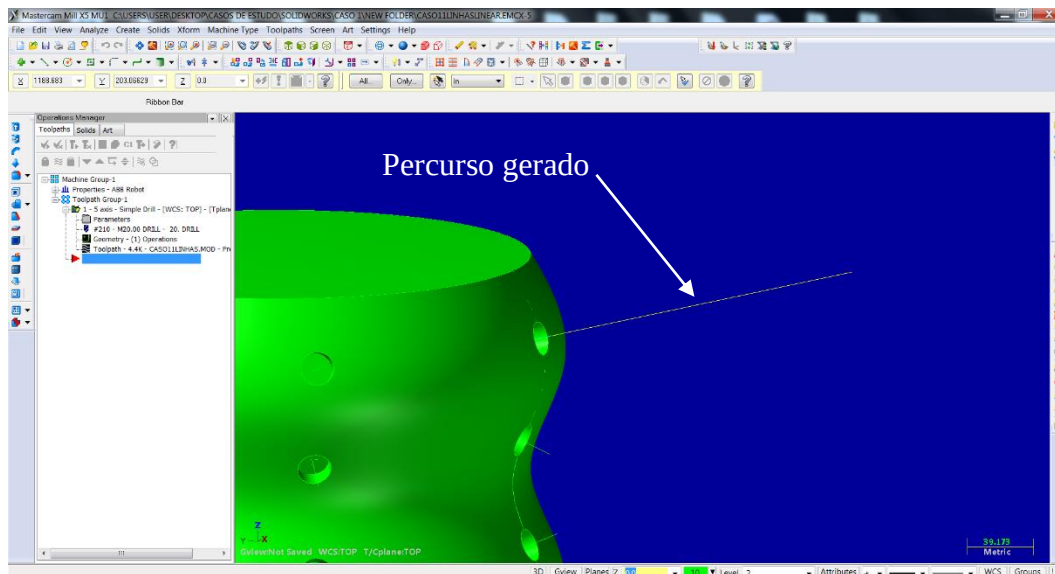


Figura 4.23 - Percurso gerado pela definição da orientação do eixo da ferramenta como paralelo ao eixo do furo.

Desta forma é possível gerar o percurso de maquinagem para todos os furos, mesmo que estejamos perante um caso em que a definição, pela seleção da superfície que contém todo o padrão, não for a pretendida. Contudo, esta solução não é expedita e provoca um aumento drástico no tempo necessário para a definição dos percursos. Isto deve-se ao facto de a identificação dos pontos, onde o percurso não foi definido como pretendido, ter de ser realizada manualmente e por identificação visual, o que no caso de haver um número elevado de furos se torna um processo pouco eficiente. Para além desta limitação, o método de definição *Parallel to line* não permite a definição de percursos de maquinagem para vários furos em simultâneo, ou seja, requer a definição individual do percurso para cada furo, o que torna o processo ainda mais demorado.

A segunda alternativa testada foi a definição dos percursos de maquinagem pelo método anterior (seleção de todos os pontos e da superfície que contém o padrão de furos) mas alterando o modelo da peça. A alteração no modelo consiste em criar apenas os pontos no centro dos furos sem a criação do furo, durante a incorporação do padrão. A diferença, utilizando estes modelos da peça, na definição dos percursos é a necessidade de definir manualmente a profundidade do furo, processo que era automático utilizando os modelos com os furos. Na Figura 4.24, podemos observar esta alteração no modelo após a incorporação do padrão de pontos.

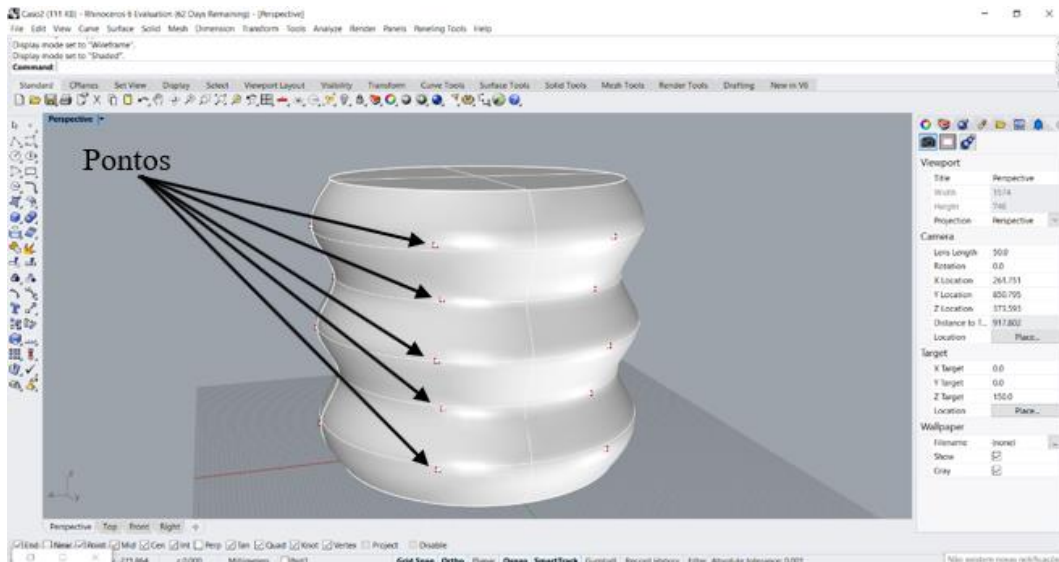


Figura 4.24 – Padrão linear de pontos incorporado no modelo do Caso 2.

Com esta alteração, durante o processo de definição dos percursos de maquinagem, os pontos selecionados estão contidos na superfície utilizada para a definição da orientação da ferramenta.

Ambas as alternativas para a definição dos percursos de maquinagem produzem os resultados pretendidos. Contudo, a utilização do modo *Parallel to line* torna o processo de definição pouco expedito e mais demorado comparativamente à utilização dos modelos da peça com apenas o padrão de pontos. Desta forma, a alternativa mais adequada para este trabalho é a definição dos percursos no modelo da peça com apenas os centros dos furos. De seguida são expostos os resultados utilizando esta alternativa nos modelos do Caso 2.

Programação para peça com padrão linear

Obtido o modelo do Caso 2 com o padrão linear de pontos (sem os furos), é exportado para o Mastercam no formato STEP, e procede-se à definição dos percursos de maquinagem pela seleção de todos os pontos e da superfície que os contém. Como o modelo da peça não tem furos, a geração dos percursos desejados requer a definição manual da profundidade dos furos. Na Figura 4.25, pode-se observar a definição deste parâmetro de maquinagem.

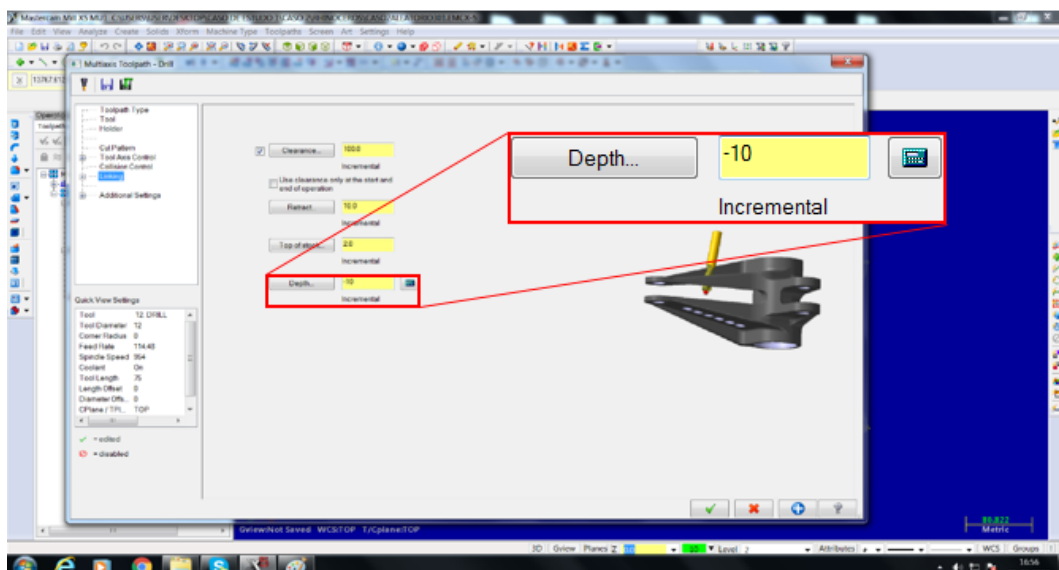


Figura 4.25 – Definição manual da profundidade dos furos no Mastercam.

Após a definição dos parâmetros de maquinagem no Mastercam podemos gerar os percursos de furação. Na Figura 4.26, é apresentado o percurso de maquinagem obtido no modelo da peça do Caso 2 com a incorporação do padrão linear de pontos.

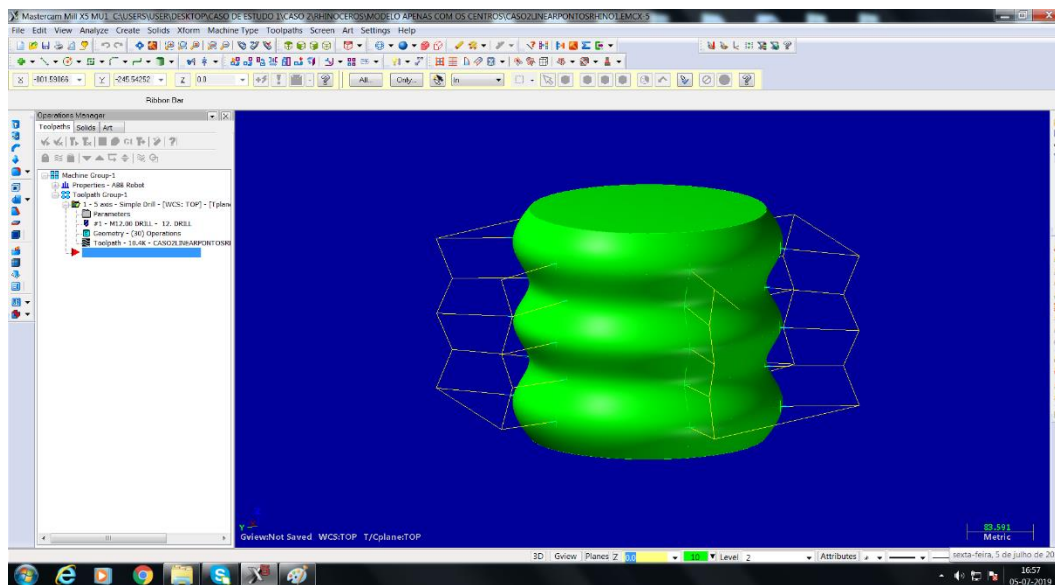


Figura 4.26 – Percursos de maquinagem gerados para o modelo do Caso 2 com o padrão linear de pontos.

Depois de gerado o percurso, são configurados os parâmetros do Robotmaster. A configuração destes parâmetros não é alterada pela utilização destes modelos, procedendo-se do mesmo modo. Configurados os parâmetros do Robotmaster segue-se a simulação e validação dos percursos gerados. Na Figura 4.27, é apresentada a janela *Optimization* obtida para os percursos definidos no Caso 2 com o padrão linear.



Figura 4.27 – Janela *Optimization* obtida para o modelo do Caso 2 com o padrão linear de pontos.

Este processo foi realizado para os modelos do Caso 2 obtidos pelo Rhinoceros e pelo SolidWorks, obtendo-se o mesmo resultado. Simulado e validado o percurso, segue-se o pós-processamento do código numérico para linguagem Rapid.

Programação para peça com padrão aleatório

O processo de definição das operações de maquinagem foi repetido para o padrão aleatório. Foi observado, de novo, que algumas ordens sequenciais disponibilizadas pelo Mastercam provocam a colisão da ferramenta com a peça. De uma análise às ordens disponibilizadas foi concluído que os tipos *Rotary sort* e *Cross sort* são os mais adequados ao modelo do Caso 2. Na Figura 4.28, é apresentado o percurso gerado para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de pontos, após a definição da ordem sequencial das operações como *Cross sort*.

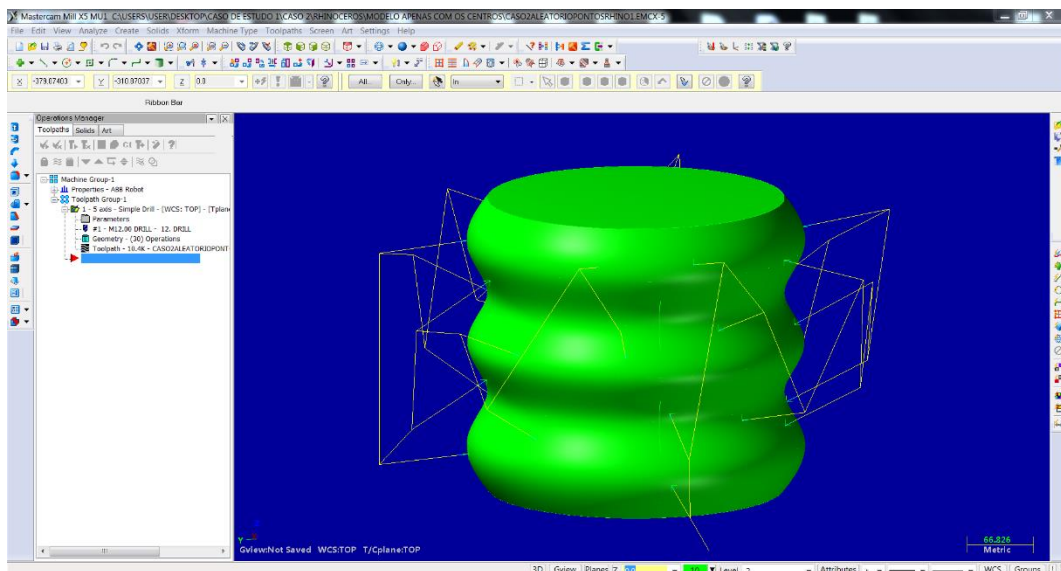


Figura 4.28 – Percursos de furação gerados para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de furos.

Após a obtenção dos percursos, foram configurados os parâmetros do Robotmaster e verificada a validade dos percursos gerados. Na Figura 4.29, é apresentada a janela *Optimization* referente aos percursos obtidos no modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de pontos.



Figura 4.29 - Janela *Optimization* obtida para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de pontos.

Este processo foi realizado para os modelos do Caso 2 obtidos através do Rhinoceros e SolidWorks, tendo-se obtido os mesmos resultados para ambos os casos. Validado o percurso, o código numérico gerado é pós-processado para linguagem Rapid.

Variação do número de furos

De modo a assegurar que o método definido gera sempre os percursos pretendidos, foi testada a variação do número de furos incorporados no modelo da peça do Caso 2. Com este método, o aumento de furos é apenas representado pelo aumento de pontos criados na superfície da peça. A variação do número de pontos foi estipulada entre 6, 30 e 60 furos, sendo que o modelo com 30 furos já foi analisado anteriormente. A partir dos testes realizado, foi possível concluir que a variação do número de pontos incorporados no modelo da peça não influenciam os percursos de maquinagem obtidos, tendo-se obtido os resultados pretendidos para todos os casos.

Validação no RobotStudio

Os dois programas referentes às operações de maquinagem do Caso 2 com o padrão linear e com o padrão aleatório de furos, ambos com 30 furos, foram analisados e validados com o RobotStudio. Para a simulação e validação dos percursos no RobotStudio o modelo importado para a célula virtual é o modelo com os furos (não apenas os pontos no centro dos furos). Deste modo, é possível verificar se os percursos gerados no modelo sem furos correspondem às operações de furação para a obtenção do modelo com furos. O primeiro programa analisado foi o programa obtido para o modelo do Caso 2 com o padrão linear de furos. Durante a validação deste programa foram identificados alguns pontos do percurso que o robô não é capaz de atingir devido à limitação do movimento do eixo 5. Alguns deste pontos, por serem pontos de passagem, podem ser eliminados do programa sem prejudicar a execução das operações de furação. Contudo, alguns pontos que o robô não consegue atingir são necessários para a execução das operações de furação, pelo que a validação dos percursos gerados foi possível pela modificação da localização da peça em relação ao robô. Também foi observado que a execução de algumas operações de furação, devido à orientação do furo, provocam a colisão da ferramenta com a mesa onde a peça é fixada. As alterações da posição do referencial para a validação dos percursos de maquinagem foram o afastamento da peça em relação ao robô e a subida da peça em relação a mesa. Em termos práticos, a execução destas alterações na realidade necessitam a utilização de mecanismos de fixação da peça que reproduzam a localização definida no RobotStudio. Na Figura 4.30, é apresentada a simulação do percurso de maquinagem obtido para o modelo do Caso 2 com o padrão linear de furos, após as alterações do programa. Pode ser observado que a peça se encontra afastada da mesa, de modo a evitar as colisões entre a ferramenta e a mesa. As linhas vermelhas correspondem às trajetórias executadas pelo TCP.

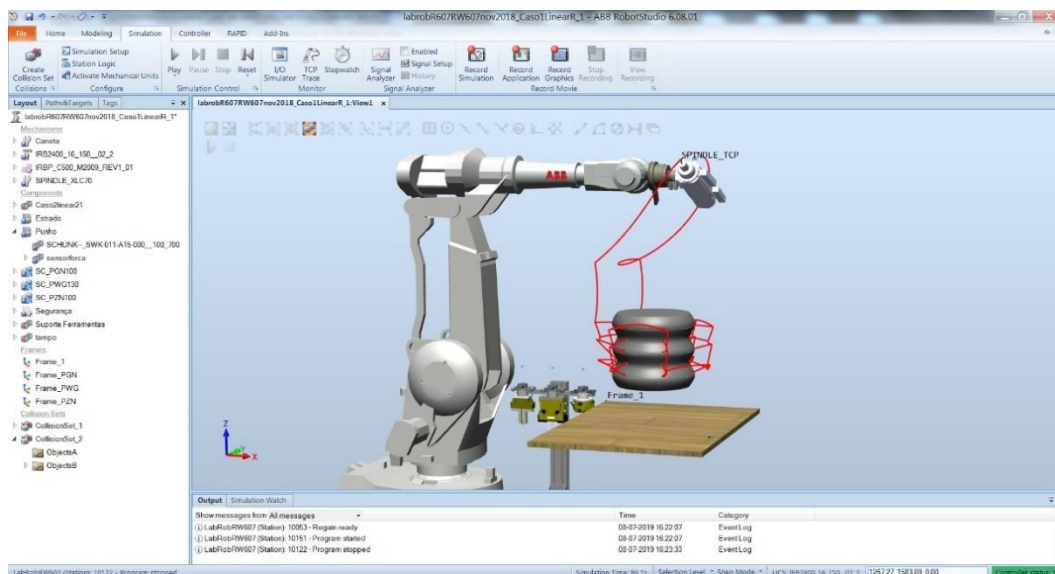


Figura 4.30 - Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 2 com o padrão linear.

O processo de validação foi repetido para o programa obtido para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de pontos. O modelo importado para a simulação no RobotStudio foi um modelo com os furos, correspondente ao modelo criado com apenas os centros dos furos. Durante o processo de validação foram observados, de novo, pontos do percurso que o robô não consegue atingir devido às limitações de movimento dos eixos do robô; a colisão da ferramenta com a mesa devido à orientação de alguns furos. Para validar o programa foi necessário editar o programa obtido pelo Robotmaster. Estas alterações incluíram a eliminação de linhas de código, sem prejudicar a execução das operações de furação, e a mudança da localização do referencial da peça de modo a evitar paragens do programa devido à limitação do movimento dos eixos do robô e evitar a colisão da ferramenta com a mesa. Na Figura 4.31, é apresentada a simulação do percurso obtido para o modelo do Caso 2 com o padrão aleatório de furos, após a edição do programa.

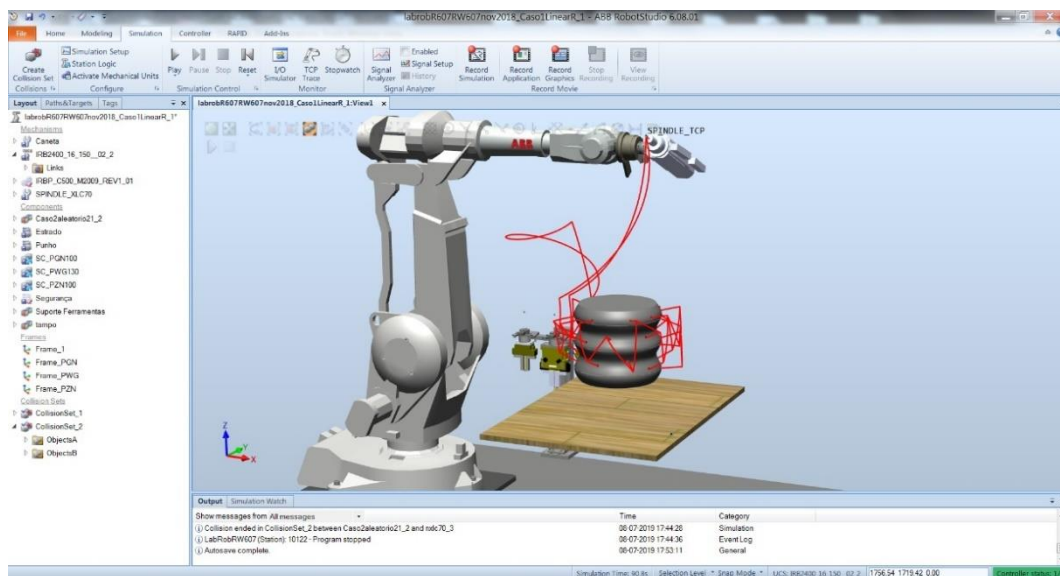


Figura 4.31 - Simulação no RobotStudio dos percursos de maquinagem para o Caso 2 com o padrão aleatório.

4.4 Caso 3

No Caso 3 foi analisado o modelo de um painel com uma superfície irregular (peça de design), obtida no Rhinoceros. O modelo da peça foi incorporado com o padrão linear e aleatório, ambos com 30 furos. A incorporação e definição dos percursos seguiu o método definido no Caso 2, ou seja, o modelo da peça é apenas incorporado com os centros dos furos e a definição dos percursos é obtida pela seleção de todos os pontos e pela seleção da superfície que os contém. Obtidos os percursos de maquinagem, é analisada a sua validade no RobotStudio. Na Figura 4.32, é apresentado o modelo do Caso 3, obtido no Rhinoceros.

Furação robotizada para criação de peças de design singulares

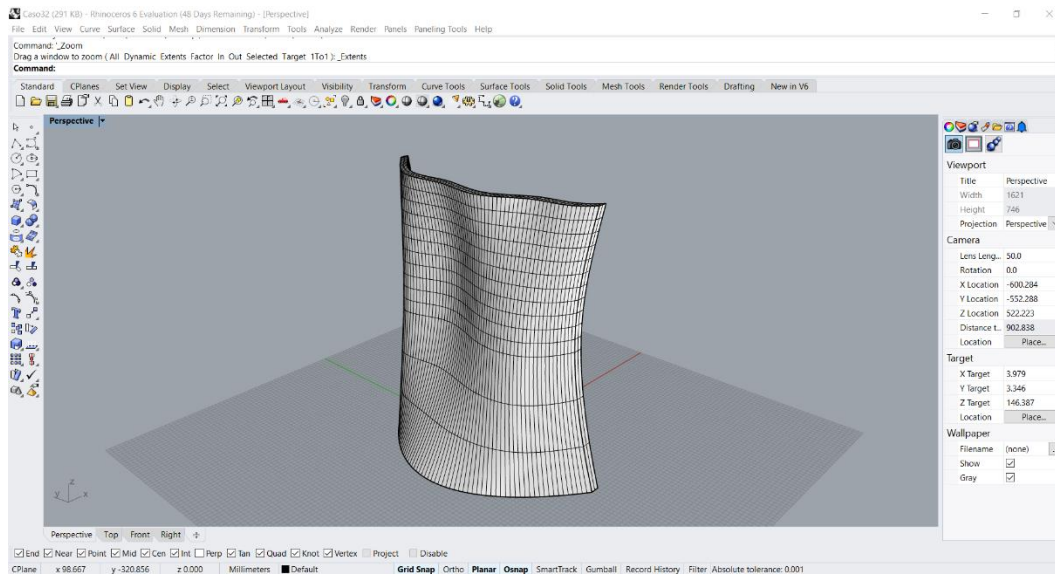


Figura 4.32 – Modelo do Caso 3, obtido no Rhinoceros.

Programação para peça com padrão linear

O modelo do Caso 3 foi incorporado com o padrão linear, com 30 pontos. Para a definição dos percursos de furação foi exportado para o Mastercam, no formato STEP. Na Figura 4.33, é apresentado o modelo do Caso 3 após a incorporação do padrão de furos (este modelo é apenas a representação do modelo final após a furação, o modelo exportado para o Mastercam apenas possui os centros dos furos).

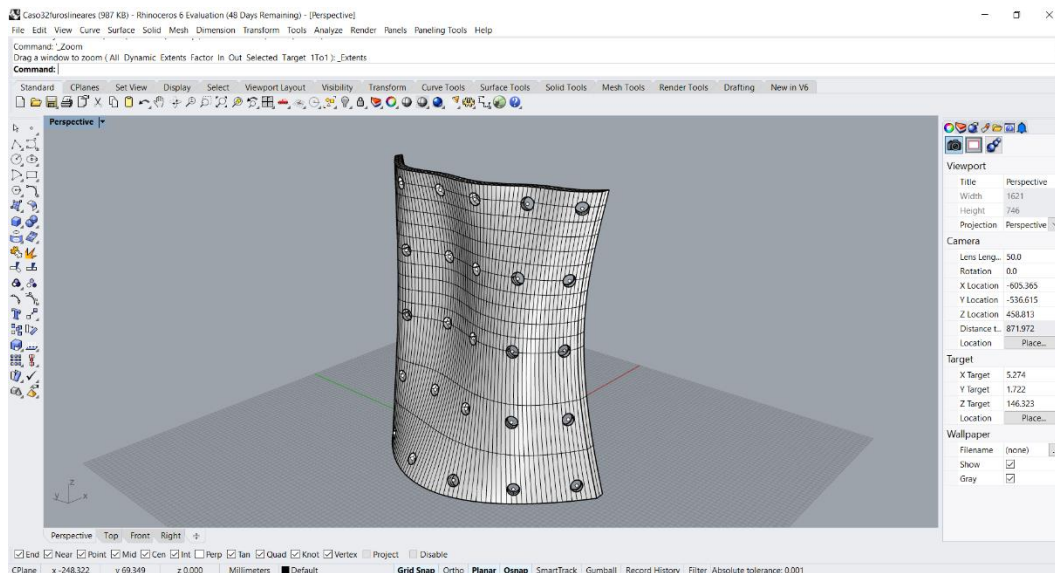


Figura 4.33 – Modelo do Caso 3 com o padrão linear de furos.

De seguida foram definidos os percursos de maquinagem no Mastercam. O processo de definição segue os passos realizados no caso anterior. Não foram identificados problemas na sua definição e validação. Na Figura 3.34, pode-se observar os percursos obtidos no Mastercam.

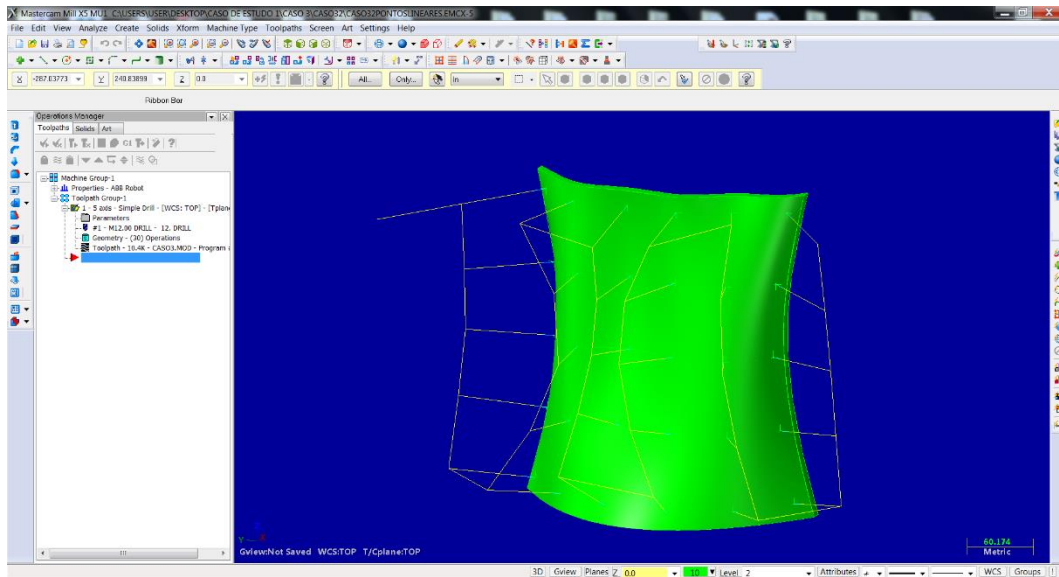


Figura 4.34 – Percursos obtidos para o modelo do Caso 3 com o padrão linear de furos.

Programação para peça com padrão aleatório

O processo foi repetido para o modelo com o padrão aleatório de furos. Na Figura 4.35, é apresentado o modelo do Caso 3 após a incorporação do padrão aleatório de furos.

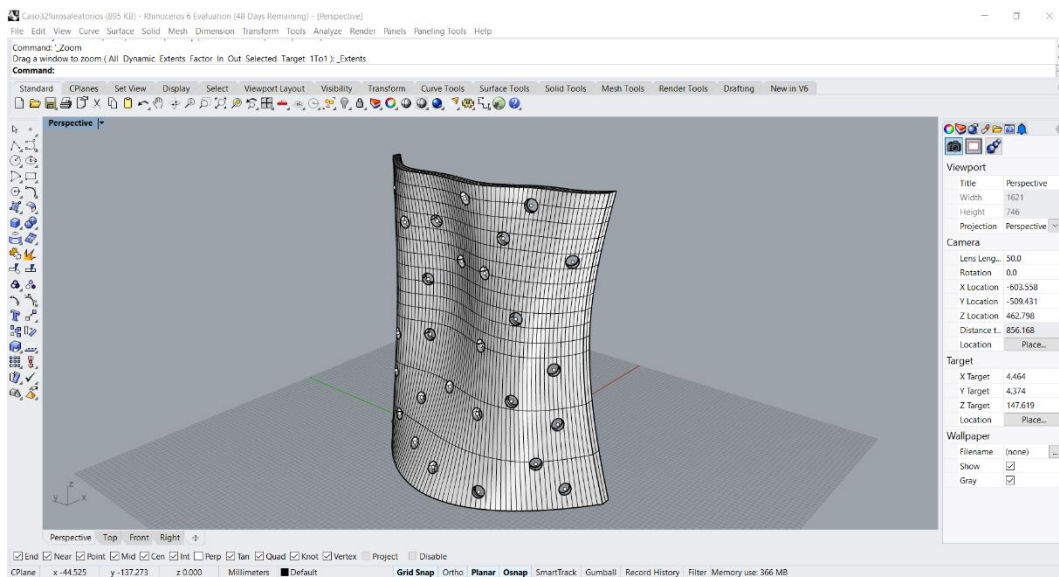


Figura 4.35 – Modelo do Caso 3 com o padrão aleatório de furos.

Obtido o modelo com o padrão aleatório de pontos, foi realizada a definição dos percursos de maquinagem. De novo, o método definido permitiu a definição dos percursos pretendidos e foi possível validar os mesmos no Robotmaster. Na Figura 4.36, são apresentados os percursos obtidos para este modelo.

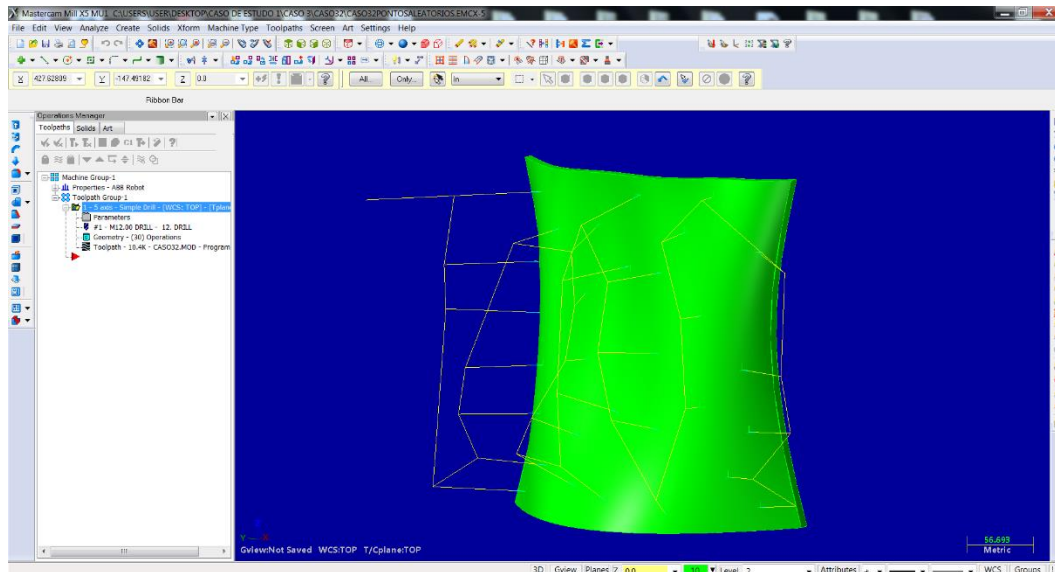


Figura 4.36 - Percursos obtidos para o modelo do Caso 3 com o padrão aleatório de furos.

RobotStudio

Após a validação dos percursos, referentes ao padrão linear e aleatório de furos, no Robotmaster, foi gerado o código respetivo em linguagem Rapid para se proceder a validação das trajetórias no RobotStudio. Foram validados os dois programas. Para a validação dos programas gerados apenas foi necessário a alteração do referencial da peça, tendo sido observada a colisão entre a ferramenta e a mesa durante a execução das operações de maquinagem. Na Figura 4.37, é apresentada a simulação dos percursos obtidos para o modelo do Caso 3 com o padrão linear de furos. O percurso realizado pelo TCP é representado pela linha a vermelho.

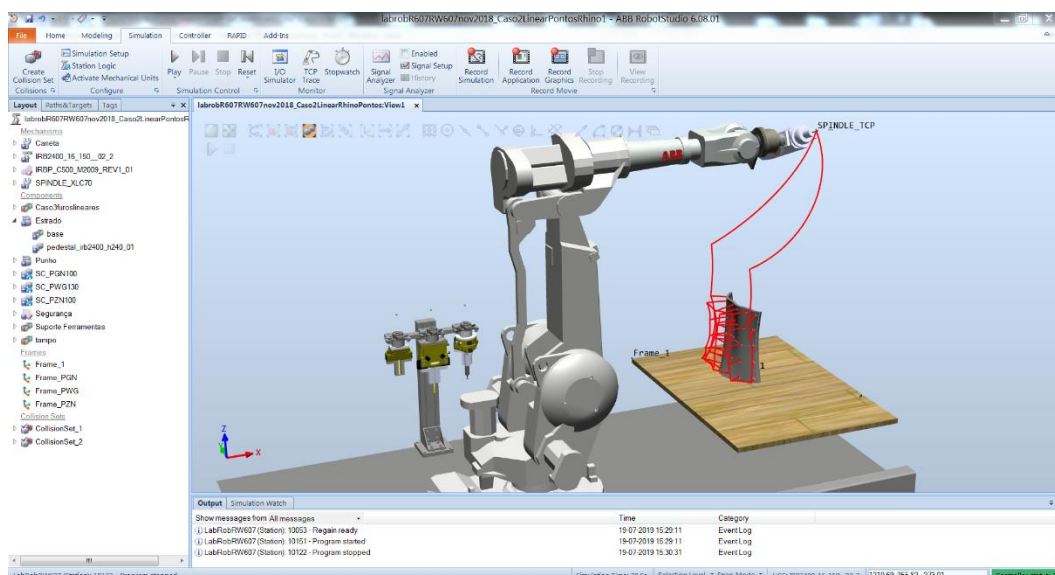


Figura 4.37 – Simulação do percurso no RobotStudio para o Caso 3 com o padrão linear.

O programa referente às operações de maquinagem para a obtenção do modelo do Caso 3 com o padrão aleatório de furos, apenas necessitou a alteração do referencial da peça, de novo devido a colisão da ferramenta com o a mesa. Na Figura 4.38, é apresentada a simulação dos percursos referentes ao modelo do Caso 3 com o padrão aleatório de furos.

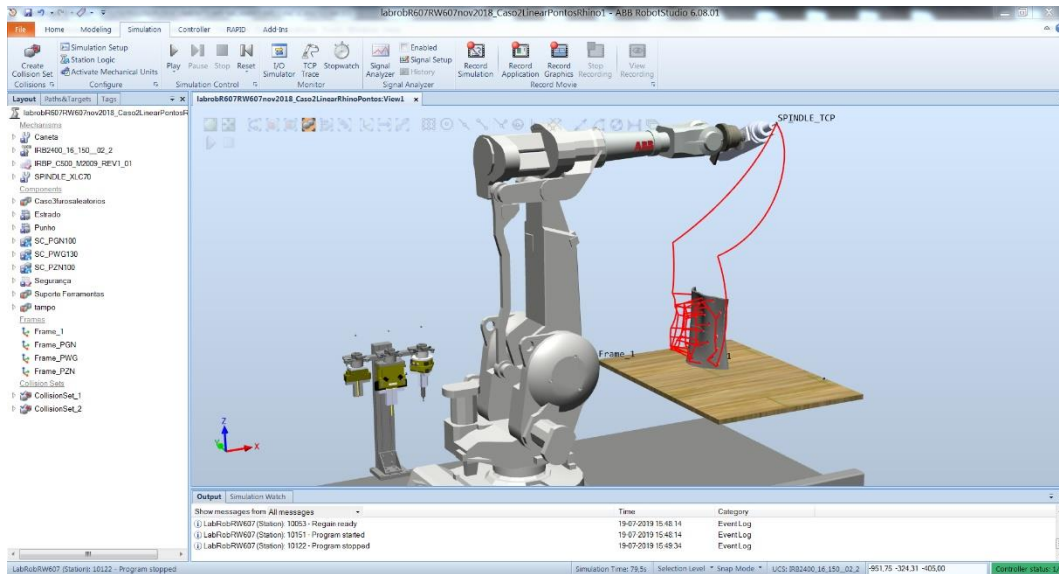


Figura 4.38 – Simulação do percurso no RobotStudio para o Caso 3 com o padrão aleatório.

4.5 Conclusões

A análise efetuada aos caso de estudo permitiu retirar algumas conclusões sobre o comportamento dos softwares (CAD e CAD/CAM), quanto à implementação do método de obtenção de peças singulares pela incorporação de padrões de furos definido nos capítulos anteriores.

A definição dos percursos de maquinagem seguiu duas abordagens. Na primeira, definida no capítulos anteriores, o modelo da peça, durante a incorporação dos padrões, é modelado com os furos e os seus centros. Na segunda abordagem, o modelo da peça é modelado apenas com os centros dos furos.

A primeira abordagem demonstrou possuir limitações na definição de percursos de maquinagem em superfícies complexas (Caso 2 e 3), obtendo-se percursos indesejados. Estes percursos são caracterizados por serem tangentes à superfície selecionada para a definição das operações de furação, o que não é o pretendido. Contudo em superfícies regulares, a sua utilização é expedita e os percursos obtidos são os desejados. Esta abordagem apresenta a vantagem de não ser necessário definir manualmente a profundidade do furo.

A segunda abordagem, elaborada como solução para os casos em que a primeira abordagem não obteve os resultados pretendidos, demonstrou ser vantajosa por permitir a obtenção dos percursos de maquinagem desejados independentemente da superfície da peça a maquinar. A única desvantagem observada nesta abordagem é a necessidade de definir manualmente a profundidade dos furos (processo automático na primeira abordagem). Os restantes passos na definição dos percursos mantêm-se iguais. De facto, a utilização de modelos de peças com apenas os centros dos furos demonstrou obter os resultados pretendidos para qualquer peça, pelo que é recomendada a sua utilização.

Foi verificado que a variação do número de furos incorporados no modelo de uma peça não influencia a obtenção dos percursos de maquinagem no Mastercam.

Foi possível verificar a necessidade de validação dos percursos de maquinagem no RobotStudio. Esta necessidade deve-se à diferença nos modelos do robô presentes no Robotmaster e no RobotStudio. Foi verificado que a relação das amplitudes de movimento entre

os eixos 2 e 3 do robô é definida de forma diferente nestes dois softwares, o que pode resultar na não validação dos programas gerados no Robotmaster quando simulados no RobotStudio. Outro fator que contribui para a necessidade da validação no RobotStudio são as possíveis limitações impostas pelo utilizador ao movimento dos eixos do robô. Estas limitações, que se devem às soluções construtivas das células robóticas reais, não estão presentes no Robotmaster e não são facilmente definidas, o que por sua vez pode provocar a não validação dos percursos gerados quando simulados no RobotStudio. Contudo, foi verificado que as diferenças nos modelos dos dois softwares são possíveis de serem ultrapassadas pela edição do programa, o que não se demonstrou ser de difícil concretização.

Concluindo, o método definido nos capítulos anteriores, com a modificação de a incorporação do padrão de furos ser apenas representada pela criação dos pontos no centro dos furos, demonstrou ser válido e capaz de ser aplicado em qualquer peça, independentemente da superfície na qual se pretende incorporar o padrão (superfície regular ou complexa). Foi possível manter a natureza expedita do método, sendo que o possível *bottleneck* do método é a validação dos percursos no RobotStudio. Isto era de ser esperado, devido à natureza distinta de cada célula robótica, o que provoca a possível necessidade de alteração do programa gerado anteriormente, de modo a evitar colisões e permitir a sua execução por parte do robô.

5 Implementação da célula robótica

Neste capítulo é apresentada a implementação do programa gerado para a furação de uma peça numa célula robótica real. Esta implementação tem como finalidade validar os programas obtidos pelo Mastercam/Robotmaster e apresentar os procedimentos necessários para a implementação de um programa numa célula real. A peça utilizada para a realização dos testes práticos foi a peça apresentada no Caso 1 com um novo padrão e a célula robótica utilizada foi a célula presente DEMec.

5.1 Introdução

A peça selecionada para realizar as operações de furação foi a peça apresentada no Caso 1, que possui uma forma cônica, de material polimérico. Devido a sua geometria, é de fácil modelação e o facto de se tratar de um material polimérico também facilita as operações de furação.

No modelo da peça já disponível foi incorporado um novo padrão de furos, em forma de espiral, distinto dos padrões implementados na secção 4.2. Para a geração deste padrão, o programa criado no Grasshopper cria segmentos de reta sobre uma superfície, os quais são divididos obtendo-se os pontos dessa divisão. Estes pontos são utilizados para definir o centro dos furos. Na Figura 5.1, é esquematizado o processo de obtenção do padrão.

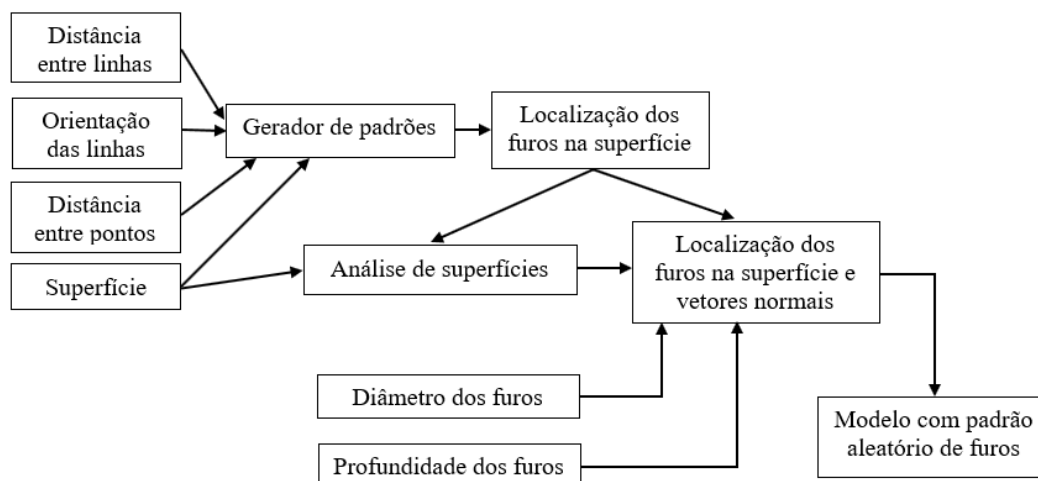


Figura 5.1 – Esquema da incorporação do padrão de furos.

Na Figura 5.2, é apresentada o modelo da peça durante a incorporação do padrão de furos, para uma melhor compreensão do padrão elaborado. Por se tratar de um caso de estudo, não serão aqui apresentados de novo os passos para a obtenção da programação dos percurso de maquinagem.

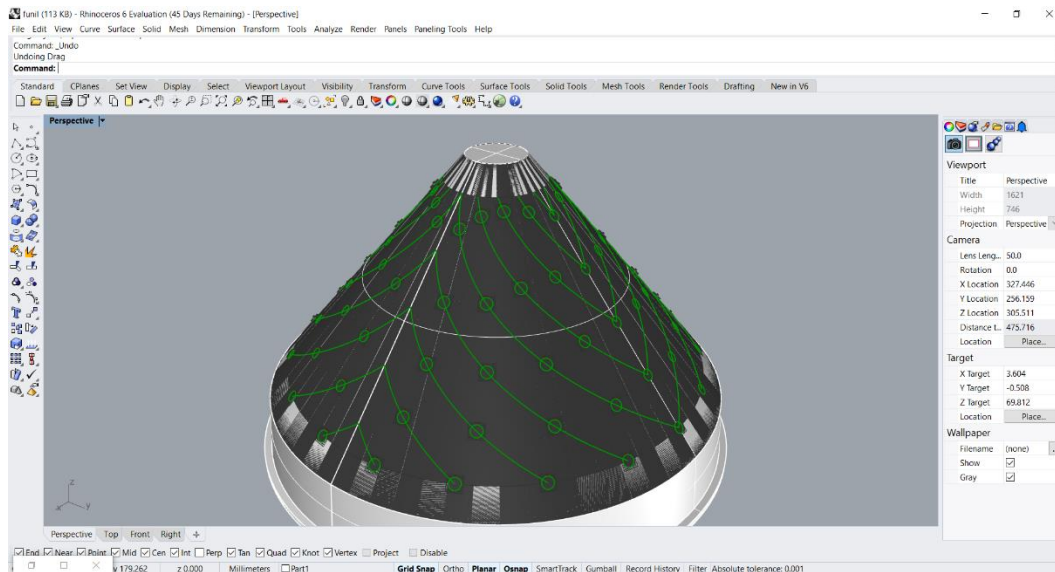


Figura 5.2 - Modelo da peça durante a incorporação do padrão de furos.

A célula utilizada para a realização das operações de maquinagem presente no laboratório de robótica é constituída pelos seguintes componentes:

- Robô ABB IRB 2400/16;
- Controlador ABB IRC5;
- Mesa posicionadora IRPB C-500;
- *Spindle* PDC XLC70;
- Controlador do *spindle*.

O robô ABB IRB 2400/16 é apresentado pelo seu construtor como o robô industrial mais popular do mundo, com um design compacto que facilita a sua instalação, a sua elevada fiabilidade, tendo um tempo médio entre manutenções bastante alargado, a sua elevada repetibilidade de posicionamento e de trajetória, de 0.03mm e 0.15mm respetivamente. O robô IRB 2400/16 apresenta uma estrutura de 6 eixos rotativos em série, um alcance até 1.55m e uma capacidade de carga até 20kg. Para as operações de furação, o robô foi equipado com um motor-árvore (*spindle*) XLC70 da Pession Drive Systems. Este *spindle* possui uma potência de 2.2 kW, atingindo uma velocidade máxima de 40000 rpm a uma frequência de 667 Hz, com um peso de 11kg. A fixação da ferramenta é realizada com um sistema pneumático. A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo com 6mm de diâmetro.

5.2 Procedimentos para a realização das operações de furação

Na definição dos parâmetros de maquinagem foi selecionada uma ferramenta com diâmetro de 6mm. A velocidade de avanço foi de 100 mm/s, sendo possível durante a execução das operações na célula real reduzir esse valor por ajuste na consola de programação. A velocidade de rotação é um parâmetro que se define no controlador do *spindle*, tendo sido utilizado um valor de 6000 rpm. Como podem existir diferenças entre a célula virtual e a célula real é necessário proceder à calibração do TCP da ferramenta e do referencial da peça.

Definição do referencial da ferramenta

A calibração do TCP é realizada pela utilização de um ponto fixo qualquer e o posicionamento do robô com a ferramenta nesse mesmo ponto, com distintas orientações, sendo utilizado uma função de calibração disponível na consola de programação.

Para a implementação na célula real, o TCP foi calibrado utilizando 5 pontos, ou seja, é necessário atingir o ponto definido através de 5 configurações distintas do robô. Quanto maior for a diferença entre as configurações utilizadas melhor será a calibração obtida. Na Figura 5.3, é ilustrado o processo de calibração, onde se pode observar o robô a atingir o ponto com uma determinada configuração.



Figura 5.3 - Calibração do TCP.

Definição do referencial da peça

A peça foi fixada sobre a mesa posicionadora com recurso a parafusos com anilha, aproveitando um rebordo existente da peça. Na programação das operações de maquinagem, o referencial da peça foi definido no centro da base da peça (Figura 5.4).

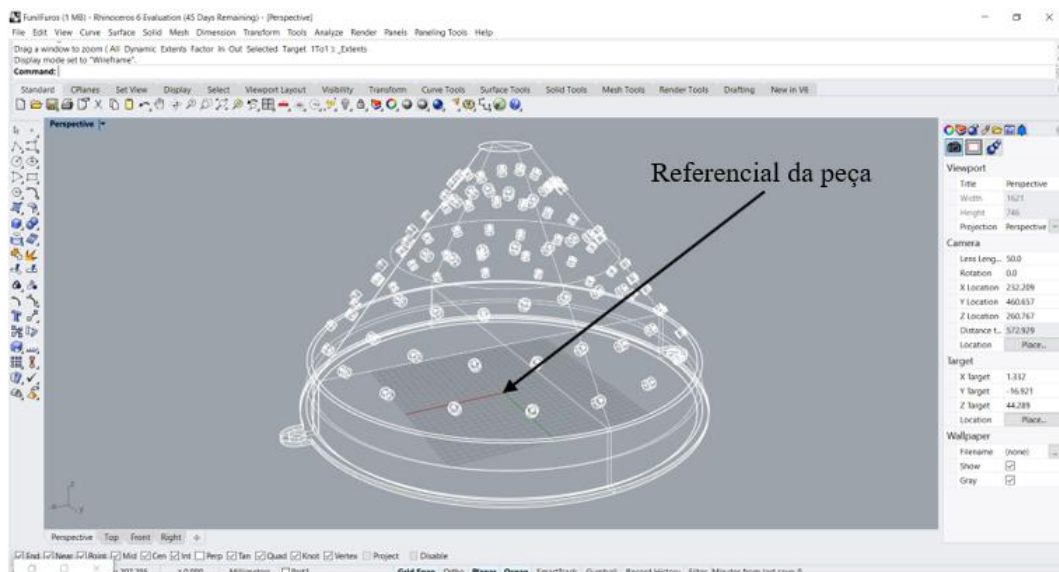


Figura 5.4 - Referencial da peça (peça em vista WireFrame).

Furação robotizada para criação de peças de design singulares

Para a sua determinação o robô foi utilizado como um sistema de medição. O robô foi movimentado para dois pontos da peça (Figura 5.5), de modo a determinar a localização desses pontos em relação ao referencial do robô. Depois de determinados os pontos é possível definir a localização do referencial da peça em relação ao robô.

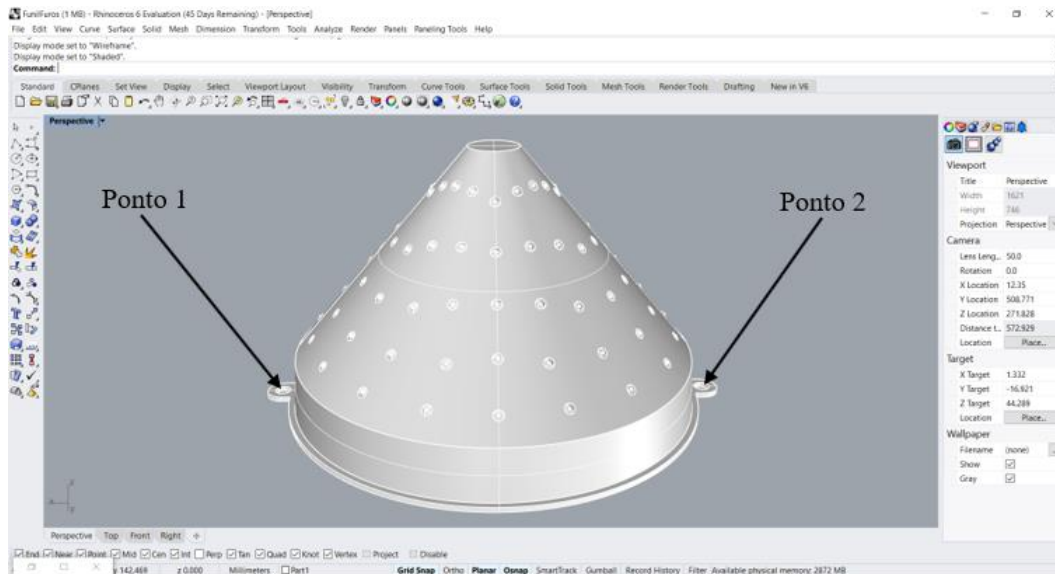


Figura 5.5 - Pontos a determinar pelo robô.

Por se tratar de uma peça simétrica, o referencial da peça encontra-se no meio de uma linha imaginária que liga os dois pontos (Figura 5.6).

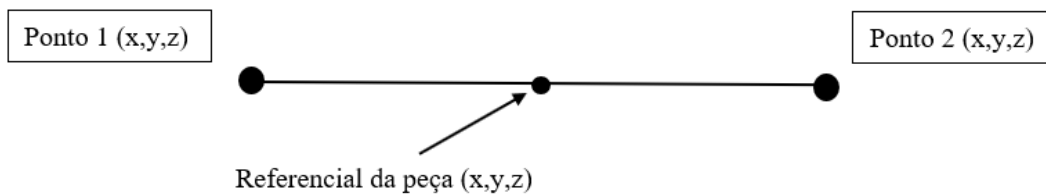


Figura 5.6 – Método para a determinação do referencial da peça.

Na Figura 5.7, podemos observar o robô posicionado num destes pontos.



Figura 5.7 - Robô a determinar a localização de um dos pontos.

Determinados o TCP e o referencial real da peça, procedeu-se à alteração destes parâmetros no programa Rapid e repetiu-se a simulação dos percursos no RobotStudio para uma nova validação.

5.3 Execução do programa

Após a edição e validação do programa, este foi inserido no controlador real do robô para execução das operações de furação. Após testes preliminares com a ferramenta e o material, foi decidido realizar a operação de furação da peça com a ferramenta a uma velocidade de rotação de 6000 rpm. Na Figura 5.8, está apresentada a peça final obtida.



Figura 5.8 - Peça final obtida por furação robotizada.

A partir de uma inspeção visual foi possível verificar que a execução do programa permitiu obter uma peça similar à do modelo criado no software CAD. O acabamento superficial da peça após as operações de furação não é perfeito, existindo rebarbas em alguns furos, que ficam coladas à superfície. Isto demonstra que ainda há espaço para melhorar os parâmetros de maquinagem, de modo a obter um melhor acabamento. Devido a geometria da peça (peça com parede de pequena espessura) e do seu material, durante as operações de furação ocorrem vibrações que contribuem para um pior acabamento dos furos. A fixação da peça por outro método pode diminuir a ocorrência destas vibrações e como resultado melhorar a peça final obtida.

6 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo determinar um procedimento para a obtenção de peças singulares através de furação robotizada. Para a obtenção de peças singulares, são incorporados padrões de furos, parametrizáveis, em modelos de peças concebidas anteriormente. Obtendo-se o modelo da peça singular, a furação é obtida com a utilização de uma célula robótica, programada para o efeito. Deste modo, é necessária a utilização de softwares CAD para obtenção do modelo da peça, softwares CAD/CAM para a definição de percursos de maquinagem, conversão de programas de controlo numérico para a linguagem de programação do robô e softwares de programação e simulação de robôs para a validação dos percursos gerados. Com a conclusão deste trabalho, foram cumpridos os objetivos propostos, desenvolvendo-se um procedimento eficiente para a partir do modelo de uma peça obter o modelo de uma peça singular e a programação de um robô para a obtenção da mesma através de operações de furação. Durante a elaboração do método foi possível determinar as suas limitações e obter algumas conclusões.

A utilização de softwares CAD para a incorporação expedita de padrões de furos é possível, e automatizável. Em particular, a utilização do software Rhinoceros e o seu *plug-in* Grasshopper, permite a programação da incorporação de padrões de furos, sendo possível obter uma variedade de peças singulares a partir da mesma peça inicial. A elaboração dos programas, dependendo do objetivo, pode ser demorada, porém após concluir o programa é possível utilizá-lo, de forma expedita, em qualquer modelo compatível com o Rhinoceros.

O Mastercam demonstrou ser uma ferramenta poderosa para a definição de percursos de maquinagem, permitindo a realização de uma grande variedade de operações (fresagem, furação, torneamento, entre outros) e a possibilidade de gerar códigos para um vasto leque de máquinas. Contudo, demonstra algumas limitações a nível das suas funcionalidades CAD e no tratamento de superfícies complexas. Estas limitações geraram a necessidade de editar os modelos das peças de forma a facilitar a definição dos percursos de maquinagem por criação de pontos nos centros dos furos. Por sua vez, a utilização destes novos elementos requer uma análise dos formatos de exportação dos modelos para o Mastercam de forma a assegurar a sua utilização, tendo sido possível através do formato STEP.

Definidos os percursos de maquinagem, é necessário gerar o programa na linguagem do robô. Para este efeito, foi utilizado um *add-on* de Mastercam, o Robotmaster. Esta ferramenta permite a definição do robô e da ferramenta a ser utilizada de uma forma simples, e a validação e simulação dos percursos definidos. Validados os percursos de maquinagem, o Robotmaster permite a geração de programas na linguagem de programação de um robô pelo pós-processamento do código CN referente às operações de maquinagem. É de destacar que os programas gerados não necessitam de alterações para a sua implementação nos softwares de programação e simulação dos robôs.

O software RobotStudio demonstrou ser fundamental na validação dos percursos de maquinagem obtidos com o Mastercam/Robotmaster. O robô utilizado tem, devido a fixação da ferramenta na extremidade do seu braço, uma limitação na amplitude de movimento do eixo 5, que não é de fácil definição no Robotmaster, mas pode ser facilmente estipulada no RobotStudio. Assim, o RobotStudio permite identificar e corrigir situações em que se verificam um problema decorrente dessa limitação do eixo 5.

Na implementação do programa gerado, a calibração da ferramenta e da peça são fundamentais para a correta implementação do processo de furação, bem como a efetiva fixação da peça.

O material da peça maquinada é de baixa dureza, material polimérico, o que tornou a operação de furação segura e de fácil execução. Contudo, pelo facto de se tratar de um polímero, obteve-se um acabamento menos perfeito dos furos, sendo necessária a remoção rebarbas que ficam coladas na superfície da peça. Apesar do acabamento dos furos, a realização das operações de furação foi bem sucedida obtendo-se uma peça final idêntica ao modelo digital da peça final.

Como trabalhos futuros sugere-se, a nível de software, a criação de padrões não circulares, a obter por operações de fresagem. O Rhinoceros demonstrou um vasto leque de possibilidades de incorporação de outras formas na superfície de uma peça (não só furos circulares). A criação destes padrões em peças requer uma análise da programação de operações de fresagem. Durante as operações de maquinagem foi observada a geração de um volume elevado de apra, pelo que se sugere como trabalho futuro a incorporação de um sistema automático de remoção de apra na célula robótica. Outra possibilidade, a nível de hardware, é a integração de um sistema de fixação de peças com um eixo de movimento auxiliar, tornando a fixação mais versátil e efetiva.

Referências

- [1] M. P. Groover, *Automation production systems and computer-integrated manufacturing*, 2ª ed., Prentice Hall Press, 2001.
- [2] “Executive Summary,” em *World Robotics 2018 Industrial Robots*, International Federation of Robotics, 2018.
- [3] D. Bouteille, N. Bouteille e S. Chantreuil, *Les Automatismes Programables*, 2ª ed., Toulouse: Cépaduès-éditions, 1997.
- [4] J. N. Pires, “Os Desafios da Robótica Industrial: da interdisciplinaridade às vantagens da cooperação entre empresas e universidades,” *Robótica*, vol. 51, pp. 14-17, 2003.
- [5] Y. Chen e F. Dong, “Robot Machining: Recent development and future research issues,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, nº 9-12, pp. 1489-1497, 2013.
- [6] J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stravropoulos e G. Chryssolouris, “Machining with robots: A critical review,” *Proceedings of DET2011*, pp. 1-9, 28 Setembro 2011.
- [7] H. Chen e Y. Song, “The development of a layer based machining system,” *Computer-Aided Design*, 33ª ed., pp. 331-342, 2001.
- [8] A. Weber, “Assembly Automation Takes Off in Aerospace Industry,” 2015. [Online]. Available: <https://www.assemblymag.com/articles/92790-assembly-automation-takes-off-in-aerospace-industry>. [Acedido em 30 Maio 2019].
- [9] J. DePree e G. C., “Robotic machining white paper project,” 2008. [Online]. Available: <https://www.robotics.org/robotics/halcyon-development-ria>. [Acedido em 28 Maio 2019].
- [10] R. Bogue, “The growing use of robots by the aerospace industry,” *Industrial Robot*, vol. 45, nº 6, pp. 705-709, 2018.
- [11] W. Zhu, W. Qu, L. Cao, D. Yang e Y. Ke, “An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, nº 9-12, pp. 2535-2545, 2013.
- [12] T. Wei, Z. Weixue, Z. Wei, L. Wenhe e Z. Yuanfan, “Auto-normalization algorithm for robotic precision,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 26, nº 2, pp. 495-500, 2013.
- [13] D. Rosa, J. Feiteira, A. Lopes e P. Abreu, “Analysis and implementation of a force control strategy for drilling operations with an industrial robot,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, pp. 4749-4756, 2017.
- [14] A. Derber, “Robots Finding Their Place In Aviation Aftermarket,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mro-network.com/technology/robots-finding-their-place-aviation-aftermarket>. [Acedido em 29 Maio 2019].

- [15] T. Olsson, M. Haage, H. Kihlman, R. Johansson, K. Nilsson, A. Robertsson, M. Bjorkman, R. Isaksson, G. Ossbahr e T. Brogardh, “Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback,” *Robotics and Computer-aided Manufacturing*, vol. 26, nº 1, pp. 24-38, 2010.
- [16] A. Nubiola, “When Aerospace Technology Meets Art,” 2019. [Online]. Available: <https://robodk.com/blog/accurate-robot-drilling/>. [Acedido em 3 Abril 2019].
- [17] “Natural Pattern,” 2013. [Online]. Available: <https://www.indiamike.com/india-images/pictures/natural-pattern>. [Acedido em 29 Maio 2019].
- [18] “Sarab,” [Online]. Available: <https://www.carpetvista.pt/tapete/sarab?artno=AXVZZZF1097>. [Acedido em 29 Maio 2019].
- [19] C. Bell, “Mastercam X5 Design Offers Many New Enhancements,” 2010. [Online]. Available: <https://www.mastercam.com/news/blog/mastercam-x5-design-offers-many-new-enhancements/>. [Acedido em 31 Maio 2019].