

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M 2016

REBARBAGEM EM CÉLULA ROBÔ ATRAVÉS DE PROGRAMAÇÃO OFFLINE EM CAM

SÉRGIO OLIVEIRA DA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO
PORTO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR

PROFESSOR VÍTOR MANUEL BRANCO MARTINS AUGUSTO

| | | |
|------------------|--------------------------|-----------|
| <i>CANDIDATO</i> | Sérgio Oliveira da Costa | 201104304 |
|------------------|--------------------------|-----------|

| | | |
|---------------|--|--|
| <i>TÍTULO</i> | Rebarbagem em Célula Robô através de Programação <i>Offline</i> em CAM | |
|---------------|--|--|

| | | |
|-------------|---------------------|--|
| <i>DATA</i> | 27 de Julho de 2016 | |
|-------------|---------------------|--|

| | | |
|--------------|---|--|
| <i>LOCAL</i> | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 10:00h | |
|--------------|---|--|

| | | | |
|-------------|-------------------|---|-----------|
| <i>JÚRI</i> | <i>Presidente</i> | Professora Doutora Laura Maria Melo Ribeiro | DEMM/FEUP |
|-------------|-------------------|---|-----------|

| | | | |
|--|-----------------|--|--------|
| | <i>Arguente</i> | Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas | DEM/UA |
|--|-----------------|--|--------|

| | | | |
|--|-------------------|---------------------------------|-----------|
| | <i>Orientador</i> | Professor Vítor Martins Augusto | DEMM/FEUP |
|--|-------------------|---------------------------------|-----------|

Resumo

A dissertação teve como objetivo a rebarbagem de peças de fundição na célula robótica do CINFU através de programação *offline* em CAM, *PowerMILL Robot Interface*, com a cinemática *part-on-robot*, ou seja, a peça fica montada no braço do robô, enquanto a ferramenta se encontra em posição estática.

O CINFU dispõe de uma célula robótica destinada a trabalhos programados em modo *teach-and-learn*, onde o operador conduz manualmente o robô ponto a ponto pela trajetória desejada. Esta programação permite a rebarbagem e o acabamento de peças produzidas em grande série quando as trajetórias necessitam de poucos pontos, mas é ineficiente no caso da produção em pequena ou média série e sempre que sejam imprescindíveis trajetórias complexas com muitos pontos. Assim sendo, com este trabalho de dissertação pretende-se criar uma metodologia capaz de permitir a programação *offline* da célula robótica do CINFU, recorrendo-se a uma aplicação CAM, *PowerMILL Robot Interface*, para calcular os percursos de ferramenta.

Desta forma seria possível a criação expedita de trajetórias complexas e sem ocupação da célula, situação ideal no caso da produção de pequenas e médias séries. Diversos obstáculos tiveram de ser ultrapassados para a obtenção dos resultados desejados, de destacar a adaptação da aplicação CAM à cinemática do robô e o alinhamento das peças fundidas, que pela natureza do processo de fabrico nunca têm um referencial perfeito.

Após o desenvolvimento da solução, foram produzidas quatro peças em alumínio por fundição em areia, tendo sido, posteriormente, três rebarbadas para se simular a rebarbagem automática de peças em série, e uma rebarbada manualmente. Finalmente, mediram-se os tempos associados aos dois tipos de rebarbagem (manual e em célula robótica) para analisar a eficiência e eficácia dos processos utilizados.

Palavras-chave

Rebarbagem, Célula Robótica, Programação *Offline* e *PowerMILL Robot Interface*.

Abstract

The objective of this thesis was deburring smelted aluminium workpieces using the robotic cell available at CINFU through offline CAM programming on PowerMILL Robot Interface and having the work cinematic set as part-on-robot. This means that the piece is fixed to the robot arm and is moved around a static cutting tool.

CINFU's robotic cell is intended for teach-and-learn programming where the user manually conducts the robotic arm through the desired path point by point. This programming allows for deburring and finishing of parts produced in large series if the path requires few points to be defined, but is inefficient when applied to small series of parts that require complex paths for the machining. That being the case, the work developed for this thesis intends to create a methodology that allows offline programming of the robotic cell using a CAM software, PowerMILL Robot Interface, to calculate the necessary tool paths.

Thus, the quick creation of complex trajectories would be possible without the use of the robot arm. This would be the ideal situation for the production of small to medium series. Several obstacles had to be surpassed to achieve the desired results, some of the more challenging were the adaptation of the CAM software to the robot cinematic and the alignment of the smelted parts that, due to the production method, never have a perfect referential.

After the development of the final solution, four aluminium parts were produced by sand casting and three of them were deburred on a part-on-robot cinematic and the fourth was deburred by hand. To conclude, the times for the manual and the robotic deburring were measured to verify which of the processes is the more efficient and more effective.

Agradecimentos

Aqui deposito a minha gratidão àqueles que prestaram o seu contributo, possibilitando a realização do trabalho, e também o seu melhoramento.

Agradeço, portanto, aos meus orientadores, especialmente ao Engenheiro Vítor Martins Augusto por toda a disponibilidade e abertura, por ter indicado o rumo desta dissertação. Agradeço também aos meus orientadores no CINFU, Engenheiro Filipe Cruz e ao Engenheiro Paulo Aguiar, pela formação prestada e auxílio nas tarefas lá desempenhadas.

Agradeço a recetividade do CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria da Fundição, e por me ter disponibilizado todo o equipamento e material de que necessitei durante a realização do projeto e também agradeço à NORCAM, que forneceu as licenças dos produtos utilizados, nomeadamente, *PowerMILL*, *PRI*, *PowerSHAPE* e *PowerINSPECT*.

Agradeço a todos os companheiros do curso, que acabaram por participar direta ou indiretamente e contribuíram para que este projeto fosse realizado.

Agradeço também a toda a minha família e namorada, por todo o apoio prestado no decorrer deste projeto e também no decorrer de todo o percurso académico.

Obrigado!

Índice

| | |
|--|------|
| Resumo | iii |
| Palavras-chave | iii |
| Abstract | iv |
| Agradecimentos | v |
| Lista de Figuras..... | viii |
| Abreviaturas e Siglas | xiii |
| Objetivo | 1 |
| Empresa | 1 |
| CINFU | 1 |
| NORCAM | 2 |
| Introdução..... | 2 |
| 1. Rebarbagem..... | 2 |
| 2. Célula robótica | 3 |
| 3. Célula robótica do CINFU | 6 |
| 3.4. Tipos de Programação | 11 |
| 4. Delcam..... | 11 |
| 4.1. Softwares utilizados..... | 12 |
| Componente Prática | 14 |
| 5. Maquinagem de peças em Poliuretano Expandido..... | 14 |
| 6. Produção das peças de fundição no CINFU | 29 |
| 7. Rebarbagem da Peça 1 | 32 |
| 8. Rebarbagem da Peça 4 - Manualmente | 39 |
| 9. Rebarbagem da Peça 3 | 42 |
| 10. Rebarbagem da Peça 2..... | 47 |

| | |
|--|-----|
| 11. Metodologia | 52 |
| 12. Discussão dos Resultados | 54 |
| Porquê <i>Part-on-robot</i> ?..... | 54 |
| Gabari..... | 55 |
| Maquinagem do <i>cowling</i> em poliuretano expandido | 55 |
| Produção de peças de Fundição | 56 |
| Rebarbagem das peças de Fundição..... | 56 |
| Metodologia | 57 |
| 13. Conclusão | 58 |
| 14. Sugestões para Otimização do Trabalho | 59 |
| Referências Bibliográficas | 61 |
| Anexo A..... | 63 |
| Anexo B..... | 70 |
| 1. Desenhar modelo CAD do Fundido | 72 |
| 2. Montagem da Peça de Fundição | 72 |
| 3. Ligar <i>PowerSHAPE</i> | 74 |
| 4. Alinhamento..... | 74 |
| 4.1 Alinhar GABARI | 75 |
| 4.2 Alinhar PEÇA..... | 81 |
| 5. Posicionamento no <i>PowerMILL</i> | 106 |
| 6. Programação do percurso de ferramenta em <i>PowerMILL</i> | 108 |
| 7. Pós-Processamento | 108 |
| 8. Montagem do Gabari | 111 |
| 9. Colocação de percursos no controlador do Robô..... | 112 |
| 10. Execução da Rebarbagem | 114 |

Lista de Figuras

Figura 1. Cinemática *part-on-table* [5].

Figura 2. Cinemática *part-on-robot* [5].

Figura 3. Cowling, feita a partir de um bloco de poliuretano expandido, apenas com operação de desbaste.

Figura 4. Render da parte móvel do gabari 1 em PowerSHAPE.

Figura 5. Render da parte fixa do gabari 1 em PowerSHAPE.

Figura 6. Render da parte móvel do gabari 2 em PowerSHAPE.

Figura 7. Render da parte fixa do gabari 2 em PowerSHAPE.

Figura 8. À esquerda, a garra de dois dedos do robô e à direita, as duas partes do gabari 2 já maquinadas a partir de blocos de alumínio.

Figura 9. Em cima, simulação em PRI onde se verifica o robô numa posição de singularidade de punho. Em baixo, verificam-se todos os erros de singularidade ao longo do percurso de desbaste utilizado para maquinar o cowling anteriormente com esta configuração do robô.

Figura 10. Em cima, simulação em PRI onde se verifica a configuração do robô. Em baixo, verifica-se que no percurso de desbaste utilizado para maquinar o cowling anteriormente com esta configuração do robô não existem quaisquer erros de singularidade.

Figura 11. Render da montagem do Gabari 3.

Figura 12. Diferentes vistas do render da montagem do Gabari 3.

Figura 13. Em cima, verifica-se todo o gabari 3 já maquinado, dividido nas partes que o constituem, e em baixo, verifica-se o gabari 3 montado e encaixado a um acessório do robô que liga à sua extremidade por via pneumática.

Figura 14. À esquerda verifica-se a peça fixa à parte móvel do gabari numa mesa junto ao braço Microscribe G2 para se fazer o alinhamento. À direita pode observar-se o CAD em PowerSHAPE das peças já alinhado.

Figura 15. Em cima, simulação em PRI onde se verifica a configuração do robô. Em baixo, verifica-se que no percurso de desbaste utilizado para maquinar o cowling anteriormente com esta configuração do robô não existem quaisquer erros de singularidade.

Figura 16. Execução do percurso de desbaste calculado em PRI na célula robótica do CINFU.

Figura 17. À esquerda, o cowling fixo à parte móvel do gabari numa posição diferente, e à direita o CAD do alinhamento do mesmo.

Figura 18. Em cima, à esquerda, simulação em PRI onde se verifica a configuração do robô e à direita, a maquinagem na célula robô do CINFU. Em baixo, verifica-se que no percurso de desbaste utilizado para maquinar o cowling anteriormente com esta configuração do robô não existem quaisquer erros de singularidade.

Figura 19. Maquinagem na célula robô do CINFU.

Figura 20. Placas molde utilizadas para fazer as quatro peças de fundição.

Figura 21. Cavidades moldantes das peças de fundição.

Figura 22. À esquerda, forno de cadinho a gás e à direita vazamento do alumínio nas moldações.

Figura 23. À esquerda, o cacho e à direita o corte de gitos.

Figura 24. À esquerda a granalhagem das peças e à direita as peças prontas para a rebarbagem.

Figura 25. Peça 1 de fundição fixa à parte móvel do Gabari.

Figura 26. Plano de trabalho alinhado segundo as retas de interseção dos planos.

Figura 27. À esquerda, a vermelho, verificam-se as zonas de onde foram captados os pontos, e à direita as geometrias construídas com os pontos captados.

Figura 28. Captação de pontos em zonas estratégicas para o alinhamento da peça 1 relativamente à parte móvel do gabari com o braço de medição 3D, Microscribe G2.

Figura 29. À esquerda verifica-se o CAD do alinhamento da Peça 1 e à direita a Peça 1 de fundição fixa à parte móvel do Gabari.

Figura 30. À esquerda, a simulação em PRI dos percursos Swarf e à direita a árvore do PRI com os percursos calculados.

Figura 31. Quadro do PRI de cálculo do plano de trabalho do robô.

Figura 32. Quadro dos parâmetros de pós-processamento no PRI preenchido para a primeira rebarbagem.

Figura 33. Peça 1 de fundição após a rebarbagem na célula robótica. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 20 minutos e 55 segundos.

Figura 34. Peça 1 de fundição após a rebarbagem na célula robótica.

Figura 35. À esquerda, com um martelo de cunha retiraram-se as rebarbas interiores e à direita no esmeril, retiraram-se as rebarbas da periferia.

Figura 36. Extração de rebarbas de difícil acesso com o rebolo.

Figura 37. Peça 4 de fundição após a rebarbagem manual. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 7 minutos e 41 segundos.

Figura 38. Peça 4 de fundição após a rebarbagem manual.

Figura 39. Peça 3 de fundição fixa à parte móvel do Gabari.

Figura 40. À esquerda verifica-se a Peça 3 de fundição fixa à parte móvel do Gabari e à direita o CAD do 1º alinhamento da Peça 3.

Figura 41. A verde verifica-se a estratégia de Acabamento Z Constante utilizada para rebarbar a peça 3. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Figura 42. À esquerda verifica-se a Peça 3 de fundição fixa à parte móvel do Gabari e à direita o CAD do 2º alinhamento da Peça 3.

Figura 43. A verde verificam-se as estratégias utilizadas para rebarbar a peça 3, à esquerda a estratégia de acabamento Swarf e à direita Z Constante. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Figura 44. Peça 3 de fundição após a rebarbagem na célula robótica. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 11 minutos e 31 segundos.

Figura 45. Peça 3 de fundição após a rebarbagem na célula robótica.

Figura 46. CAD do 1º alinhamento da Peça 2 de fundição.

Figura 47. A verde verificam-se as estratégias utilizadas para rebarbar a peça 2, à esquerda a estratégia de acabamento Swarf e à direita Z Constante. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Figura 48. À esquerda verifica-se a Peça 2 de fundição fixa à parte móvel do Gabari e à direita o CAD do 2º alinhamento da Peça 2.

Figura 49. A verde verificam-se as estratégias utilizadas para rebarbar a peça 2, à esquerda a estratégia de acabamento Swarf e à direita Z Constante. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Figura 50. Rebarbagem da Peça 2 de fundição na célula robótica do CINFU.

Figura 51. Peça 2 de fundição após a rebarbagem na célula robótica. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 6 minutos e 46 segundos.

Figura 52. Peça 2 de fundição após a rebarbagem na célula robótica.

Figura 53. Montagem da parte móvel do gabari à parte fixa do gabari com parafusos M5.

Figura 54. Fluxograma do processo de rebarbagem de peças de fundição através de programação *offline* em CAM.

Figura A1. À esquerda verifica-se a singularidade do cotovelo, no centro verifica-se a singularidade de alinhamento e à direita verifica-se a singularidade de pulso [6].

Figura A2. Representação esquemática do robô IRB 2400-16.

Figura A3. Representação esquemática dos eixos do robô IRB 2400-16.

Figura A4. O botão de cima é o de paragem de emergência, o do meio é o de ligação dos motores e em baixo de seleção do modo de funcionamento.

Figura A5. Correlação entre os movimentos do joystick e a movimentação do robô [9].

Figura A6. A laranja, botões de paragem de emergência da célula robótica do CINFU.

Figura A7. Render do gabari 1 em PowerSHAPE.

Figura A8. Render do gabari 2 em PowerSHAPE.

Figura A9. Render do acessório do Gabari 3 em PowerSHAPE em diferentes vistas.

Figura A10. Render do acessório do Gabari 3 em PowerSHAPE em diferentes vistas.

Figura A11. Render do Gabari 3 com diferentes vistas em PowerSHAPE.

Figura A12. Maquinagem do cowling na célula robótica do CINFU

Figura A13. Placas molde com pó de desmoldação e caixas de moldação.

Figura A14. Enchimento das caixas de moldação com areia de contacto e posterior prensagem.

Figura A15. Moldações prontas para o vazamento.

Abreviaturas e Siglas

2D - Bidimensional

3D - Tridimensional

CAD - *Computer Aided Design*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição

CNC - Controlo Numérico Computorizado

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

NC - *Numerical Control*

PRI - *PowerMILL Robot Interface*

Objetivo

A dissertação teve como objetivo a rebarbagem de peças de fundição na célula robótica do CINFU através de programação *offline* em CAM, *PowerMILL Robot Interface*. Nesse caso, foi realizado um estágio presencial no CINFU, que possibilitou o desenvolvimento do tema proposto e a familiarização com o ambiente industrial.

Esta dissertação dá continuidade ao trabalho de dissertação realizado por outro aluno, no ano anterior, “Implementação de solução CAM na célula robótica do CINFU” e também dá continuidade ao trabalho realizado pelo autor desta dissertação na unidade curricular “Seminário” no ano transato, “Aprendizagem de *PowerMILL* e *PowerMILL Robot Interface*”, e projeta novos desafios, sendo necessária a aplicação dos conhecimentos adquiridos anteriormente no seu desenvolvimento.

Assim sendo, com este trabalho pretende-se configurar a célula robótica do CINFU de forma a esta executar operações de rebarbagem em peças de fundição, utilizando o *PowerMILL Robot Interface* para calcular os percursos de ferramenta.

Empresa

CINFU

O CINFU, Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição, foi fundado em 24 de Abril de 1981 por um protocolo assinado entre o Instituto de Emprego e Formação Profissional (IEFP) e a Associação Portuguesa de Fundição (APF), tornando-se a 27 de Maio de 1987 num Centro de Gestão Participada.

O CINFU tem por objetivo a valorização do sector da fundição através da formação profissional dos seus ativos e daqueles que nele pretendam ingressar. Fornece formação profissional através de cursos de educação e formação de adultos, serviços de apoio às empresas, desenvolvimento de protótipos e ensaios mecânicos, químicos e metalográficos. É de realçar que o CINFU foi pioneiro em Portugal, na formação em CAD/CAM [1].

NORCAM

A NORCAM, Engenharia e Design Industrial, foi fundada em 1991 com o apoio do BIC do Porto, NET - Novas Empresas e Tecnologias S.A. e é uma empresa que se dedica à implementação de soluções industriais, como sistemas de CAD/CAM/CAE, prototipagem rápida, digitalizadores tridimensionais e outros meios tecnológicos avançados numa ótica de *Concurrent Engineering*.

A NORCAM integra um conjunto de especialistas com experiência comprovada, formando uma equipa coesa nas áreas de Design Industrial, CAD/CAM/CAE e CNC. Entre os produtos disponibilizados pela NORCAM estão os sistemas de CAD/CAM da *Delcam*, como o *PowerMILL*, *PowerSHAPE*, *PowerINSPECT* ou *FeatureCAM* [2].

Introdução

1. Rebarbagem

A rebarbagem é uma operação de acabamento de aplicação crucial em qualquer peça que tenha sido alvo de um processo de fundição, conformação plástica ou maquinagem. Após o processo de produção é habitual encontrarem-se irregularidades em arestas ou apenas saliências superficiais que necessitam de ser removidas.

Existem vários métodos de rebarbar uma peça, por processos mecânicos, químicos e térmicos. No presente trabalho, o que é interessante estudar, é o meio mecânico, uma vez que o objetivo é rebarbar peças de fundição numa célula robótica. Assim sendo, a operação de rebarbagem mecânica trata de eliminar defeitos através da passagem de uma ferramenta abrasiva constituída por partículas de material de elevada dureza contido numa matriz de um material ligante.

O resultado final da rebarbagem depende de vários fatores, nomeadamente, tipo de ferramenta, velocidade da ferramenta, características das partículas abrasivas, tipo de matriz ligante, pressão aplicada pela ferramenta na peça e velocidade relativa entre a peça e ferramenta.

A rebarbagem é uma operação que atribui qualidade superficial, funcionalidade e qualidade estética a uma peça, sendo também importante em termos de segurança no manuseamento, com a eliminação das irregularidades [3].

Com este trabalho de dissertação pretende-se substituir um operador que executa a etapa da rebarbagem por um robô, utilizando para isso, a programação *offline* em CAM. Isto traz muitas vantagens, tanto para as indústrias como para os operadores que serão mostradas de seguida. Este trabalho é inovador e muito complexo, e por consequência existem poucos estudos e artigos sobre o mesmo, o que dificultou bastante o desenvolvimento deste projeto.

2. Célula robótica

Inicialmente, a automatização das operações industriais foi feita com máquinas simples e dedicadas a uma única operação, o que não obteve grandes resultados práticos, ou seja, qualquer alteração no processo ou tarefa desempenhada implicava enormes custos na alteração da máquina.

Posteriormente, surgiu a tecnologia CNC com a qual se conseguiram alcançar alguns resultados mais práticos, estas máquinas apresentam elevada rigidez, o que permitia grandes forças de contacto e tolerâncias mais apertadas. A variação da tarefa desempenhada pela máquina já não era um problema, havendo a necessidade de mudar a ferramenta, se necessário, e de carregar um novo programa para a memória do controlador. No entanto, no caso da rebarbagem, por exemplo, como as máquinas CNC têm menos graus de liberdade que um robô, apresentam restrições de acesso para algumas geometrias e baixa flexibilidade operacional, sendo normalmente usadas para uma só operação. Sendo assim, o uso destas máquinas ficou-se por grandes lotes de peças com geometria simples e continuou-se a usar mão-de-obra humana qualificada em peças de maior complexidade geométrica. Com o desenvolvimento tecnológico, os requisitos de qualidade das peças produzidas e os prazos de entregas passaram a ser mais apertados, o que não é possível conquistar com uma linha de produção que depende largamente de operações manuais.

Perante todos estes requisitos começou-se a pensar em introduzir os robôs industriais em células robóticas para operações de rebarbagem, uma vez que com a célula robótica, pode conseguir-se a flexibilidade humana, aliada à capacidade de produção de uma máquina CNC [3].

Uma célula robótica é constituída por vários elementos, sendo eles, o robô, o controlador do robô, uma garra ou uma ferramenta, o sistema de alimentação, o sistema de posicionamento dos produtos, o sistema de segurança e o sistema de controlo da célula.

Estas células têm múltiplas aplicações, nomeadamente, soldadura por arco, corte, rebarbagem, selagem, colagem, polimento, medição, manuseamento de materiais e maquinagem.

2.1. Vantagem sobre trabalho manual e centros de maquinagem de 5 eixos

Economicamente, a aplicação de robôs em operações de rebarbagem possibilita a redução óbvia de custos com mão-de-obra dando também origem a uma melhor utilização das ferramentas e de outros consumíveis, com redução dos custos que lhe estão associados. Outra vantagem é a rapidez com que o robô executa as tarefas designadas possibilitando a redução dos tempos de produção.

Comparando com operários especializados ou com outras máquinas dedicadas, a célula robótica apresenta um investimento com um bom rácio preço/performance. Como a rebarbagem é feita utilizando mão-de-obra, e como as pessoas não têm sempre o mesmo desempenho, com o robô pode-se prever melhor o futuro, e também atingir melhores resultados de desempenho. De outra perspectiva, o robô vem substituir o homem, nesta tarefa dolorosa e repetitiva, que implica ruído, vibrações, poeira, projeção de fragmentos, libertação de gases tóxicos, etc, tudo causas de implicações na saúde humana, tanto a curto como a longo prazo, evitando-se assim lesões e doenças a nível profissional.

A qualidade final do processo de rebarbagem também sai melhorada quando a operação é realizada por um robô, uma vez que este permite elevada repetibilidade associada a uma boa precisão de movimentos. Sendo que um robô

industrial pode possuir seis graus de liberdade, numa aplicação antropomórfica garante um melhor manuseio da peça podendo lidar-se com peças de elevada complexidade geométrica, sendo esta, uma enorme vantagem sobre os centros de maquinagem com 5 eixos.

Deste modo a célula robótica é uma alternativa atraente, comparadas às máquinas CNC de cinco eixos, podendo ser empregadas em todas as tarefas que exigem maior dinâmica, velocidade do processo e precisão [3].

2.2. Cinemática *part-on-robot* - Vantagens sobre *part-on-table*

Existem duas cinemáticas possíveis, para um robô rebarbar uma peça:

- *Part-on-robot*, onde a peça fica montada no braço do robô, sendo manipulada por este, enquanto a ferramenta se encontra em posição estática. Esta cinemática é a mais adequada à rebarbagem de peças, uma vez que há maior liberdade de movimento. Quando se opera com a cinemática *part-on-robot*, o referencial do sexto eixo é utilizado como referência para criar objetos de trabalho, enquanto os planos de trabalho da ferramenta são criados a partir do referencial *World* (ver Figura 2) [4].

- *Part-on-table*, onde ocorre a situação contrária, o robô segura a ferramenta e a peça encontra-se fixa. Quando se opera na cinemática *part-on-table*, o referencial do sexto eixo é utilizado como referência para criar os planos de trabalho da ferramenta enquanto os objetos de trabalho são criados a partir do referencial *World* (Figura 1) [4].

A cinemática *part-on-robot* tem algumas vantagens sobre a cinemática *part-on-table*, nomeadamente a maior liberdade de movimento, uma vez que o robô segura a peça, o que permite a execução de percursos mais complexos. Outra vantagem é a maior rigidez e robustez da ferramenta, uma vez que esta se encontra estática e fixa numa bancada.

2.3. Singularidades

Uma singularidade pode ocorrer quando o robô se encontra numa posição em que existem múltiplas possibilidades para o próximo movimento, ou quando um eixo tem de tomar uma velocidade infinita. Por definição, uma singularidade é uma

dificuldade do mecanismo interno do robô em movê-lo para a posição seguinte, se o mesmo se encontrar numa de três posições específicas. Normalmente, o robô pára quando chega a uma posição de singularidade [6,7]. Existem três tipos de singularidades:

- Singularidade de cotovelo, que é quando o robô se encontra numa posição em que o braço está totalmente estendido, que normalmente deve-se ao alinhamento dos eixos 2,3 e 5 (figura A1 no anexo A) [6,7];
- Singularidade de alinhamento, que se dá quando os eixos 1 e 6 se encontram alinhados (figura A1 no anexo A) [6,7];
- Singularidade de pulso, que se deve ao alinhamento dos eixos 4 e 6 (figura A1 no anexo A) [6,7].

3. Célula robótica do CINFU

3.1. Estrutura

A célula robótica do CINFU é constituída pelo robô ABB IRB 2400-16 de 6 eixos, por uma bancada com suporte de fixação de *spindle*, por uma mesa de calibração e suporte de ferramentas e também por uma célula de segurança. A célula possui um controlador com uma consola portátil, *FlexPendant*, de ecrã tátil e com um *joystick* que permite movimentar o robô manualmente, programar e executar rotinas de trabalho bem como operações de troca e calibração de ferramentas.

Inicialmente o robô foi adquirido pelo CINFU para programação *teach & learn*.

3.1.1. Robô

O robô industrial ABB IRB 2400-16 de 6 eixos é, provavelmente, dos robôs mais populares e utilizados na indústria pois apresenta alta eficiência na realização de diversas tarefas industriais, como o manuseamento de materiais e a aplicação em processos como soldadura por arco, corte, rebarbagem, colagem, selagem, moagem e polimento.

Tem uma capacidade de carga de 20 Kg e um alcance de 1,55 m e possui 6 eixos de rotação, tendo o eixo 6 um movimento ilimitado. Na Figura A2 do Anexo A

pode observar-se uma representação esquemática do robô e na Figura A3 do Anexo A os seus eixos de rotação [8].

3.1.2. Controlador da célula

Encontram-se no controlador da célula robótica o interruptor de ligação da célula, o seletor de modo de operação (manual, manual 100% e automático), o botão de acionamento dos motores do robô, entradas USB e o botão de paragem de emergência. Um dos componentes mais importantes da célula robótica, o *flexPendant*, é a unidade de programação e manipulação do robô, é uma unidade portátil que o utilizador deve transportar sempre consigo quando procede a operações com o robô. Possui um *joystick* com 3 graus de liberdade, o que significa que o robô pode ser movido em três direções diferentes simultaneamente segundo vários referenciais disponíveis, bem como um ecrã tátil para interação com o *software* do controlador. A velocidade do robô é proporcional à deflexão do *joystick*, mas nunca superior a 250 mm/s. É no *flexpendant* que se procede à programação de rotinas, calibração de ferramentas e criação de objetos de trabalho. Este equipamento possui também um botão de segurança conhecido como “botão do homem morto” que é responsável por acionar os motores do robô [9].

3.2. Descrição da movimentação do robô

O principal objetivo do *software* presente no controlador da célula robótica é o controlo dos movimentos do robô de forma a posicioná-lo corretamente consoante a tarefa que se pretende executar.

3.2.1. Modos de funcionamento do controlador

O controlador presente na célula robótica do CINFU permite três modos distintos de funcionamento: manual, manual 100% e automático. Para se selecionar o modo de funcionamento com que se pretende trabalhar, roda-se uma chave de segurança no controlador de acordo com o desejado, ver Figura A4 do Anexo A [9].

Em modo **manual** os movimentos do robô são controlados pelo *joystick* do *flexpendant* e os motores apenas se ativarão quando o “botão do homem morto”

estiver pressionado na posição intermédia. Este modo é utilizado para programação, verificação de rotinas e para reposicionamento do robô. Quando se opera em modo manual, o operador encontra-se perto do robô durante a sua manipulação. Para segurança dos operadores, a velocidade dos movimentos lineares do robô está reduzida para, no máximo, 250 mm/s conferindo assim uma maior segurança quando são executadas operações de alta precisão e que requerem proximidade ao robô para um melhor controlo. As operações normalmente feitas em modo manual são *jogging*; criação e edição de programas em *Rapid* e iniciar e parar a execução de programas. Este é, portanto, o modo mais seguro para se manipular o robô quando o utilizador se encontra perto dele [9].

Em modo **automático** a função de segurança do “botão do homem morto” é ignorada e o robô opera à velocidade máxima sem qualquer interferência humana. A execução de programas apenas pode ser parada através do botão de stop do *flexpendant* ou dos botões de paragem de emergência presentes no controlador e no *flexpendant*. Não é possível programar nem movimentar o robô usando o *joystick* enquanto este modo se encontra selecionado. Este é o modo de funcionamento do robô em serviço [9].

Em modo **manual 100%** o robô movimenta-se à velocidade máxima indicada no programa. Para além disso, para um programa ser executado é necessário pressionar o “botão do homem morto” na posição intermédia e também o botão *play* do *flexpendant*. Largar o “botão do homem morto” resulta na interrupção imediata da rotina. Devido à perigosidade do robô a funcionar à velocidade máxima, este modo insere um nível de segurança extra permitindo observar uma rotina a 100% da sua capacidade. Neste modo não é possível programar nem alterar parâmetros do sistema, servindo apenas para execução e verificação de programas [9].

3.2.2. Jogging

Para se movimentar o robô, é fundamental indicar segundo que referencial será feito este movimento. O termo *jogging* é usado para descrever a movimentação do robô e, geralmente, é feito de uma das seguintes formas:

- Movimentos eixo a eixo - neste tipo de movimentação seleciona-se qual o conjunto de eixos que se pretende manipular (1-2-3 ou 4-5-6) e move-se o *joystick* numa das suas 3 direções resultando na movimentação desse eixo (ver Figura A5 no Anexo A);
- Movimentos lineares - movimentação do eixo de ferramenta ativo nas direções X, Y e Z do objeto de trabalho selecionado (ver Figura A5 no Anexo A);
- Reorientação - o robô reorienta o eixo de ferramenta em torno de si próprio, mantendo as coordenadas da ponta da ferramenta sendo que apenas a inclinação do plano da ferramenta é afetada. Este método é mais comum para reorientação de ferramentas montadas no robô (ver Figura A5 no Anexo A) [4,9,10].

3.2.3. Referenciais

O robô possui por defeito dois referenciais definidos pelo fabricante sobre os quais efetua os seus movimentos: *World* e TCP (*tool attachment point*). O referencial *World* está geralmente na base do robô.

A frente do robô é na direção +X do referencial, Y é a direção perpendicular horizontal e Z a direção vertical, segundo a regra da mão direita. O referencial TCP está localizado na extremidade do último eixo do robô e é o local onde geralmente se acoplam as ferramentas, podendo estas serem garras, ponteiras, *spindles*, marcadores, sondas, elétrodos, prensas, entre outros. No caso do robô do CINFU, o referencial TCP está localizado na extremidade do sexto eixo e no controlador é sempre denominado dessa forma: o sexto eixo [4,9,10].

3.2.4. Cinemática

A célula robótica pode operar segundo duas cinemáticas diferentes: *part-on-robot* ou *part-on-table*. Na cinemática *part-on-robot*, o robô segura a peça enquanto a ferramenta se encontra fixa. Na cinemática *part-on-table*, ocorre a situação contrária, o robô segura a ferramenta e a peça encontra-se fixa, ver Figura 1. Quando se opera com a cinemática *part-on-robot*, o referencial do sexto eixo (a vermelho no lado direito da Figura 2) é utilizado como referência para criar objetos de trabalho, enquanto os planos de ferramenta são criados a partir do referencial *World* (a

vermelho no lado esquerdo da Figura 2). Quando se opera na cinemática *part-on-table*, o referencial do sexto eixo (TCP - a vermelho na Figura 1) é utilizado como referência para criar os planos de ferramenta (a amarelo na Figura 1) enquanto os objetos de trabalho são criados a partir do referencial *World* (a verde na Figura 1). Este conjunto de regras resulta da característica única dos robôs ABB de reconhecer sempre a verdadeira ferramenta. Outras marcas consideram como ferramenta o objeto preso ao sexto eixo, quer seja uma peça ou uma ferramenta [4,10].

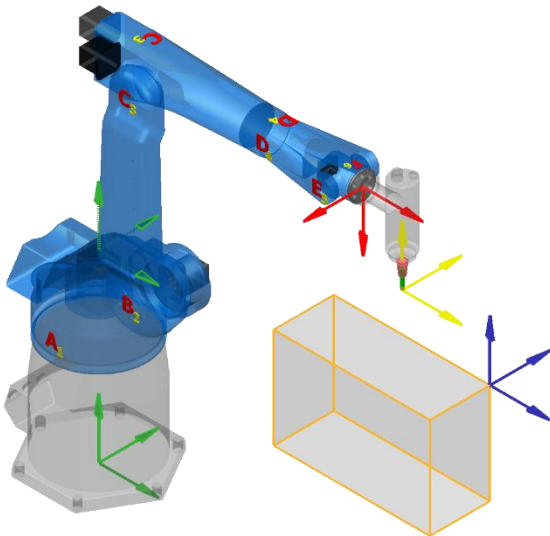


Figura 1. Cinemática *part-on-table* [5].

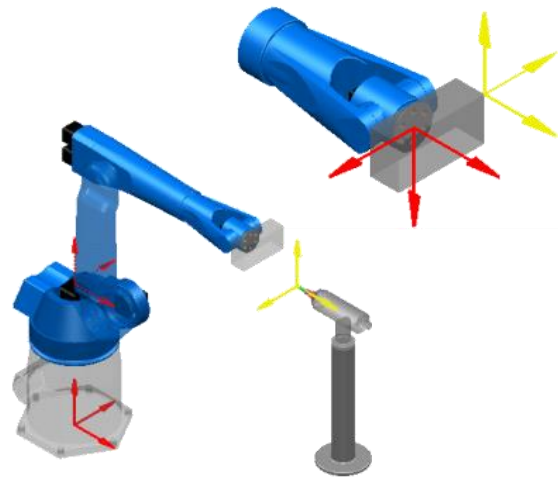


Figura 2. Cinemática *part-on-robot* [5].

3.3. Segurança

Quando se trabalha em modo manual, deve ter-se em atenção a distância a que se está do robô e, sempre que possível, mantermo-nos fora da área de alcance deste a fim de evitar possíveis acidentes.

De forma a minimizar o risco de acidentes existe o “botão do homem morto” no *flexpedant*. Quando pressionado até meia distância este ativa os motores permitindo a movimentação do robô. Caso o botão seja pressionado na totalidade ou largado, o robô automaticamente desliga os motores e interrompe o movimento. Isto é válido para os modos manual e manual 100% caso estejam a ser executados movimentos com o *joystick* ou esteja a correr uma rotina de trabalho. Em modo automático, é estritamente proibida a presença dos operadores dentro da célula.

Existem também, quer no *flexpendant* quer no exterior da célula, botões de paragem de emergência que imediatamente desligam os motores do robô e interrompem as operações que estejam a decorrer, ver Figura A6 no Anexo A [4].

3.4. Tipos de Programação

3.4.1. Programação *offline*

A programação *offline* é feita com o auxílio de um software CAM tridimensional num computador sem se recorrer ao controlador do robô. Deste modo não se ocupa a célula robótica na programação das rotinas, sendo muito mais rápido e adequado para programação de operações de maquinagem.

Existem vários *softwares* que permitem programar rotinas para os robôs, entre eles, o *PowerMILL Robot Interface* [4,9].

3.4.2. Programação *Teach & learn*

Na programação *teach & learn* o operador desloca manualmente o robô para cada posição pretendida, memorizando-a de forma a criar assim uma trajetória, sendo necessário recorrer-se ao controlador do robô.

Este processo é lento, ocupando a célula robótica durante o processo de programação. A programação *teach & learn* não é adequada para realizar operações de maquinagem, uma vez que o número de pontos necessários é enorme, o que demoraria um tempo interminável.

Este tipo de programação é muitas vezes útil na programação de percursos simples, como na deslocação para a posição de troca de ferramenta ou para a posição de segurança [4,9].

4. Delcam

A *Delcam* é um dos principais fornecedores mundiais de soluções avançadas para CAD/CAM na indústria de transformação. Foi fundada em 1977 após um desenvolvimento inicial na Universidade de *Cambridge*, Reino Unido, e em 2014 foi adquirida pela *Autodesk*. A empresa tem crescido constantemente, fornecendo

soluções completas de CAD/CAM automatizadas na gama do *design*, produção e inspeção, para transformar produtos sob a forma de idealização em produtos reais.

A *Delcam* é constituída por uma equipa com cerca de 800 pessoas, fornecendo suporte local na América, Europa e Ásia a partir de mais de 300 escritórios que têm espalhados pelos continentes anteriormente referenciados. O *software* da *Delcam* é utilizado por mais de 50.000 organizações em mais de 80 países [11,12,13,14].

4.1. Softwares utilizados

4.1.1. *PowerSHAPE*

O *PowerSHAPE* é uma aplicação CAD de modelação tridimensional, desenvolvida pela *Delcam*, atual *Autodesk*.

Esta aplicação permite criar formas complexas através da combinação de sólidos híbridos, superfícies e modelos de arames. O *PowerSHAPE* desfruta de diversas características que promovem o aumento da produtividade. Essas características são o cursor inteligente, as “*Power Surfaces*”, o “*Smart Surfacers*”, a modelação direta de sólidos, o uso do núcleo matemático de *Parasolids*, a facilidade na importação e correção de outros modelos de outras aplicações CAD compatíveis. Também permite a importação de dados de nuvens de pontos tridimensionais para conversão em modelos tridimensionais. Além disso o *PowerSHAPE* ainda inclui módulos especializados para a criação de elétrodos, engenharia inversa, montagem e *design* de moldações [15,16,17,18].

Tudo isto, faz do *PowerSHAPE* uma aplicação de peso no mercado Mundial.

4.1.2. *PowerMILL*

PowerMILL é um *software* CAM tridimensional para programação de percursos de ferramentas em aplicações de 3 a 5 eixos desenvolvido pela *Delcam*, atual *Autodesk*. É um *software* completo, permitindo o desenho 2D e 3D e processamento de trajetórias de maquinação em sistemas multi-eixos, máquinas de eletroerosão, permitindo também a simulação da trajetória para testar possíveis colisões e verificação do percurso. Com este *software* pode definir-se o tipo de ferramenta a

utilizar e definir-se várias estratégias de desbaste, re-desbaste e acabamento que serão utilizadas no centro de maquinagem.

Mais de 15 000 organizações utilizam *PowerMILL* em todo o mundo para a maquinagem de 3 e 5 eixos [11,16,19,20].

4.1.3. *PowerINSPECT*

O *PowerINSPECT* é uma solução de inspeção baseada em CAD para uso com vários tipos de *hardware* de inspeção, nomeadamente CMMs manuais e CNC, braços portáteis, dispositivos de medição ótica e máquinas ferramenta CNC (OMV).

O *PowerINSPECT* permite criar rapidamente uma inspeção completa e gerar automaticamente um relatório de alta qualidade utilizando o formato HTML ou o *Microsoft Excel*. Os relatórios de inspeção podem ser personalizados para incluir dados estatísticos, tabulados e pictóricos, satisfazendo os requisitos de *design* e padrões internacionais. São fornecidos resultados instantâneos durante a inspeção, e sinais na área gráfica ou auditivos proporcionam um feedback imediato para cada ponto medido.

O *PowerINSPECT* suporta modelos criados por outros produtos *Delcam* e modelos de formatos neutros como *IGES*. Caso os conversores *Exchange* relevantes sejam adquiridos, o *PowerINSPECT* pode importar dados criados pela maioria dos pacotes não-*Delcam*, tais como *CATIA*, *Unigraphics*, *SolidWorks* e *IDEAS*.

A interface do utilizador é intuitiva e fácil de usar, e a curva de aprendizagem é curta, permitindo que o operador obtenha o máximo do dispositivo de medição no menor tempo possível.

O *PowerINSPECT* oferece também a comparação com todos os formatos CAD convencionais; alinhamento rápido, mesmo para formas livres complexas; medições simples e rápidas entre elementos; habilidade de inspecionar seções definidas pelo utilizador; habilidade de inspecionar ao longo da aresta de uma peça; recursos completos de inspeção geométrica; criação automática de elementos de inspeção a partir de nominais CAD; habilidade de aplicar dimensionamento e tolerância geométrica (GD&T); exportação de pontos, modelo de arames e superfícies para

entidades medidas; manipulação de CAD, incluindo *offset* de superfície e medição sem dados CAD [21].

Componente Prática

Para a rebarbagem das peças de fundição, foi necessário, inicialmente, definir-se uma metodologia para preparação para a rebarbagem, a qual consistia inicialmente no seguinte: primeiro seria feita uma fixação da peça a um gabari; depois fazia-se o alinhamento da peça para se saber a sua posição durante o cálculo do percurso da ferramenta; de seguida calculava-se o percurso de ferramenta no *software PowerMILL*. Passava-se então à simulação e se não existirem singularidades, colisões ou facadas, passa-se para o pós-processamento. Finalmente introduz-se o programa no controlador do robô e executa-se a rebarbagem na célula robótica.

5. Maquinagem de peças em Poliuretano Expandido

Para se simular a rebarbagem de fundidos, uma vez que quando estes são fixos, têm sempre ligeiros desalinhamentos, entre peças da mesma referência decidiu-se utilizar uma peça (*Cowling* - ver Figura 3) em poliuretano expandido já maquinada, e posicioná-la em duas maneiras distintas, de seguida, alinhar e simular corretamente no *software PowerMILL Robot Interface* um percurso de ferramenta, percurso esse, que era o mesmo que lhe deu origem.

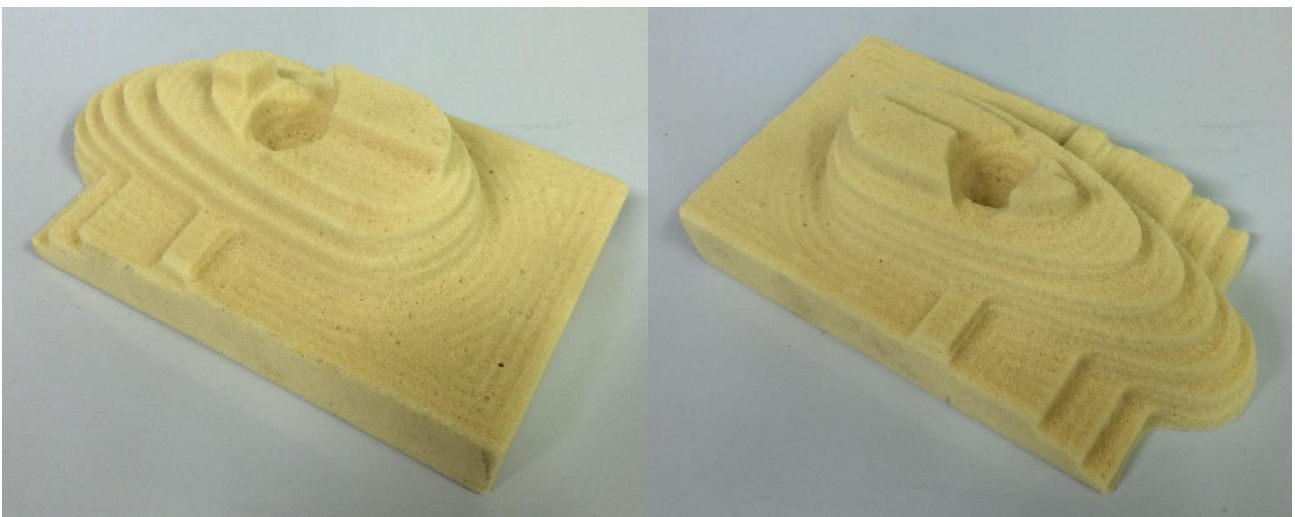


Figura 3. *Cowling*, feita a partir de um bloco de poliuretano expandido, apenas com operação de desbaste.

Com o alinhamento correto, com o mesmo percurso de ferramenta e com a mesma ferramenta, durante a operação, a ferramenta nunca deverá colidir ou penetrar a peça enquanto percorre o percurso calculado, verificando-se assim, que é possível alinhar a peça no PRI e executar operações de rebarbagem no robô, que segura as peças de fundição sempre de modo diferente.

Para se fazer o alinhamento, o CINFU possui um braço de medição 3D, *Microscribe G2*, e como a garra do robô não é ideal para segurar a peça de poliuretano expandido, decidiu-se construir um gabari constituído por 2 partes, uma fixa que irá estar fixa ao robô sempre na mesma posição, e outra parte móvel, que servirá para fazer o alinhamento com a peça em questão numa bancada junto ao braço de medição 3D, sabendo a posição da peça relativamente à parte móvel do gabari, e sabendo que as duas partes do gabari encaixam sempre do mesmo modo, consegue-se alinhar a peça no *PowerMILL* de modo ao percurso de ferramenta real ser exatamente o programado no *software*.

Gabari 1

Para isto, inicialmente começou-se por desenvolver um gabari constituído por 2 partes: uma **fixa**, que irá ficar presa, sempre do mesmo modo ao robô, e outra **móvel**, onde se poderá fixar a peça a ser maquinada.

Necessitou-se de uma parte móvel do gabari, uma vez que, para se posicionar corretamente a peça no PRI, só se tinha disponível um braço de medição, *MicroScribe G2*, e através da aquisição das cotas de pontos estratégicos é possível saber-se a posição da peça relativamente à parte móvel do gabari, e como a parte móvel do gabari encaixaria de maneira conhecida e única na parte fixa do gabari, que está presa ao robô, é possível alinhar-se e posicionar-se a peça no PRI. Assim sendo, fixa-se a peça à parte móvel do gabari, depois, com o auxílio do braço de medição alinha-se a peça relativamente à parte móvel do gabari e importa-se esse alinhamento para o PRI, podendo calcular-se o percurso de ferramenta de acordo com os posicionamentos reais.

Começou-se então, por modelar o gabari, ver Figura A7 no Anexo A, com a parte móvel e a parte fixa e com um sistema de encaixe rápido entre elas, em que

a parte fixa possuía saliências (ver Figura 5) e a parte móvel possuía o negativo dessas saliências (ver Figura 4).

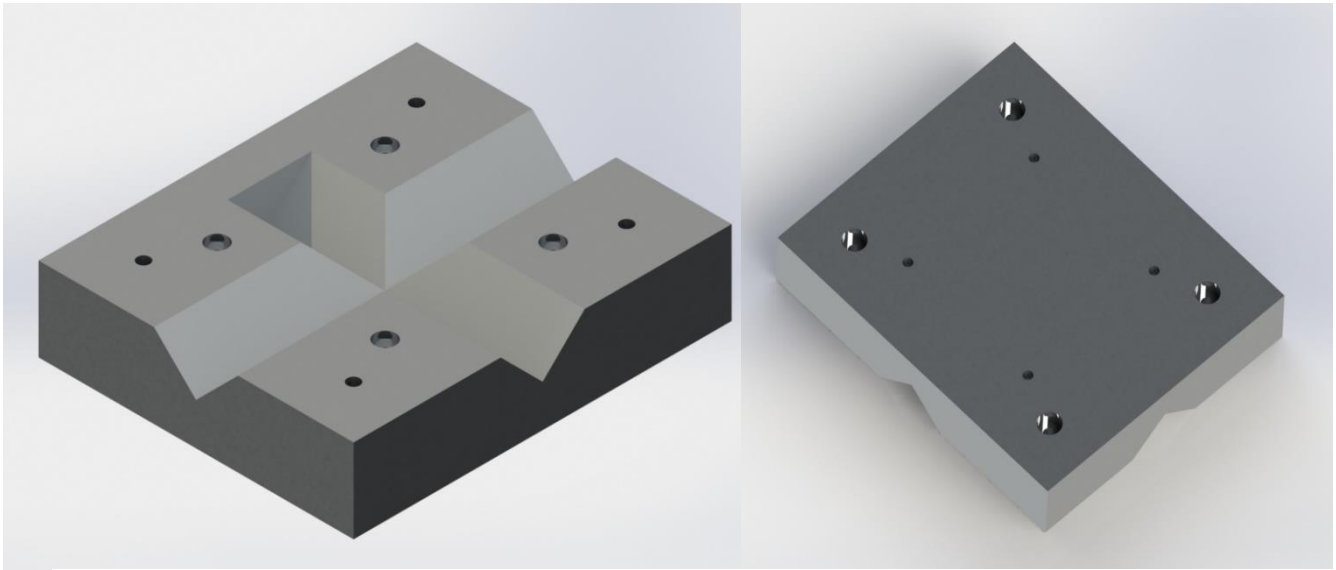


Figura 4. Render da parte móvel do gabari 1 em PowerSHAPE.

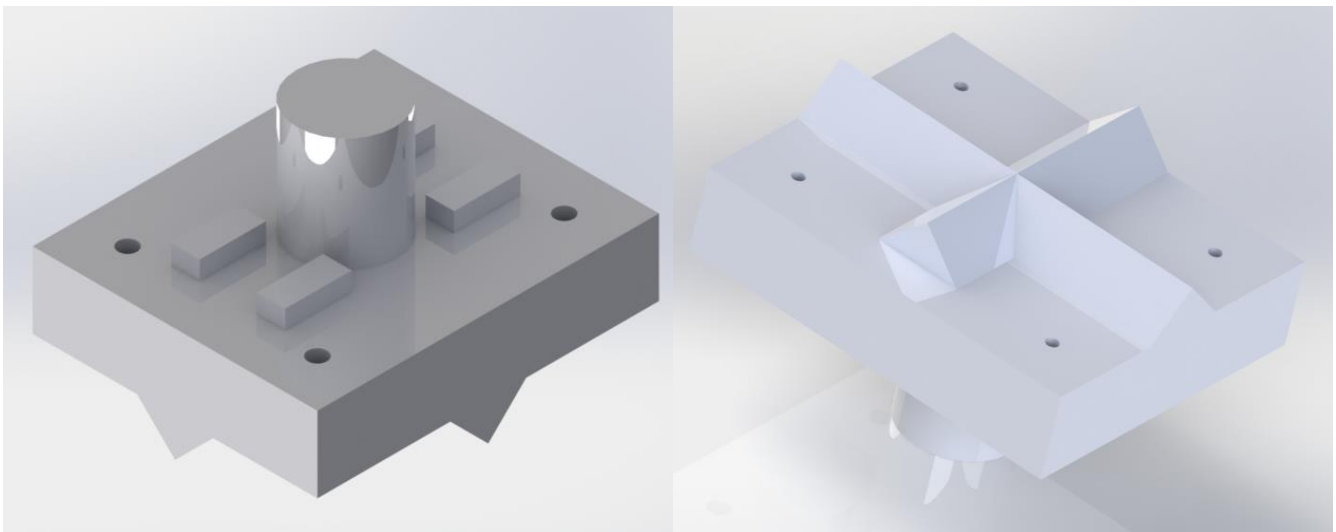


Figura 5. Render da parte fixa do gabari 1 em PowerSHAPE.

Depois de modelado, procedeu-se a algumas otimizações, uma vez que o gabari apresentava alguns problemas:

- Possuía esquinas que iriam dificultar o encaixe caso a maquinagem não estivesse devidamente feita, sendo necessária, eletroerosão para algumas zonas da peça, o que iria tornar caro o fabrico do gabari;

- Demasiado grande (comprimento de 180 mm, largura de 150 mm e altura de 80 mm, sem contabilizar o cilindro), o que não era necessário, ocupando capacidade de carga do robô, que poderia ser utilizada para maquinar peças mais pesadas;
- Continha uma zona central inútil, difícil de maquinar, e que iria dificultar o encaixe das duas partes do gabari.

Gabari 2

Deste modo, otimizou-se o gabari, ver Figura A8 no anexo A:

- Mais pequeno, desta vez com um comprimento e largura de 110 mm e altura total de 60 mm, e conseqüentemente, mais leve, restando mais carga para se utilizar na rebarbagem de peças mais pesadas;
- Retiraram-se as zonas inúteis e difíceis de maquinar, o que também tornou o gabari mais leve e mais barato de fabricar (Figura 7);
- Elaborou-se um sistema *Poka Yoke* e de encaixe rápido, com o descentramento das saliências, o que impossibilita a montagem errada no momento de fixar as duas partes do gabari (Figura 6).

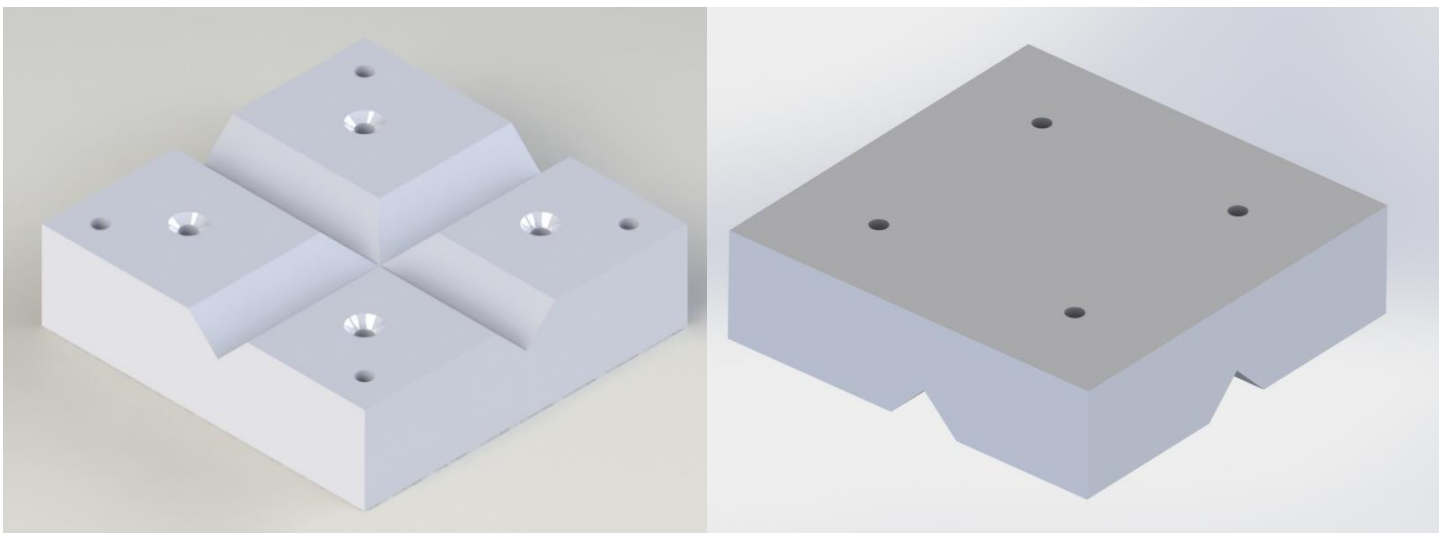


Figura 6. Render da parte móvel do gabari 2 em PowerSHAPE.

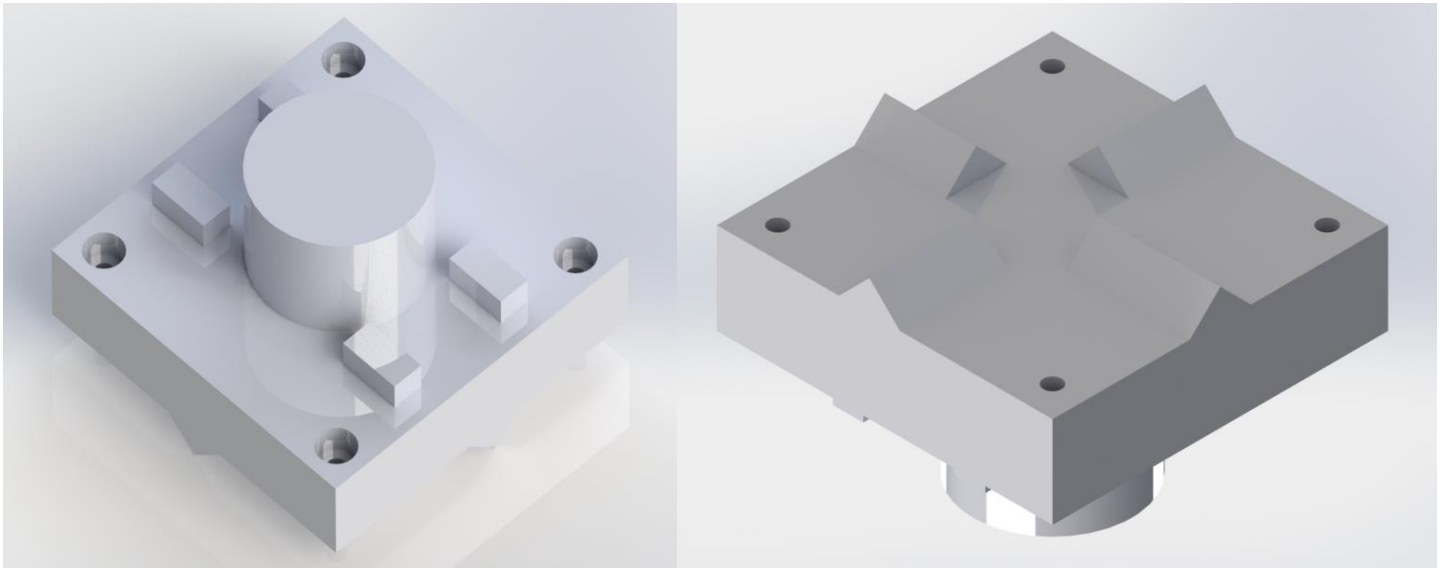


Figura 7. Render da parte fixa do gabari 2 em PowerSHAPE.

Finalmente, maquinaram-se as duas partes constituintes do gabari num centro de maquinagem CNC de 5 eixos, *HERMLE C 20 U*, a partir de dois blocos de alumínio, que se pode observar na Figura 8.

Usaram-se duas amarrações para cada parte do gabari e o *software* utilizado para se calcular os percursos de ferramenta foi o *PowerMILL*. Uma vez que se usaram estratégias de 5 eixos não se necessitou de usar ferramentas esféricas para as superfícies inclinadas, diminuindo o tempo de maquinagem.



Figura 8. À esquerda, a garra de dois dedos do robô e à direita, as duas partes do gabari 2 já maquinadas a partir de blocos de alumínio.

Depois de maquinado, montou-se a parte fixa do gabari no robô, mediu-se com um paquímetro algumas distâncias estratégicas para posicionar o gabari no PRI. Fez-se isto, para corrigir erros de maquinagem, uma vez que as cotas não eram exatamente iguais às do desenho CAD do gabari.

Posteriormente, usou-se o mesmo percurso de desbaste e simulou-se em PRI com o novo alinhamento e posicionamento do *cowling*, pelo que se verificaram erros de singularidade de punho (Figura 9). Depois de várias tentativas, variação da posição inicial do robô, variação do ângulo entre a ferramenta e a normal à superfície de maquinagem, verificaram-se sempre erros de singularidade, pelo que a solução passou por mudar a forma como o robô segura o gabari.

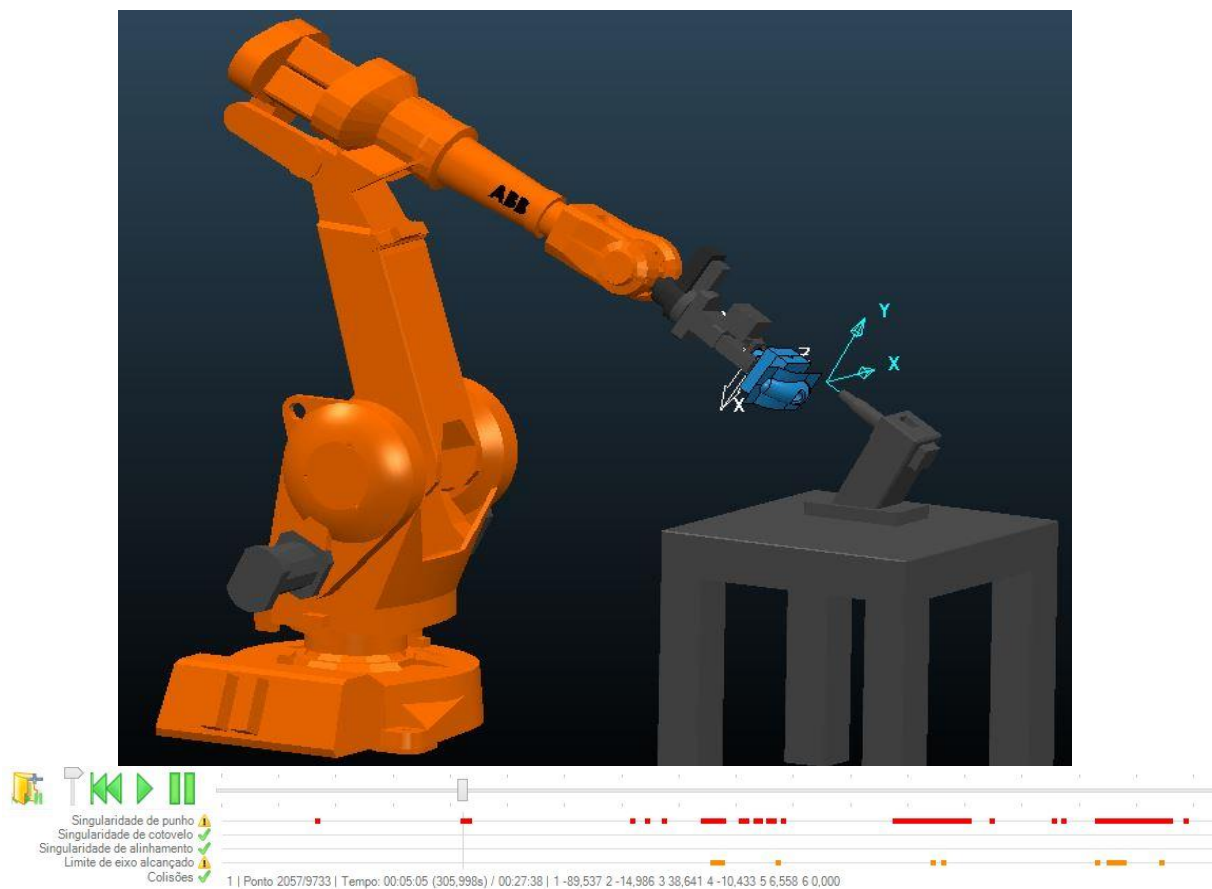


Figura 9. Em cima, simulação em PRI onde se verifica o robô numa posição de singularidade de punho. Em baixo, verificam-se todos os erros de singularidade ao longo do percurso de desbaste utilizado para maquinar o *cowling* anteriormente com esta configuração do robô.

Gabari 3

Anteriormente o robô segurava o gabari de uma forma frontal e a nova solução passava pelo robô segurar o gabari a 90° relativamente ao sexto eixo do robô. Sendo assim, modelaram-se dois acessórios, um que encaixa na parte fixa do gabari (ver Figura A10 e A11 no anexo A), e outro que encaixa num acessório do robô (ver Figura A9 no anexo A), não sendo necessária a garra do robô, o que permitiu “poupar” mais capacidade de carga do robô, uma vez que o acessório usado é consideravelmente mais leve que a garra. Outra vantagem deste gabari, uma vez que não se usa a garra, é diminuir-se o comprimento total, desde o sexto eixo do robô até à extremidade do gabari, ganhando-se rigidez, o que permite uma rebarbagem com menor erro associado à vibração do robô. Nas Figuras 11 e 12 pode observar-se *renders* do Gabari 3 em *PowerSHAPE*.

Desta vez, importaram-se os acessórios para o PRI e fizeram-se simulações antes de avançar para a maquinagem dos acessórios, Figura 10. Após a simulação, não se verificaram quaisquer erros de singularidade, pelo que se avançou para a maquinagem.

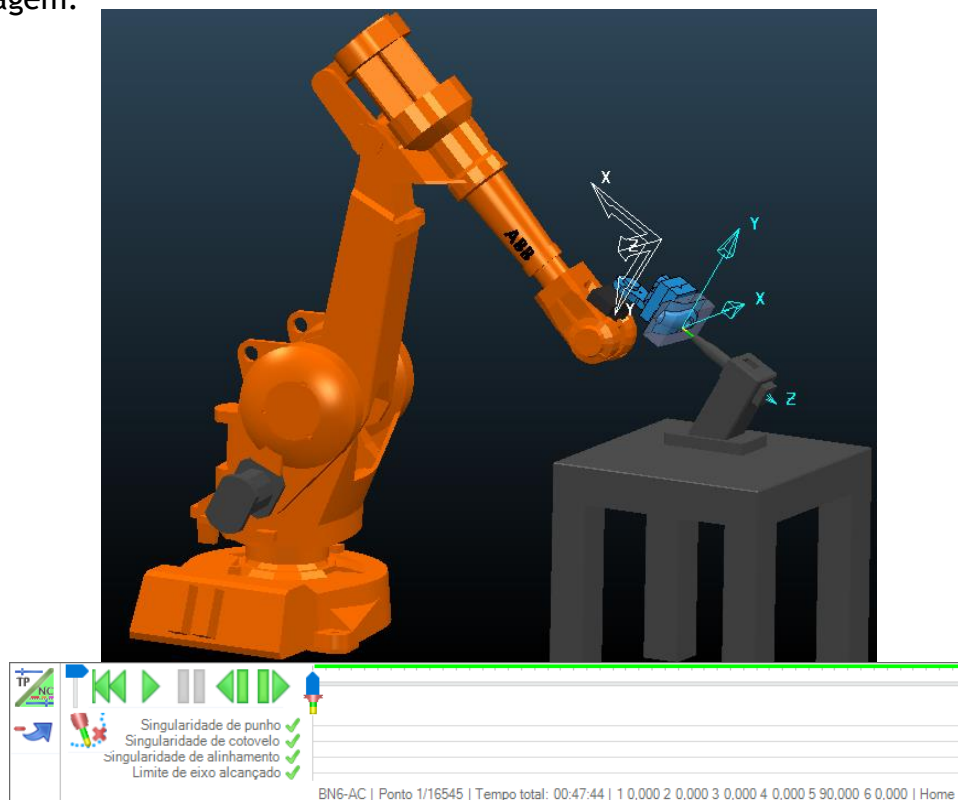


Figura 10. Em cima, simulação em PRI onde se verifica a configuração do robô. Em baixo, verifica-se que no percurso de desbaste utilizado para maquinar o cowling anteriormente com esta configuração do robô não existem quaisquer erros de singularidade.

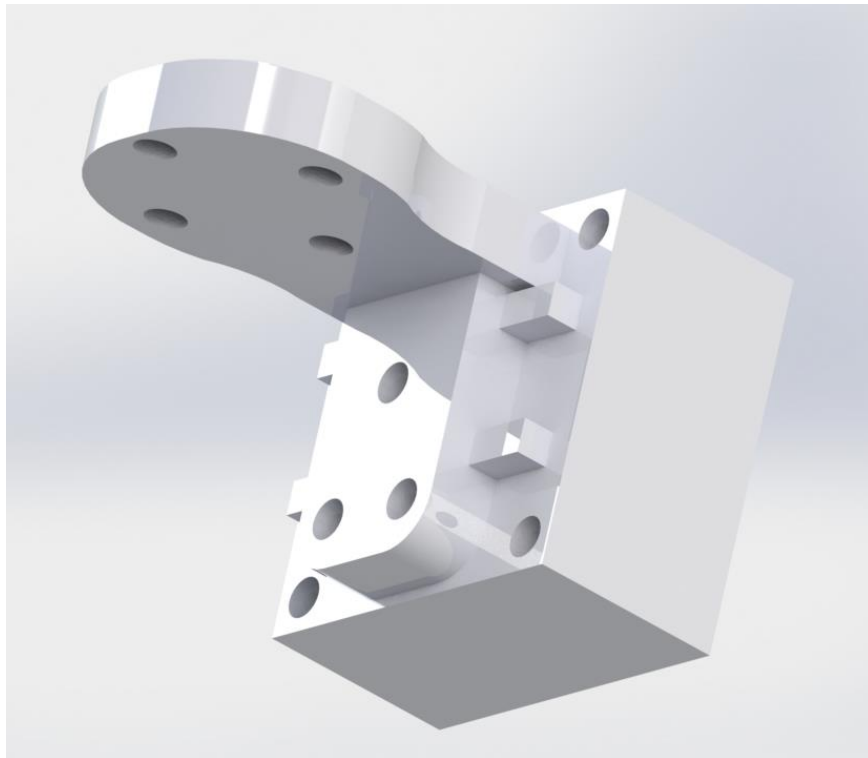


Figura 11. Render da montagem do Gabari 3.

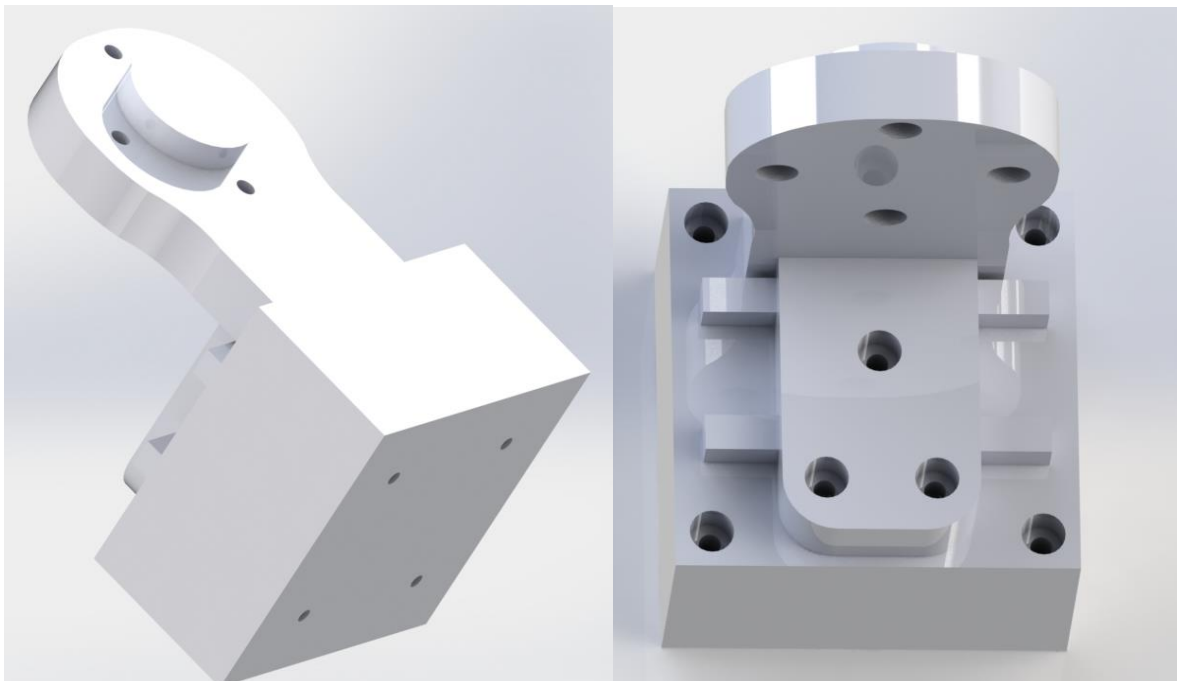


Figura 12. Diferentes vistas do render da montagem do Gabari 3.

Para a maquinação dos acessórios também se utilizou o *PowerMILL* para o cálculo dos percursos de ferramenta, sendo eles feitos a partir de dois blocos de alumínio, cortados a partir de uma barra de alumínio com as dimensões 110 mm por 110 mm. Num dos acessórios, o que encaixa à parte fixa do gabari, utilizaram-se duas amarrações, já no outro, utilizaram-se três amarrações, sendo a última para fazer os furos laterais e a esquina viva da caixa. Na Figura 13 observa-se o gabari 3 já maquinado.

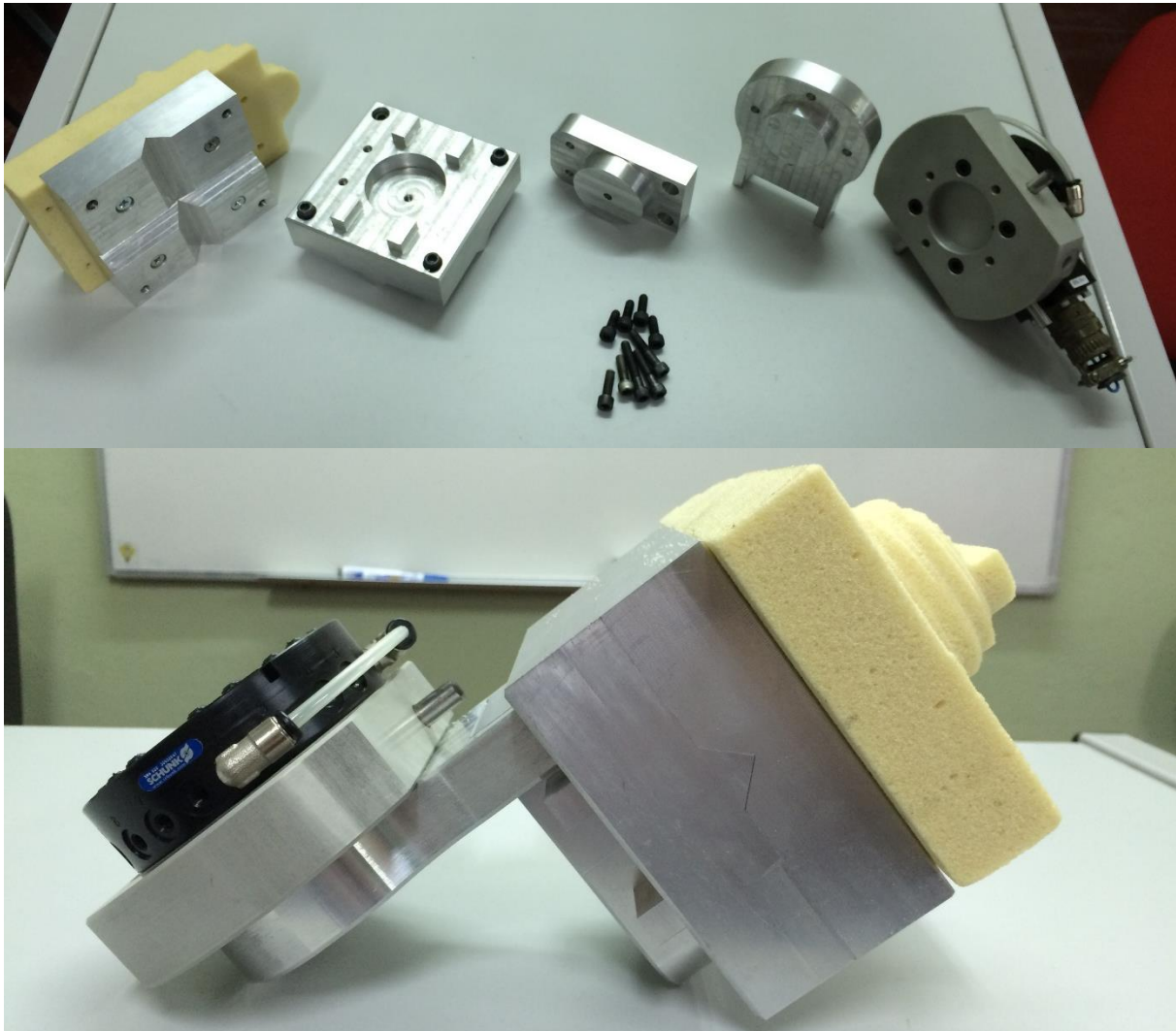


Figura 13. Em cima, verifica-se todo o gabari 3 já maquinado, dividido nas partes que o constituem, e em baixo, verifica-se o gabari 3 montado e encaixado a um acessório do robô que liga à sua extremidade por via pneumática.

Primeiro Alinhamento

Depois dos acessórios e gabari modelados e maquinados, seguiram-se as tentativas de alinhamento do *cowling* relativamente à parte móvel do gabari.

PowerINSPECT

Inicialmente, pensou-se que a solução passava por utilizar um *software* de controlo dimensional da Autodesk, *PowerINSPECT*, com o auxílio de um braço de medição tridimensional, *MicroScribe G2*, pelo que, se realizaram tutoriais para aprendizagem deste *software*. Após a aprendizagem, seguiram-se as tentativas de alinhamento, mas como o objetivo era saber a posição do *cowling* relativamente à parte móvel do gabari e este *software* permite fazer o controlo dimensional relativamente a um ficheiro CAD, teria de utilizar um ficheiro CAD com as duas peças (*cowling* e parte móvel do gabari) já nas posições corretas, e como o objetivo era mesmo conseguir esse ficheiro, não foi possível utilizar este *software* neste processo.

PowerSHAPE

Passou-se a outra tentativa de resolução, utilizando o *software* de modelação tridimensional, *PowerSHAPE*, e o braço de medição tridimensional, *MicroScribe G2*.

Depois de acoplar o braço de medição ao *PowerSHAPE*, utilizaram-se estratégias para localizar um ponto específico de cada peça (*cowling* e parte móvel do gabari), ponto esse que correspondia ao plano de trabalho do ficheiro CAD de cada uma. Então, para saber a localização da parte móvel do gabari, basta identificar 3 pontos de cada plano e fazê-lo para 3 planos que se interessem, de seguida, obtém-se o ponto da intersecção dos 3 planos, e cria-se um plano de trabalho nesse ponto, alinhado nos 3 eixos pela intersecção dos planos 2 a 2.

Para alinhar o *cowling*, teve que se fazer um estudo prévio, e de seguida retirar pontos estratégicos que permitam o alinhamento do mesmo, criando-se o plano de trabalho alinhado do *cowling*. Para esta peça foram retirados pontos em torno da circunferência central que esta apresenta, e 3 pontos na base do círculo, pelo que o plano de trabalho foi criado no centro da circunferência e coincidente com o plano do círculo. Para ajustar a direção dos eixos x e y foram adquiridos 3

pontos ao longo do plano lateral do *cowling*, e outros 3 pontos ao longo do plano frontal, podendo assim orientar-se o plano de trabalho. Tendo os planos de trabalho, importam-se os ficheiros CAD da parte móvel do gabari e do *cowling* para o *PowerSHAPE* e alinham-se segundo estes, gravando o ficheiro CAD com o plano de trabalho do gabari ativo, ver Figura 14.



Figura 14. À esquerda verifica-se a peça fixa à parte móvel do gabari numa mesa junto ao braço Microscribe G2 para se fazer o alinhamento. À direita pode observar-se o CAD em PowerSHAPE das peças já alinhado.

PowerMILL Robot Interface

Antes de se avançar para o PRI, mediu-se na célula robótica, novamente com o paquímetro, distâncias estratégicas relativamente ao plano de trabalho do sexto eixo do robô, para corrigir erros devidos à maquinagem e acertar o posicionamento na simulação do PRI.

Depois passou-se para o PRI, onde se ativou a célula robótica do CINFU e se importou a parte fixa do gabari, posicionando-a no robô no local correto, de acordo com as medições. Tendo a parte do gabari fixo alinhado, importou-se o modelo CAD com o *cowling* e parte móvel do gabari alinhados para o PRI, posicionando o modelo, para que o encaixe entre a parte fixa e móvel do gabari aconteça. Como esse encaixe é conhecido, devido ao gabari ter um sistema de encaixe rápido *Poka Yoke*, para fazer este posicionamento, bastou criar um plano de trabalho no PRI numa das esquinas da parte fixa do gabari, com a mesma orientação e na mesma esquina que o plano de trabalho criado na esquina da parte móvel do gabari, havendo assim, depois de importar o modelo CAD alinhado, o encaixe correto do gabari, sendo possível passar para a simulação. Depois, usou-se o mesmo percurso de desbaste utilizado para maquinar a peça em questão e verificou-se, se existiam erros de singularidade, alcance de limite dos eixos do robô, colisões com constituintes da célula robótica ou facadas. Após calcular um percurso livre de quaisquer erros, seguiu-se o pós-processamento, utilizando o pós-processador para este robô, ver Figura 15.

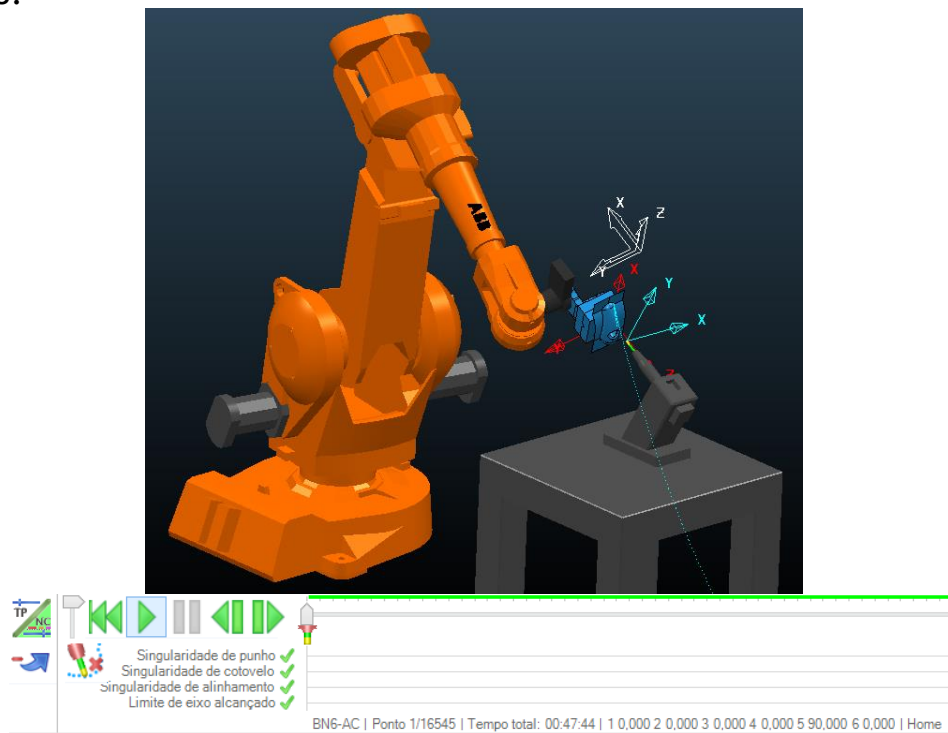


Figura 15. Em cima, simulação em PRI onde se verifica a configuração do robô. Em baixo, verifica-se que no percurso de desbaste utilizado para maquinar o *cowling* anteriormente com esta configuração do robô não existem quaisquer erros de singularidade.

Maquinagem

Depois de pós-processado, importou-se o percurso para o controlador do robô (*FlexPendant*) e deu-se início à operação, Figura 16 e A12 no Anexo A.

A operação correu como o esperado, não havendo colisões, facadas ou erros de singularidade, e também não houve penetração da ferramenta no poliuretano expandido, pelo que se verificou um alinhamento correto, podendo passar-se para a próxima fase do projeto, que foi fazer um novo alinhamento, para comprovar que é possível aplicar a mesma operação de desbaste em peças com alinhamentos diferentes.

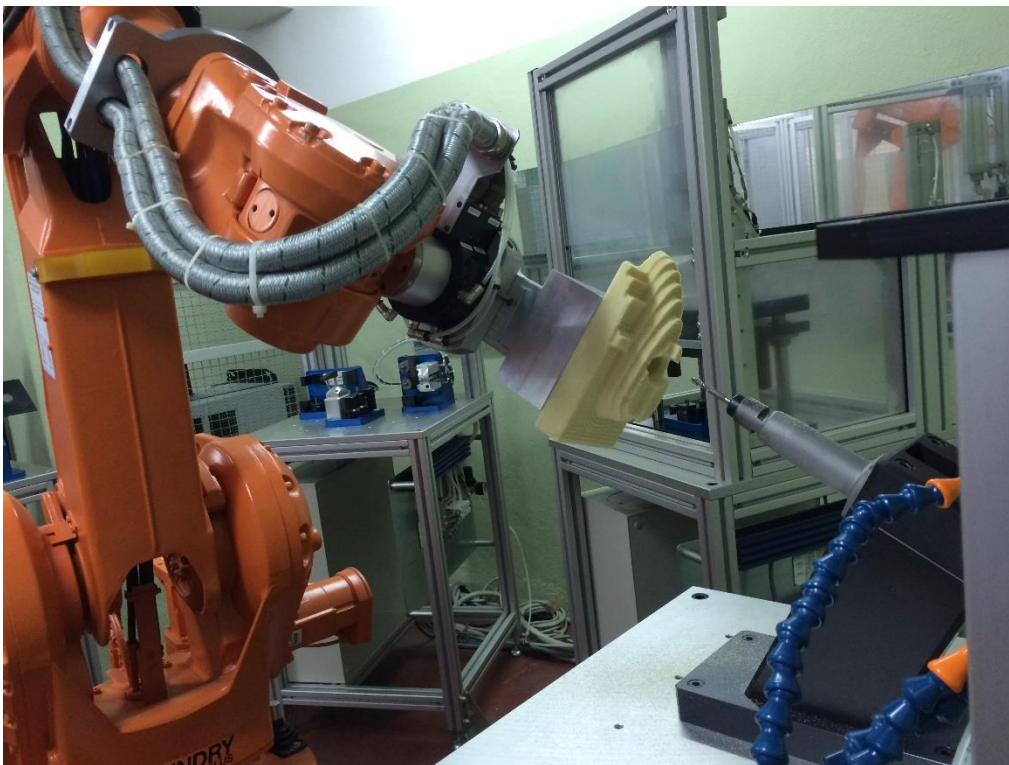


Figura 16. Execução do percurso de desbaste calculado em PRI na célula robótica do CINFU.

Segundo Alinhamento

De seguida, alterou-se a posição do *cowling*, para comprovar que era possível realizar a mesma estratégia de desbaste em peças com posições diferentes. Sendo assim, foi necessário fazer um novo alinhamento em *PowerSHAPE*, de acordo com o que foi feito anteriormente e de seguida recalcular o percurso no *PowerMILL*.

PowerSHAPE

Neste alinhamento, utilizou-se também o braço de medição tridimensional, *MicroScribe G2*, para se saber as cotas de pontos estratégicos para se encontrar a posição e alinhamento do *cowling* relativamente à parte móvel do gabari.

Para isso, no segundo alinhamento, acrescentou-se ao modelo CAD 3D do *cowling* as paredes laterais para facilitar o alinhamento. Tendo as paredes laterais, para se saber a posição do *cowling*, obteve-se com o braço de medição, 3 pontos de cada plano, o de cima, o da frente e o da direita, criando um plano para cada 3 pontos. Seguidamente, calculou-se o ponto resultante da interseção dos 3 planos, que seria a origem do *cowling*. Criou-se então um plano de trabalho nesse ponto, e a sua orientação em x, y e z foi dada pela interseção dos planos 2 a 2, que dão origem a retas, que serviram para orientar os eixos do plano de trabalho.

Para se saber a localização da parte móvel do gabari, bastou identificar 3 pontos de cada plano e fazer-lo para 3 planos que se intersetem, de seguida, obtém-se o ponto da intersecção dos 3 planos, e cria-se um plano de trabalho nesse ponto, alinhado nos 3 eixos pela intersecção dos planos 2 a 2, tal como anteriormente.

Tendo os planos de trabalho, importam-se os ficheiros CAD da parte móvel do gabari e da peça (*cowling*) para o *PowerSHAPE* e alinham-se segundo estes, gravando o ficheiro CAD com o plano de trabalho do gabari ativo, Figura 17.

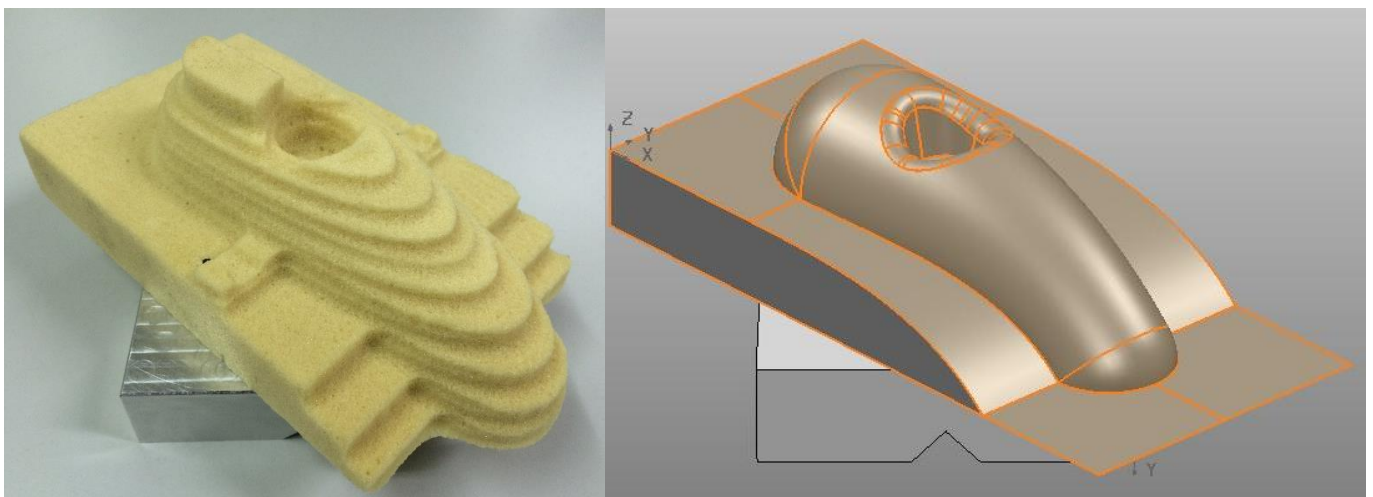


Figura 17. À esquerda, o *cowling* fixo à parte móvel do gabari numa posição diferente, e à direita o CAD do alinhamento do mesmo.

PowerMILL Robot Interface

Seguiu-se para o PRI, onde se importou a célula robótica do CINFU e a parte fixa do gabari para o posicionamento correto. Tendo a parte fixa do gabari, importou-se o modelo CAD com o *cowling* e parte móvel do gabari alinhados para o PRI, posicionando o modelo, para que o encaixe entre a parte fixa e móvel do gabari aconteça.

Depois, usou-se o mesmo percurso de desbaste utilizado para maquinar a peça em questão e verificou-se, se existiam erros de singularidade, alcance de limite dos eixos do robô, colisões com constituintes da célula robótica ou facadas. Após calcular um percurso livre de quaisquer erros, seguiu-se o pós-processamento, utilizando o pós-processador para este robô, Figura 18.

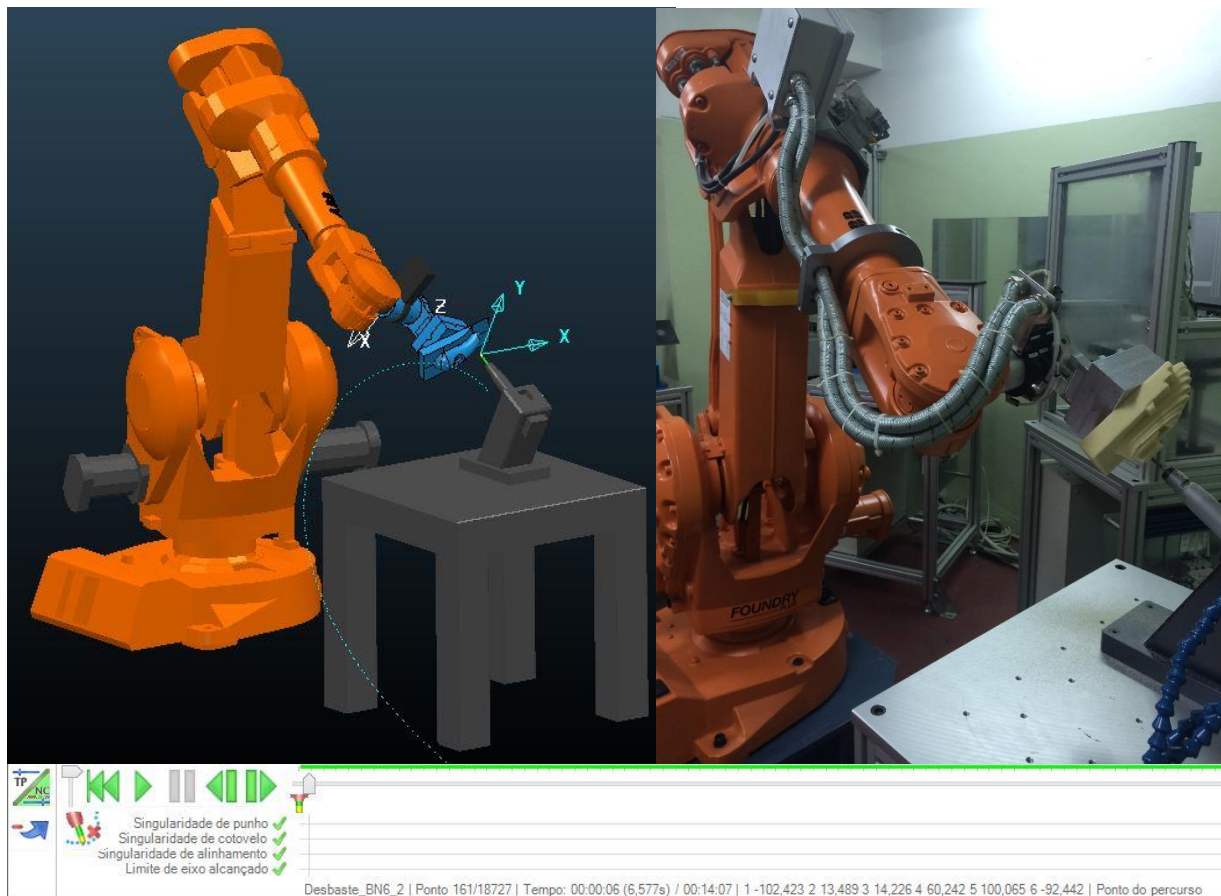


Figura 18. Em cima, à esquerda, simulação em PRI onde se verifica a configuração do robô e à direita, a maquinação na célula robô do CINFU. Em baixo, verifica-se que no percurso de desbaste utilizado para maquinar o *cowling* anteriormente com esta configuração do robô não existem quaisquer erros de singularidade.

Maquinagem

Depois de pós-processado, importou-se o percurso para o controlador do robô (*FlexPendant*) e deu-se início à operação, Figura 19.

Finalmente, a operação correu como o esperado, não havendo colisões, facadas ou erros de singularidade, e também não houve penetração da ferramenta no poliuretano expandido, pelo que se verificou um segundo alinhamento correto, podendo passar-se para a próxima fase do projeto, a rebarbagem de peças de fundição.



Figura 19. Maquinagem na célula robô do CINFU.

6. Produção das peças de fundição no CINFU

Para se passar para a próxima etapa do projeto, a rebarbagem de peças de fundição, foi necessário produzir algumas peças. Sendo assim optou-se por produzir

uma peça, para a qual já existia uma placa molde no CINFU, correspondentes a bases para tachos, ver Figura 20.



Figura 20. Placas molde utilizadas para fazer as quatro peças de fundição.

Começou-se por limpar as placas molde, de seguida, colocaram-se as caixas de moldação e um pó de desmoldação, para facilitar o mesmo, ver Figura A13 no Anexo A.

De seguida, encheram-se as caixas com areia de contacto (é uma areia sintética de granulometria muito fina), e compactou-se a areia, ver Figura A14 no Anexo A. Depois disto, efetuou-se a desmoldação, obtendo-se as cavidades moldantes, que se podem ver na Figura 21.



Figura 21. Cavidades moldantes das peças de fundição.

Realizou-se todo este processo novamente, para se obterem 4 peças, Figura A15 no Anexo A. Levou-se o alumínio ao estado líquido num forno de cadinho a gás, e depois de retirar a escória formada, fizeram-se os vazamentos, como se pode ver na Figura 22.

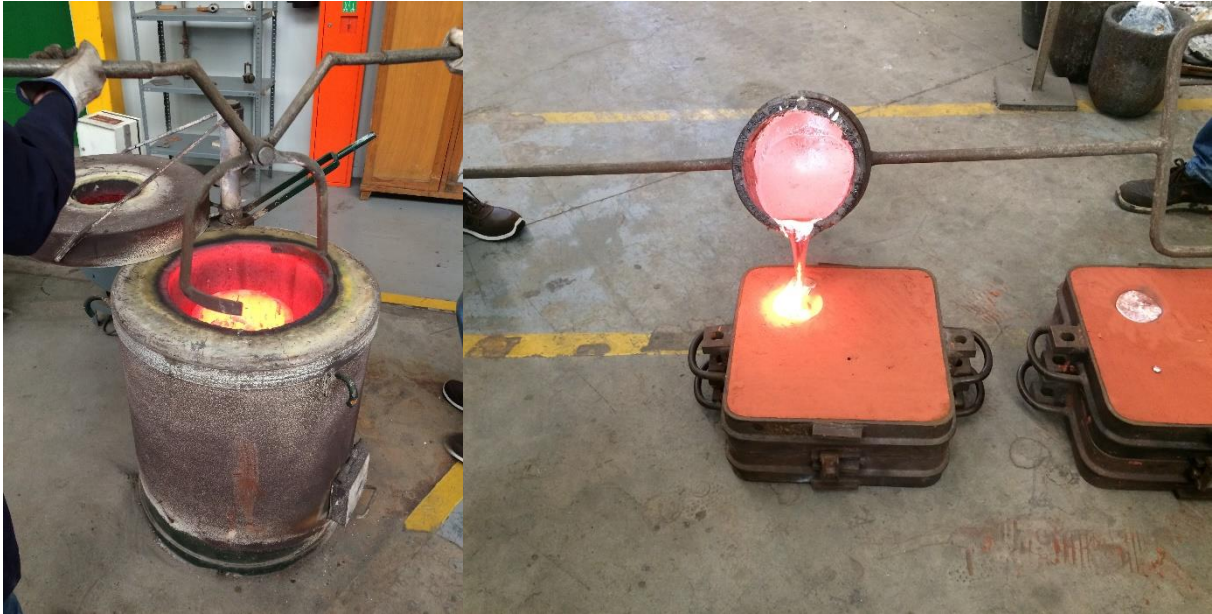


Figura 22. À esquerda, forno de cadinho a gás e à direita vazamento do alumínio nas moldações.

Finalmente, retiraram-se os fundidos da areia de contacto, e de seguida, o corte de gitos, ficando, as peças de fundição, prontas para a rebarbagem, observando-se isso na Figura 23.



Figura 23. À esquerda, o cacho e à direita o corte de gitos.

Para uma melhor limpeza das peças, fez-se granalhagem numa *Pallinatrici Ivorblast* do CINFU, Figura 24.



Figura 24. À esquerda a granalhagem das peças e à direita as peças prontas para a rebarbagem.

7. Rebarbagem da Peça 1

7.1. 1ª Rebarbagem

Para rebarbar a peça 1 de fundição, começou-se por fazer a montagem da parte móvel do gabari e da peça de fundição, deparando-se com o problema da fixação entre eles. Para solucionar este problema, resolveu-se produzir 3 anilhas com um diâmetro externo de 30 mm, um diâmetro interno de 5 mm e uma espessura com 6 mm, em aço.

Fixação

Com estas anilhas, conseguiu-se fixar a peça de fundição à parte móvel do gabari, com parafusos M5, porcas M5 e anilhas, como se pode ver na Figura 25.

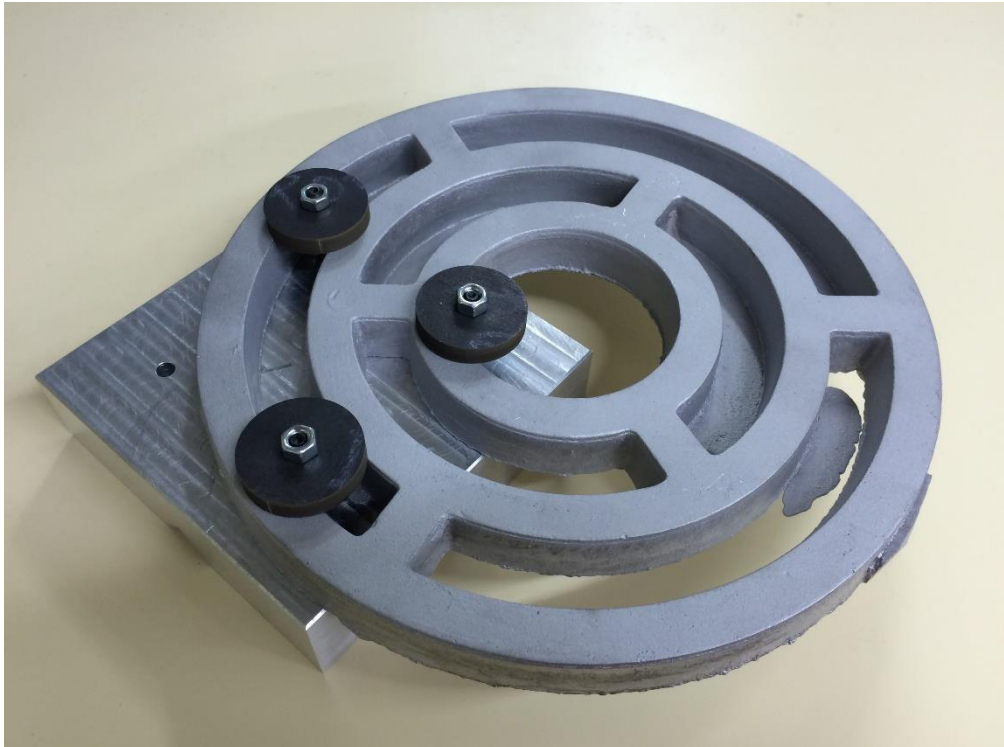


Figura 25. Peça 1 de fundição fixa à parte móvel do Gabari.

1º Alinhamento

Depois de fixa, foi necessário proceder-se ao alinhamento, o qual, foi realizado, tal como nos casos de maquinagem anteriores, com o auxílio do braço de medição tridimensional *MicroScribe G2*, e com o *software* de modelação tridimensional *PowerSHAPE*.

Para alinhar a parte móvel do gabari, foram captados 3 pontos para cada plano, e fez-se isso para 3 planos que se intersetem, interseções essas, que originam 3 retas e 1 ponto. O ponto seria o centro do plano de trabalho, e depois a orientação do plano de trabalho é dada pelas retas, que serviram para orientar os eixos do plano de trabalho. Então, para saber a localização da parte móvel do gabari, basta identificar 3 pontos de cada plano e faze-lo para 3 planos que se intersetem, e de

seguida, obtém-se o ponto da intersecção dos 3 planos, e cria-se um plano de trabalho nesse ponto, alinhado nos 3 eixos pela intersecção dos planos 2 a 2, Figura 26.

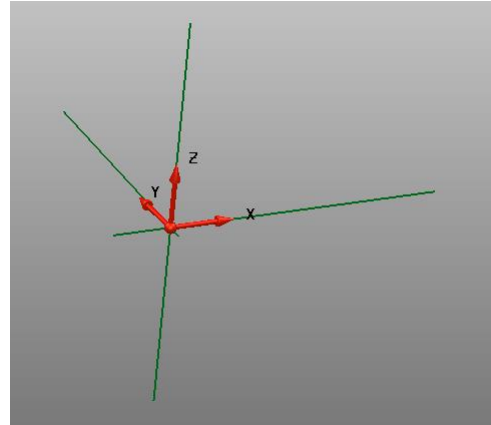


Figura 26. Plano de trabalho alinhado segundo as retas de intersecção dos planos.

Para alinhar a peça, foi necessário fazer um estudo prévio, pelo que se usou, uma circunferência interior da base da peça e um elo que faz a ligação entre as circunferências do meio e a mais interior, tal como se mostra a vermelho na figura 27.

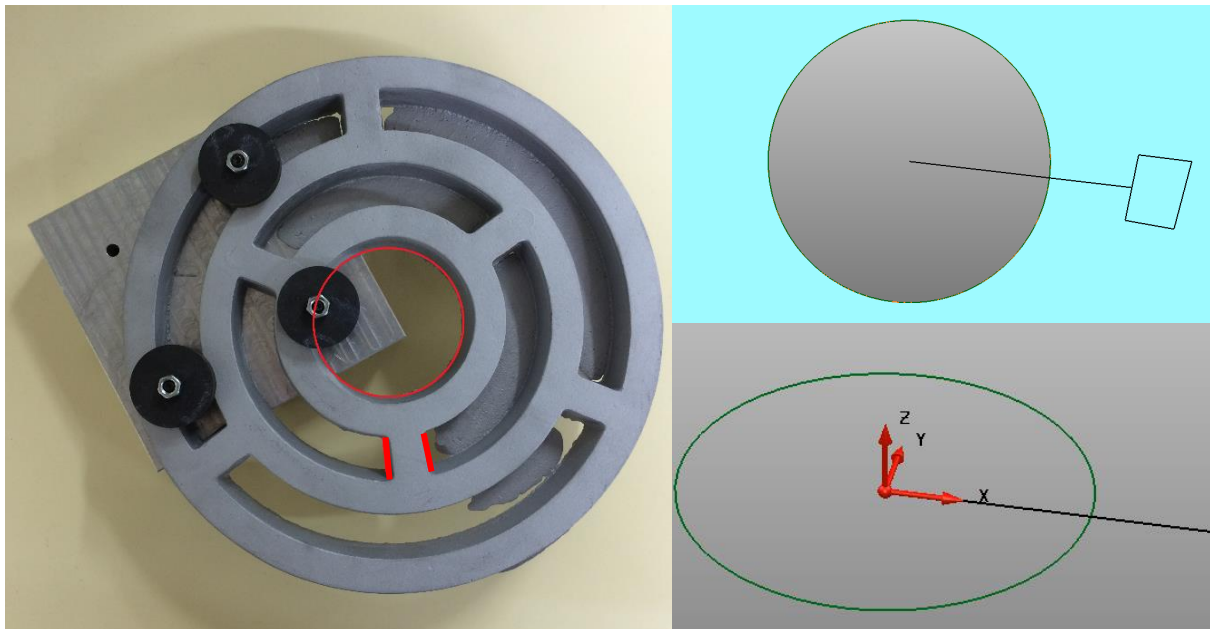


Figura 27. À esquerda, a vermelho, verificam-se as zonas de onde foram captados os pontos, e à direita as geometrias construídas com os pontos captados.

Sendo assim, captaram-se pontos do interior da circunferência, construindo-se uma circunferência, e depois captaram-se pontos das paredes do elo de ligação (Figura 28), contruindo depois um segmento de reta de cada lado do elo de ligação, e de seguida ligaram-se os segmentos de reta, dando origem a outro segmento de reta, cujo o ponto médio desse segmento de reta, ligado ao centro da circunferência, corresponderia ao eixo dos xx do plano de trabalho da peça. Para se saber a orientação do eixo dos yy, bastou criar um plano de melhor ajuste da circunferência,

sendo esse plano correspondente ao plano xy do plano de trabalho de orientação da peça de fundição.



Figura 28. Captação de pontos em zonas estratégicas para o alinhamento da peça 1 relativamente à parte móvel do gabari com o braço de medição 3D, Microscribe G2.

Depois de se obterem estes dois planos de trabalho de orientação da parte móvel do gabari e da peça de fundição, bastou importar os ficheiros CAD de cada uma e coloca-los segundo a orientação dos planos de trabalho criados anteriormente (Figura 29).

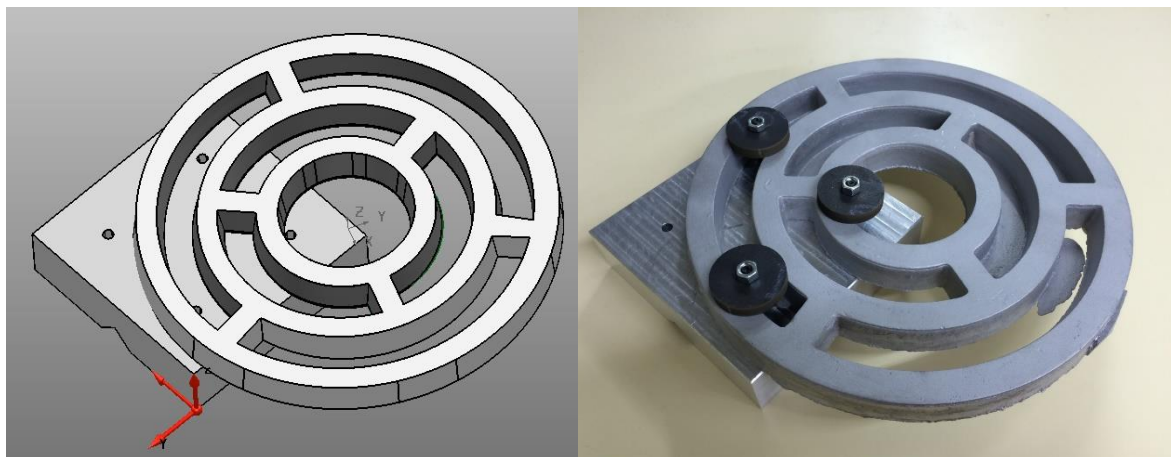


Figura 29. À esquerda verifica-se o CAD do alinhamento da Peça 1 e à direita a Peça 1 de fundição fixa à parte móvel do Gabari.

Programação da estratégia de Rebarbagem

Obtendo o alinhamento real da peça, importou-se o ficheiro para o *PowerMILL* para se programar uma estratégia de rebarbagem. Colocou-se o conjunto corretamente e de seguida programaram-se cinco estratégias de Acabamento Swarf com sobremetais consecutivamente decrescentes, sendo eles de 1 mm, 0.8 mm, 0.6 mm, 0.4 mm e 0.2 mm (Figura 30).

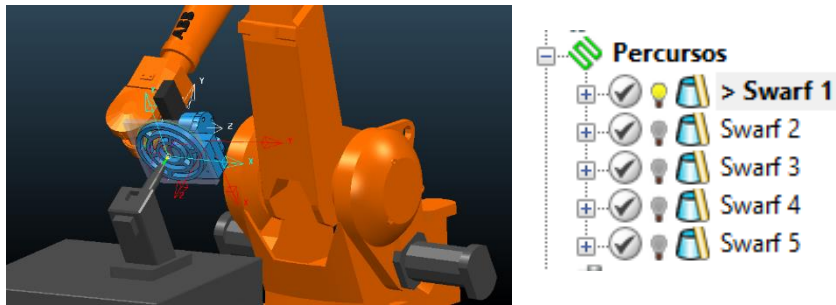


Figura 30. À esquerda, a simulação em PRI dos percursos Swarf e à direita a árvore do PRI com os percursos calculados.

Depois de se obterem percursos de ferramenta livres de colisões e singularidades, fez-se o pós-processamento.

Pós-Processamento

Para pós-processar o percurso de maquinagem, o plano de trabalho da peça será dado em relação ao plano de trabalho do 6º eixo do robô, uma vez que se trabalhou numa cinemática *part-on-robot* e o plano de trabalho da ferramenta será dado em relação ao plano de trabalho *World* do robô, tal como mostra a Figura 31.

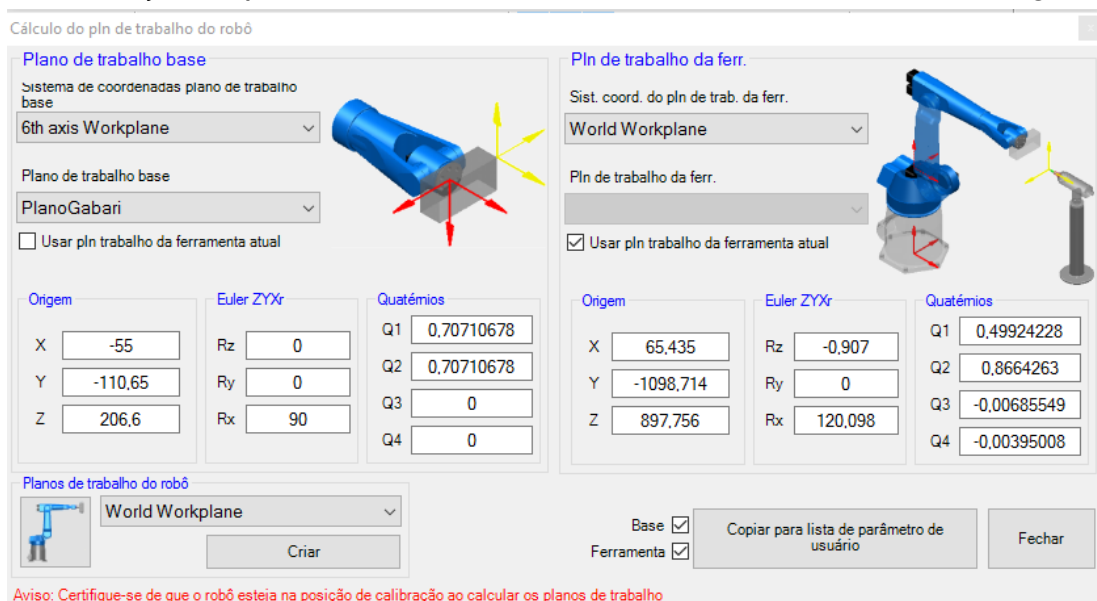


Figura 31. Quadro do PRI de cálculo do plano de trabalho do robô.

Sendo assim, copiaram-se os valores adquiridos no quadro de cálculo de planos de trabalho do robô para o quadro de parâmetros do pós-processamento, tal como mostra a Figura 32.

| Parâmetro | Valor | Unid... |
|----------------------|------------|---------|
| Robot | | |
| Module (Main) | MainModule | |
| Procedure (Main) | main | |
| Acceleration (Robot) | 20 | % |
| Smoothing (Zone) | 1 | |
| ConfJ | On | (On/... |
| ConfL | Off | (On/... |

| Part origin | | |
|------------------|-------------|----|
| Work Object Name | PlanoGabari | |
| Work Object X | -55 | mm |
| Work Object Y | -110,65 | mm |
| Work Object Z | 206,6 | mm |
| Work Object Q1 | 0,70710678 | |
| Work Object Q2 | 0,70710678 | |
| Work Object Q3 | 0 | |

Figura 32. Quadro dos parâmetros de pós-processamento no PRI preenchido para a primeira rebarbagem.

Finalmente, importaram-se os ficheiros para o controlador do robô, executando-se depois a rebarbagem no modo manual do robô.

Durante a rebarbagem, no final do primeiro percurso *Swarf*, o *spindle* parou o movimento de rotação, e não o iniciou quando começou a segundo percurso *Swarf* com um sobremetal menor, pelo que, teve que se parar o robô e verificar o que deu origem a este problema. Depois de se ler o código do programa verificou-se que eram dadas instruções para parar o *spindle* no final de cada passagem, mas não eram dadas instruções no início de cada percurso *Swarf*, apenas no início de todo o programa é que era dada a instrução para ligar o *spindle*. Para solucionar, alterou-se o código do programa manualmente adicionando a seguinte linha no final de cada percurso *Swarf*: “Set Q27P4ActivrRebrb”.

Este problema só surgiu quando se utilizavam estratégias de acabamentoo *Swarf*, quando se utilizavam outras estratégias, este não surgia.

7.2. 2ª Rebarbagem

Uma vez que a zona da peça que está logo em cima do gabari não pode ser rebarbada para não se danificar o mesmo, teve de se mudar a posição da peça,

fixando-a do lado que já estava rebarbado, depois fez-se um segundo alinhamento, e de seguida importou-se o ficheiro adquirido para o *PowerMILL Robot Interface*. No *software*, reimportou-se o ficheiro CAD com o segundo alinhamento, recalcularam-se as estratégias, fez-se o pós-processamento tal como anteriormente e rebarbou-se a peça de fundição novamente, na zona que não estava rebarbada, obtendo-se os resultados que se mostram nas Figuras 33 e 34.

O tempo total gasto nas duas rebarbagens para esta peça foi de 20 minutos e 55 segundos, pelo que nas peças seguintes, tentou-se otimizar as mesmas de modo a bater o tempo de rebarbagem da mesma peça manualmente.

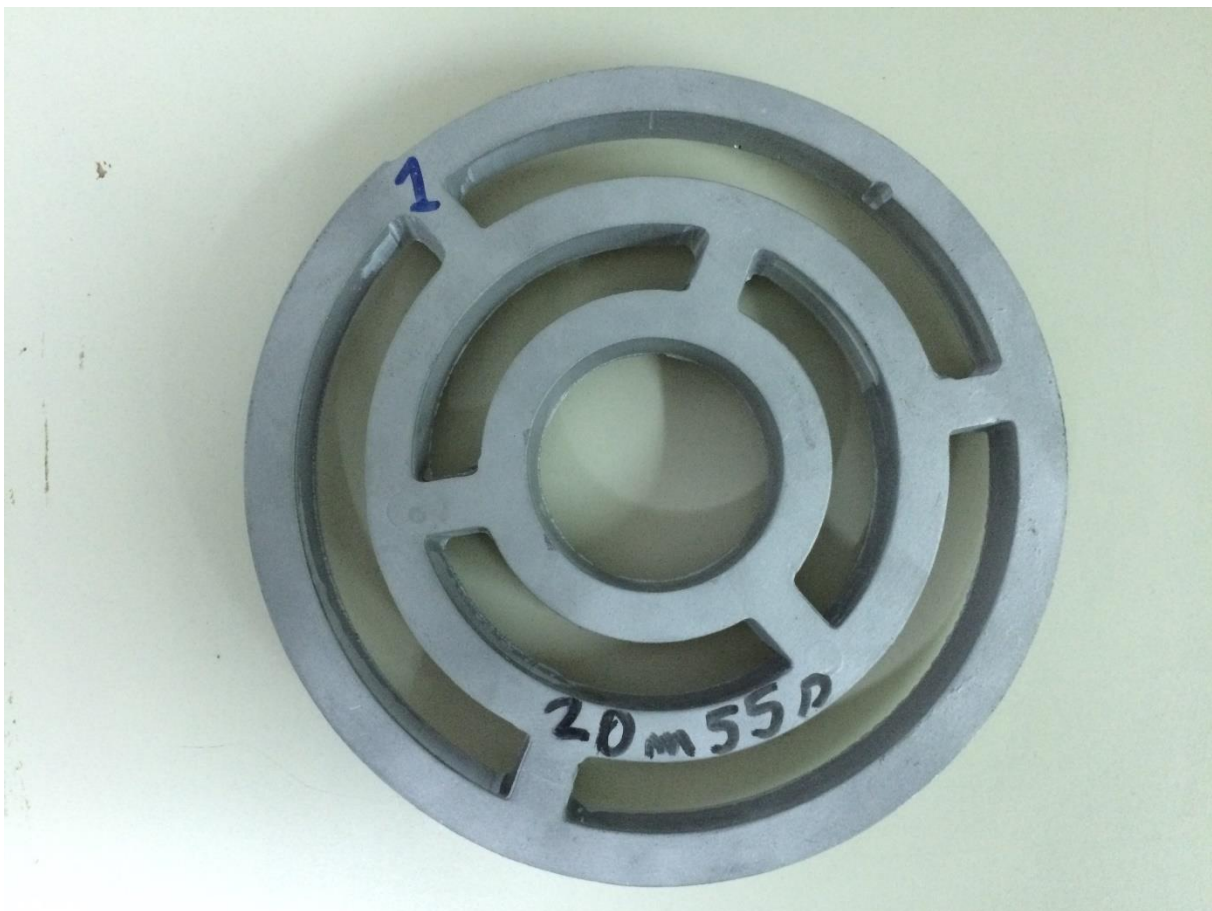


Figura 33. Peça 1 de fundição após a rebarbagem na célula robótica. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 20 minutos e 55 segundos.



Figura 34. Peça 1 de fundição após a rebarbagem na célula robótica.

8. Rebarbagem da Peça 4 - Manualmente

Uma vez que se conseguiu rebarbar uma peça com a utilização do robô, partiu-se para outro objetivo que seria a obtenção de um tempo de rebarbagem na célula robótica menor que o tempo de rebarbagem da mesma peça manualmente, com um colaborador certificado do CINFU.

Deste modo decidiu-se rebarbar uma peça de fundição, igual à que foi rebarbada pelo robô, manualmente e medir-se o tempo de execução da mesma. Nas Figuras 35 e 36, pode ver-se como se rebarbou a peça de fundição.

Inicialmente, com um martelo de cunha, retiraram-se as rebarbas maiores dos orifícios da peça, depois com a utilização de um esmeril, retiraram-se as rebarbas em torno da peça e finalmente, com o rebolo rebarbaram-se as zonas de impossível acesso com o disco de esmerilagem.



Figura 35. À esquerda, com um martelo de cunha retiraram-se as rebarbas interiores e à direita no esmeril, retiraram-se as rebarbas da periferia.



Figura 36. Extração de rebarbas de difícil acesso com o rebolo.

Todo este processo demorou cerca de 7 minutos e 41 segundos, tornando-se este, o valor a bater com a rebarbagem na célula robótica.

Pode ver-se o aspeto da peça rebarbada manualmente nas Figuras 37 e 38.

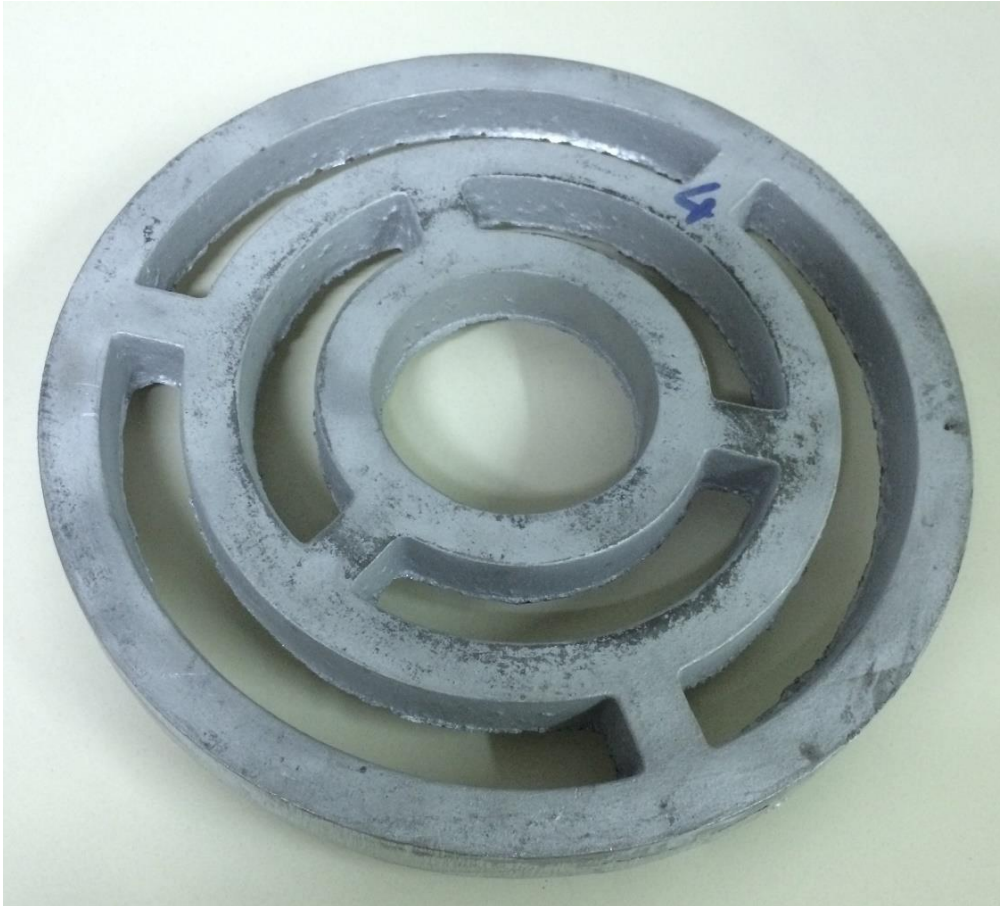


Figura 37. Peça 4 de fundição após a rebarbagem manual. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 7 minutos e 41 segundos.

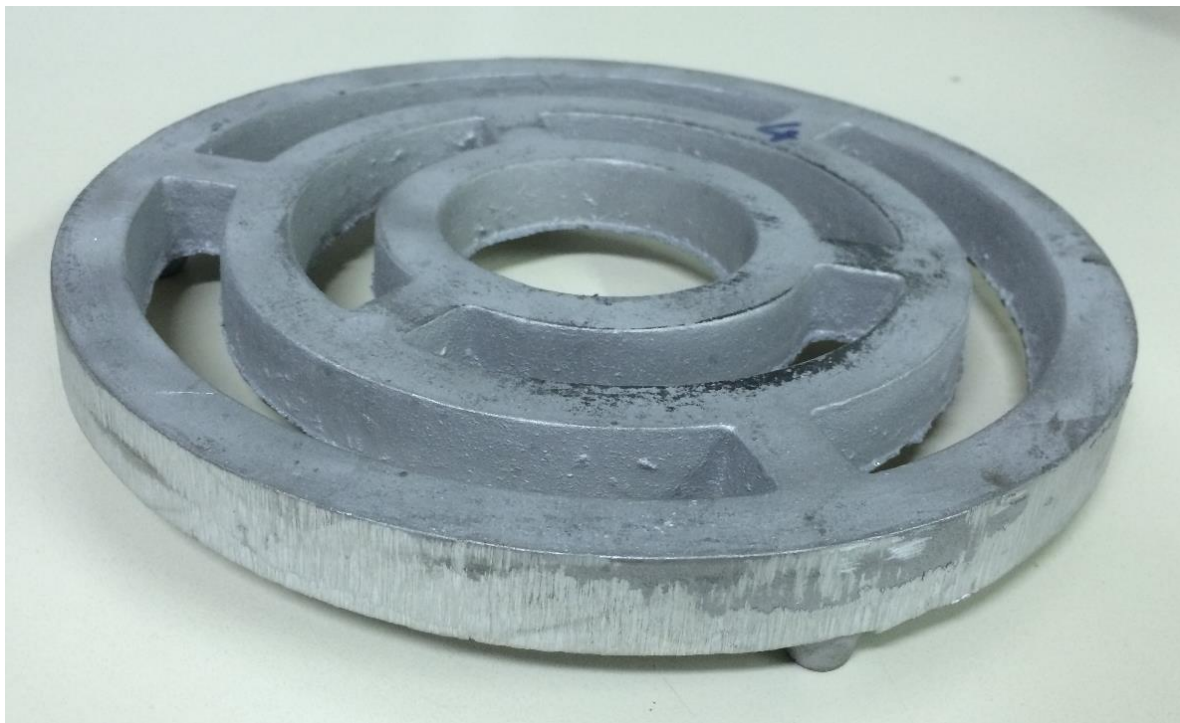


Figura 38. Peça 4 de fundição após a rebarbagem manual.

9. Rebarbagem da Peça 3

Para as restantes peças, o processo foi exatamente o mesmo, só se aplicaram estratégias de rebarbagem diferentes de modo a otimizar o tempo de rebarbagem, para se atingir o objetivo de rebarbar a peça num tempo inferior a 7 minutos e 40 segundos.

9.1. 1ª Rebarbagem

Fixação

Fixou-se a peça de fundição à parte móvel do gabari com os parafusos M5, porcas M5 e as anilhas produzidas, ver Figura 39.

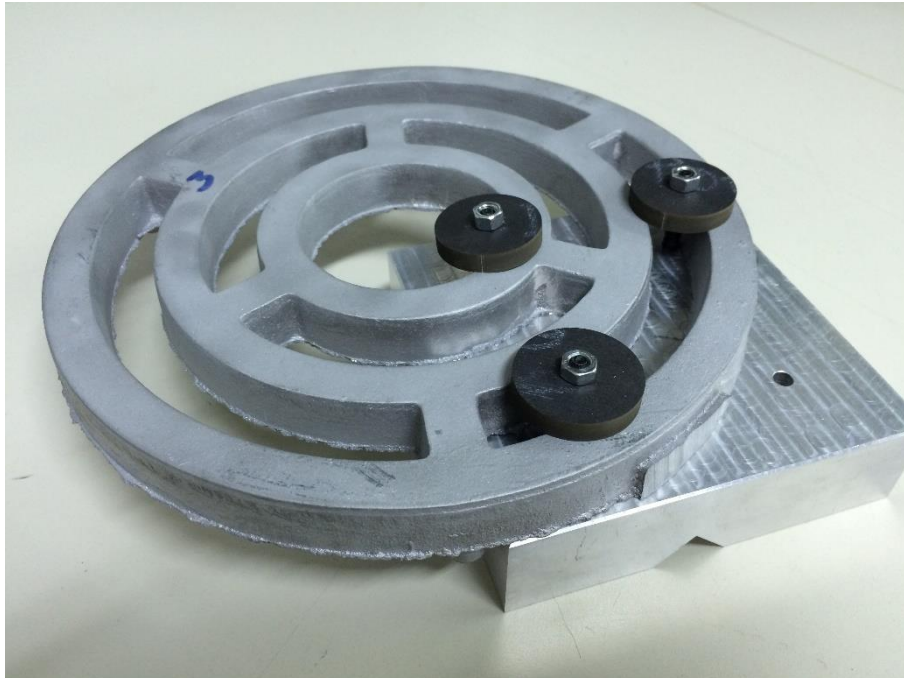


Figura 39. Peça 3 de fundição fixa à parte móvel do Gabari.

1º Alinhamento

Depois de fixa, fez-se o primeiro alinhamento, o qual, foi realizado, tal como no caso da primeira peça a ser rebarbada.

Depois de se obterem os novos planos de trabalho da peça de fundição e da parte móvel do gabari, importaram-se os ficheiros CAD e posicionaram-se as peças de acordo com o alinhamento real, Figura 40.

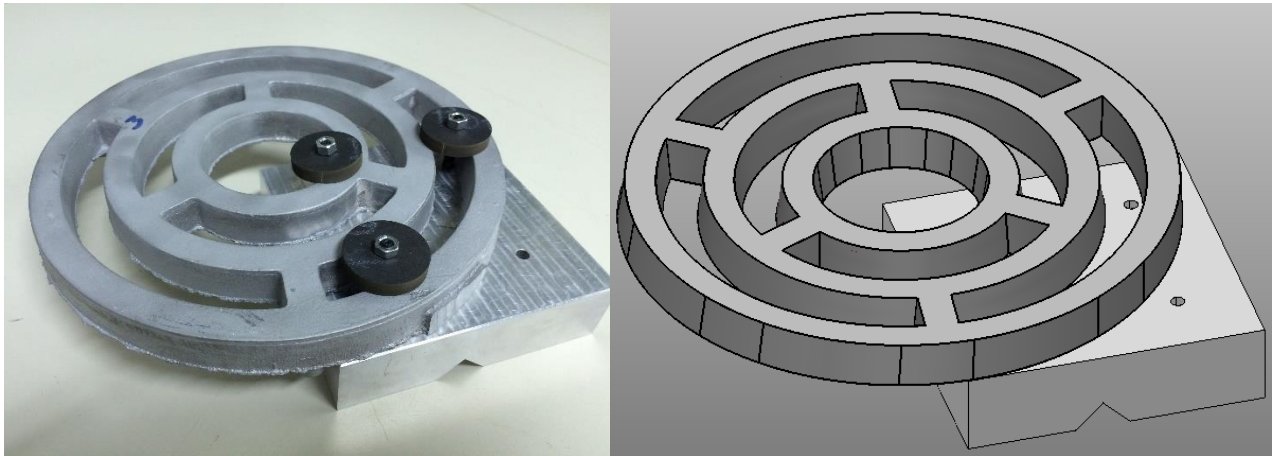


Figura 40. À esquerda verifica-se a Peça 3 de fundição fixa à parte móvel do Gabari e à direita o CAD do 1º alinhamento da Peça 3.

Programação da estratégia de Rebarbagem

Obtendo o alinhamento real da peça, importou-se o ficheiro para o *PowerMILL* para se programar uma estratégia de rebarbagem.

Para esta peça neste primeiro alinhamento, utilizaram-se estratégias de Acabamento Z Constante com sobremetas de 0,7 mm, 0,5 mm, 0,3 mm e 0,2 mm, na Figura 41 podem observar-se um dos percursos calculados.

Depois de se obterem os percursos de ferramenta livres de colisões e singularidades, fez-se o pós-processamento.

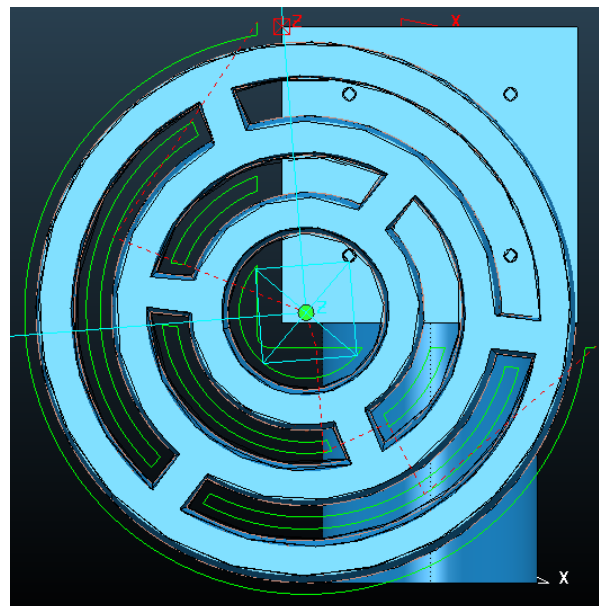


Figura 41. A verde verifica-se a estratégia de Acabamento Z Constante utilizada para rebarbar a peça 3. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Pós-Processamento

O pós-processamento foi feito exatamente do mesmo modo que na peça 1.

Finalmente, importaram-se os ficheiros para o controlador do robô, executando-se depois a rebarbagem no modo manual do robô, demorando esta primeira rebarbagem da peça cerca de 8 minutos e 8 segundos.

9.2. 2ª Rebarbagem

Mudou-se, tal como no caso anterior, a peça de posição, fixando-a do lado que já estava rebarbado, depois fez-se um segundo alinhamento (Figura 42), e de seguida importou-se o ficheiro adquirido para o *PowerMILL Robot Interface*.

2º Alinhamento

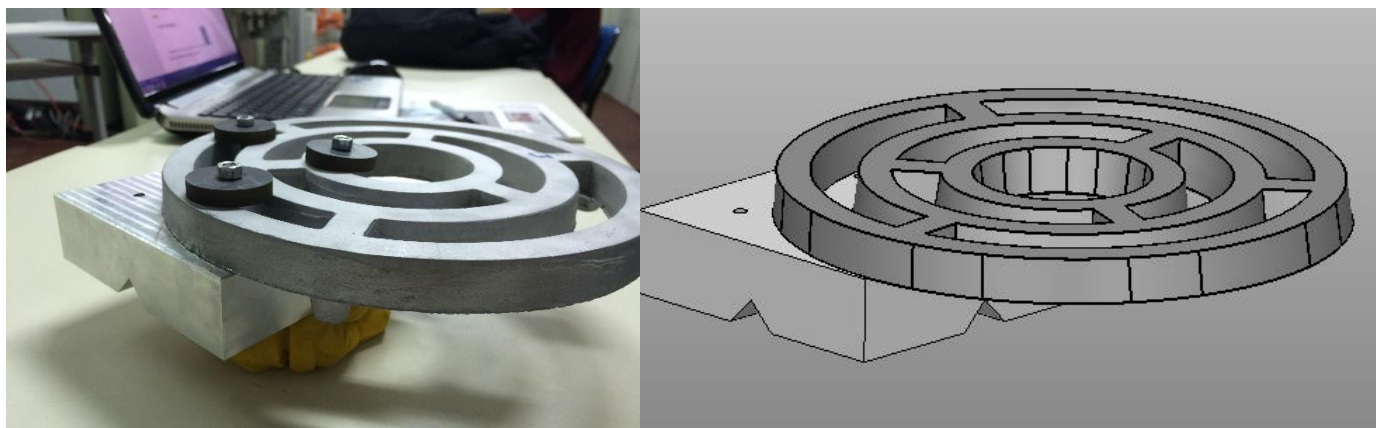


Figura 42. À esquerda verifica-se a Peça 3 de fundição fixa à parte móvel do Gabari e à direita o CAD do 2º alinhamento da Peça 3.

Programação da estratégia de Rebarbagem

No *software*, reimportou-se o ficheiro CAD com o segundo alinhamento, e como a estratégia utilizada no primeiro alinhamento teve um tempo de execução de 8 minutos e 8 segundos, se se utilizasse a mesma novamente, a rebarbagem demoraria cerca de 16 minutos, pelo que se optou por experimentar uma nova estratégia.

Fizeram-se dois acabamentos *Swarf* na parede lateral externa da peça de fundição, para se retirar o colo de entrada, com sobremetais de 0,5 mm e 0,2 mm. Para rebarbar a zona interna, utilizou-se a estratégia de acabamento Z Constante com um sobremetal de 0,1 mm. As estratégias podem observar-se na Figura 43.

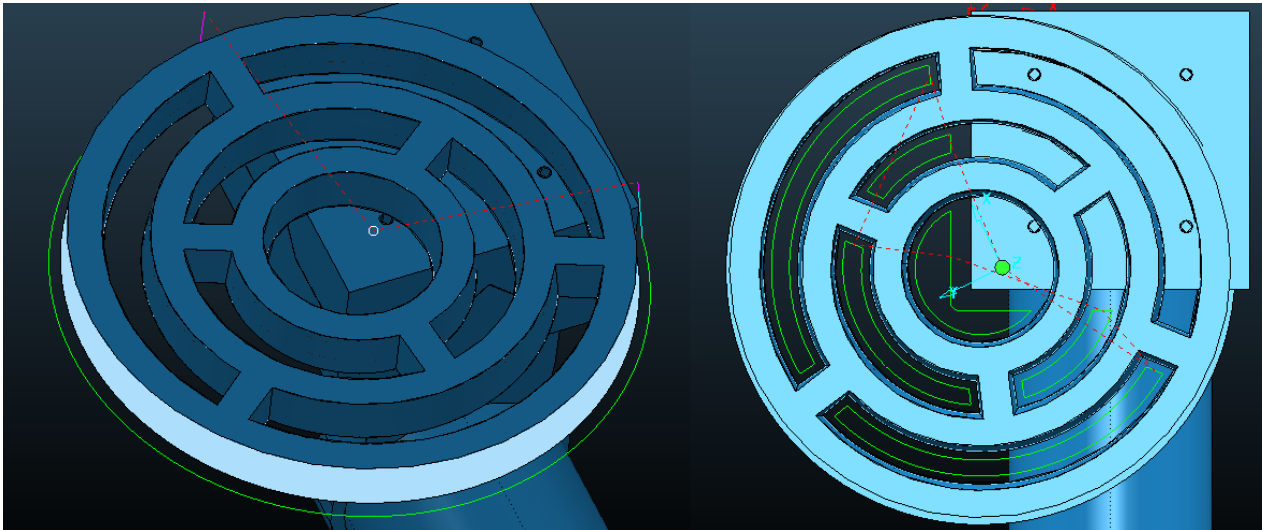


Figura 43. A verde verificam-se as estratégias utilizadas para rebarbar a peça 3, à esquerda a estratégia de acabamento *Swarf* e à direita *Z Constante*. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Depois de se obterem os percursos de ferramenta livres de colisões e singularidades, fez-se o pós-processamento do mesmo modo que anteriormente.

O tempo total gasto na rebarbagem do segundo alinhamento foi de 3 minutos e 23 segundos, dando um tempo total das duas rebarbagens desta peça de 11 minutos e 31 segundos. Com as estratégias utilizadas neste segundo alinhamento, conseguiu-se rebarbar a peça em 3 minutos e 23 segundos, pelo que, se decidiu usar esta estratégia nos dois alinhamentos da peça 2, obtendo-se em teoria, um tempo de rebarbagem de 6 minutos e 46 segundos.

A peça 3 pós rebarbagem na célula robô pode ser vista nas Figuras 44 e 45.

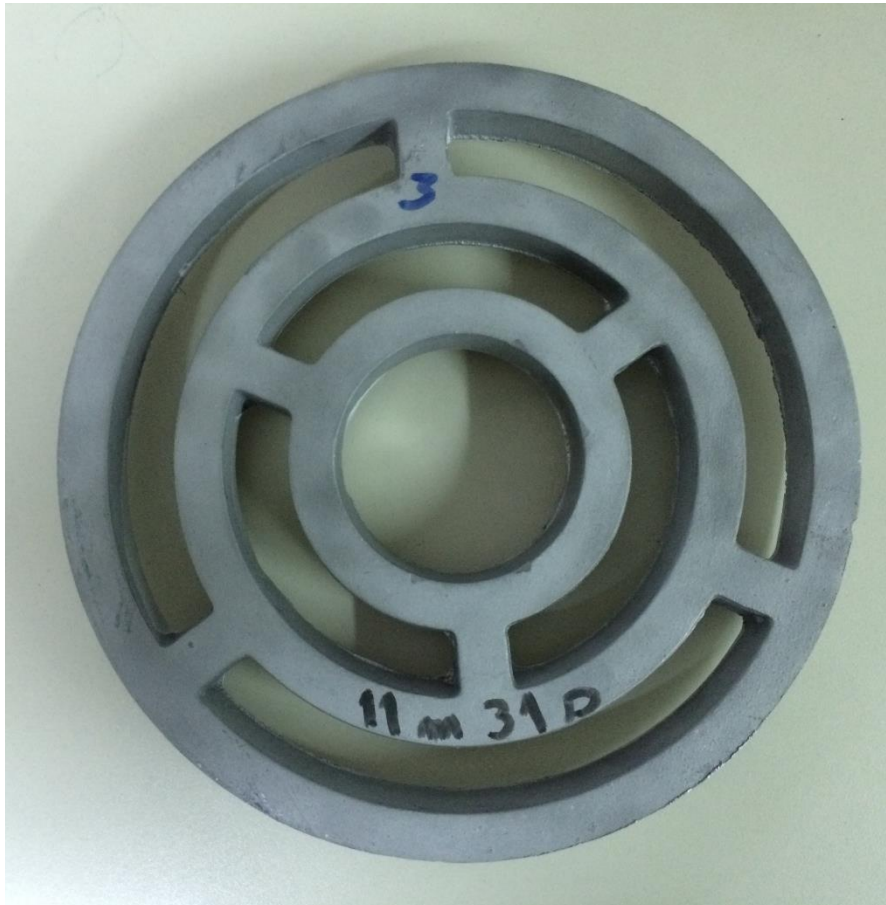


Figura 44. Peça 3 de fundição após a rebarbagem na célula robótica. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 11 minutos e 31 segundos.



Figura 45. Peça 3 de fundição após a rebarbagem na célula robótica.

10. Rebarbagem da Peça 2

Sendo assim, na última peça, utilizou-se o mesmo processo, e a mesma estratégia de rebarbagem que no segundo alinhamento da peça 3, começando por se fixar a peça à parte móvel do gabari.

10.1. 1ª Rebarbagem

1º Alinhamento

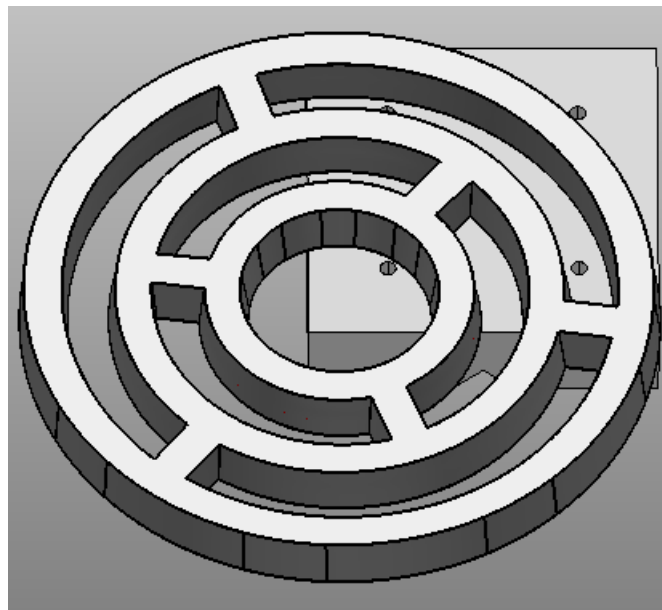


Figura 46. CAD do 1º alinhamento da Peça 2 de fundição.

Depois de fixa, fez-se o primeiro alinhamento, obtendo-se os planos de trabalho, e de seguida posicionaram-se as peças, ficando de acordo com o alinhamento real, Figura 46.

Programação da estratégia de Rebarbagem

Depois de se obter o ficheiro CAD com as duas partes posicionadas de acordo com a realidade, utilizou-se a mesma estratégia de rebarbagem que no caso da peça 3, segundo alinhamento: Dois acabamentos *Swarf* na parede lateral externa da peça de fundição, para se retirar o colo de entrada, com sobremetais de 0,5 mm e 0,2 mm e um acabamento Z Constante com um sobremetal de 0,1 mm para retirar a rebarba da zona interior da peça de fundição. Fez-se apenas uma pequena alteração, que foram as entradas e saídas da ferramenta, em vez de entrar diretamente para a

posição onde se inicia a rebarbagem, selecionaram-se entradas e saídas em arco horizontal, uma vez que no caso anterior a zona da peça onde se dava a entrada e saída da ferramenta originava uma marca na peça. Com este tipo de entrada e saída, pretendeu-se evitar que estas marcas voltassem a acontecer.

Depois de se obterem os percursos de ferramenta livres de colisões e singularidades, fez-se o pós-processamento.

Na Figura 47 podem observar-se os percursos de ferramenta calculados.

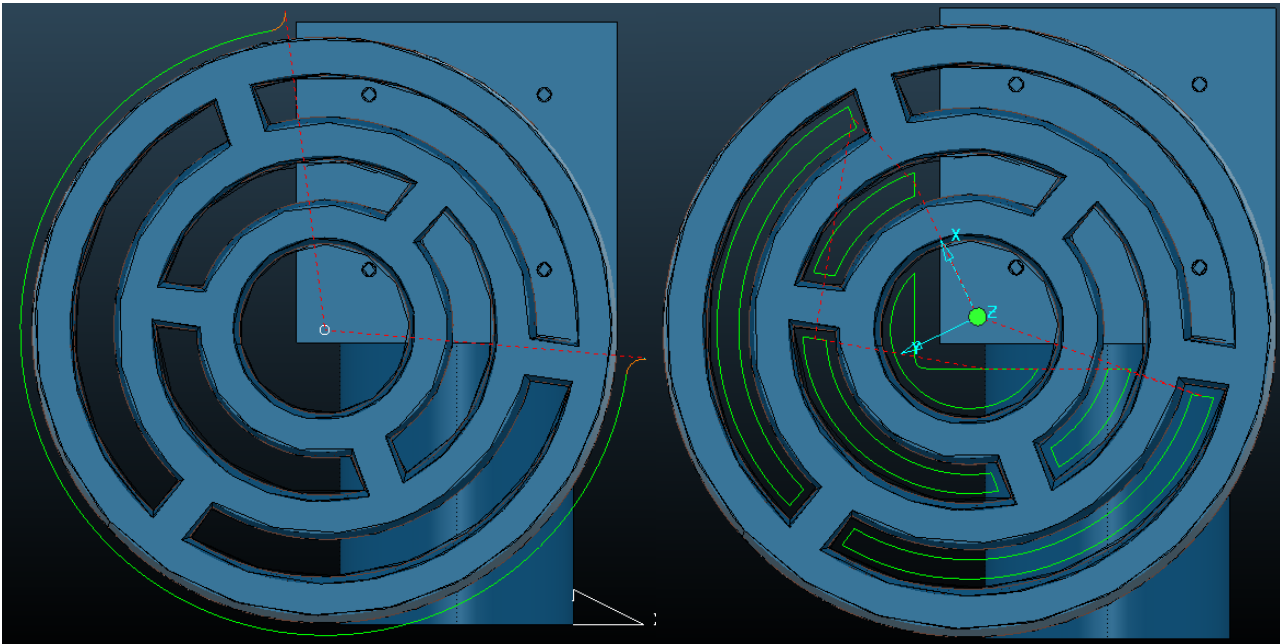


Figura 47. A verde verificam-se as estratégias utilizadas para rebarbar a peça 2, à esquerda a estratégia de acabamento Swarf e à direita Z Constante. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Pós-Processamento

O pós-processamento foi feito exatamente do mesmo modo que na peça 1 e 3.

Finalmente, importaram-se os ficheiros para o controlador do robô, executando-se depois a rebarbagem no modo manual do robô, demorando esta primeira rebarbagem da peça cerca de 3 minutos e 23 segundos.

10.2. 2ª Rebarbagem

Mudou-se a peça de posição, fixando-a do lado que já estava rebarbado, depois fez-se um segundo alinhamento (Figura 48), e de seguida importou-se o ficheiro adquirido para o *PowerMILL Robot Interface*.

2º Alinhamento

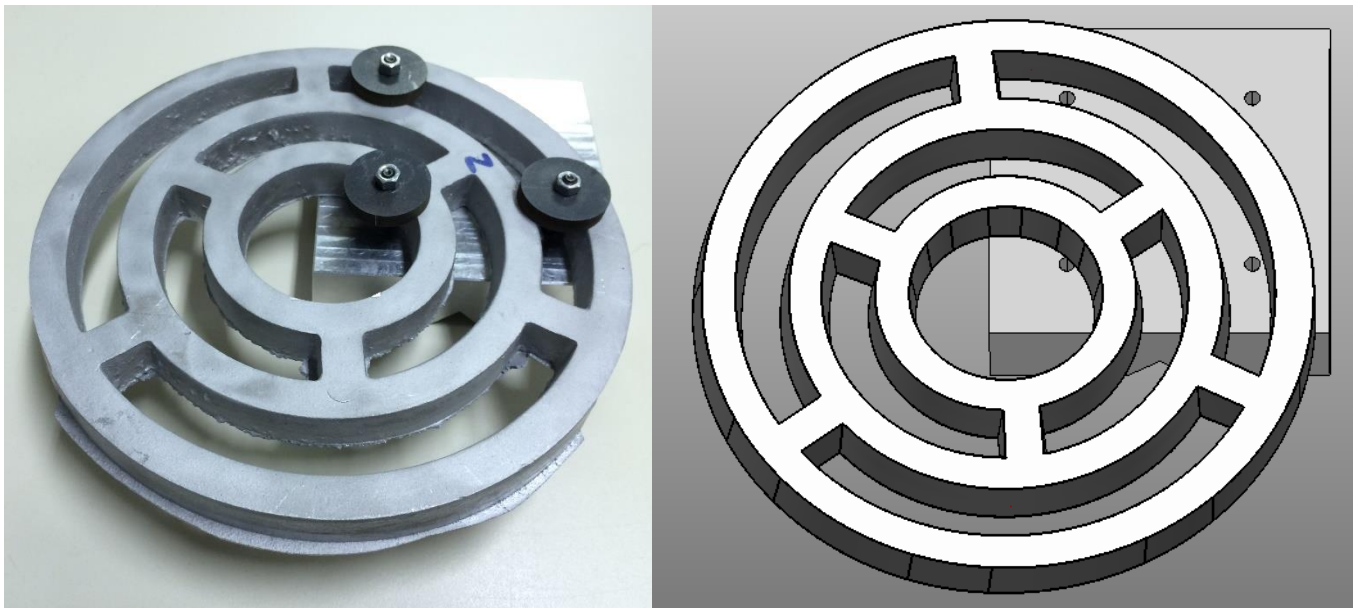


Figura 48. À esquerda verifica-se a Peça 2 de fundição fixa à parte móvel do Gabari e à direita o CAD do 2º alinhamento da Peça 2.

Programação da estratégia de Rebarbagem

Neste caso, como já se tinha conseguido bater o tempo de rebarbagem manual, e como se utilizou a mesma estratégia, bastou reimportar o ficheiro CAD com o segundo alinhamento, e recalculas as estratégias.

Fizeram-se então, dois acabamentos *Swarf* na parede externa da peça de fundição, com sobremetais de 0,5 mm e 0,2 mm e um acabamento Z Constante com um sobremetal de 0,1 mm. Na Figura 49 podem observar-se as estratégias utilizadas.

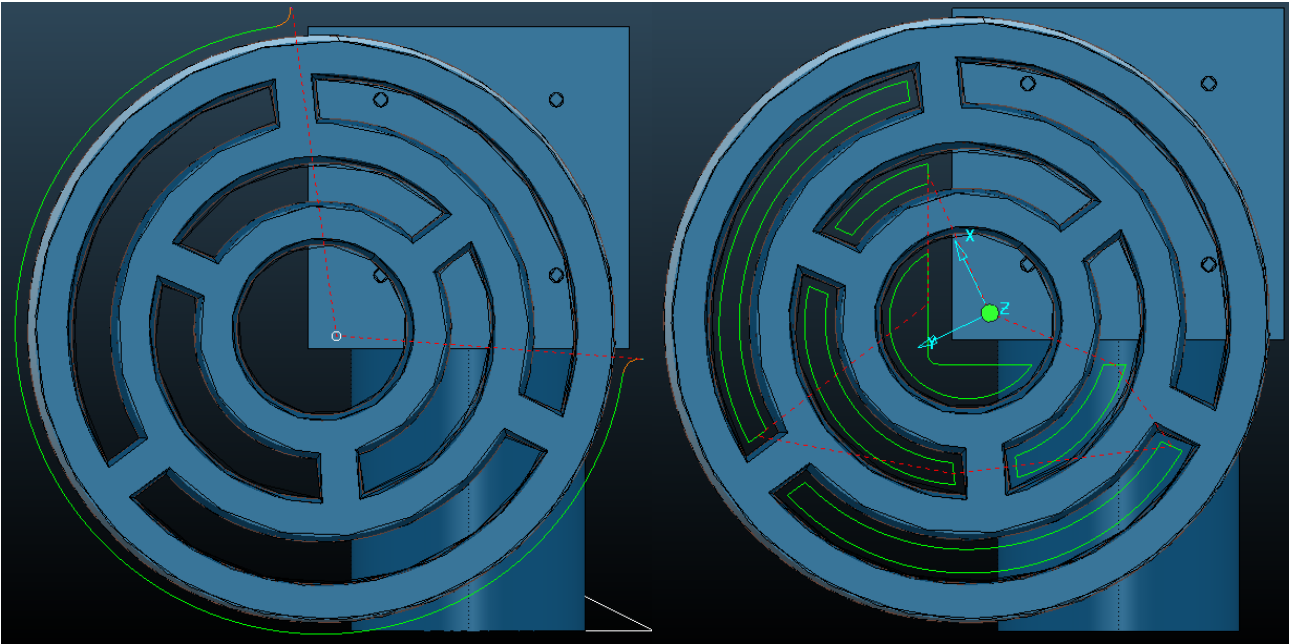


Figura 49. A verde verificam-se as estratégias utilizadas para rebarbar a peça 2, à esquerda a estratégia de acabamento Swarf e à direita Z Constante. A laranja verificam-se as entradas e saídas da ferramenta e a vermelho os movimentos de ligação.

Depois de se obterem os percursos de ferramenta livres de colisões e singularidades, fez-se o pós-processamento do mesmo modo que o anterior e de seguida passou-se o programa para o controlador do robô e executou-se a rebarbagem na célula robótica em modo manual, Figura 50.

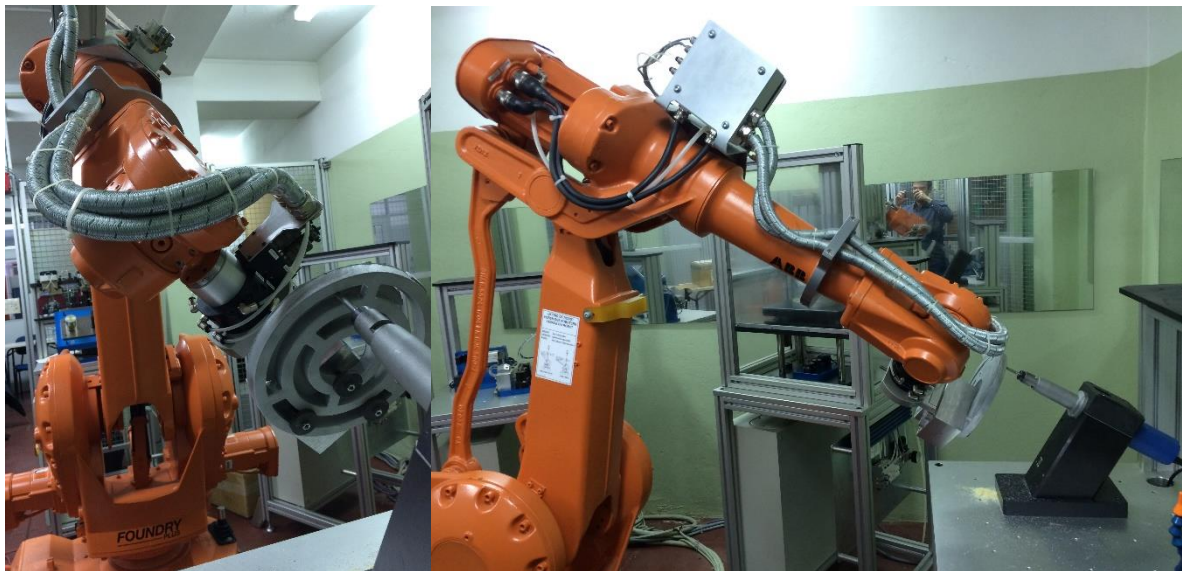


Figura 50. Rebarbagem da Peça 2 de fundição na célula robótica do CINFU.

Nas Figuras 51 e 52 consegue verificar-se como ficou a peça rebarbada, não se observando facadas, nem as marcas deixadas pelas entradas e saídas da ferramenta na peça.

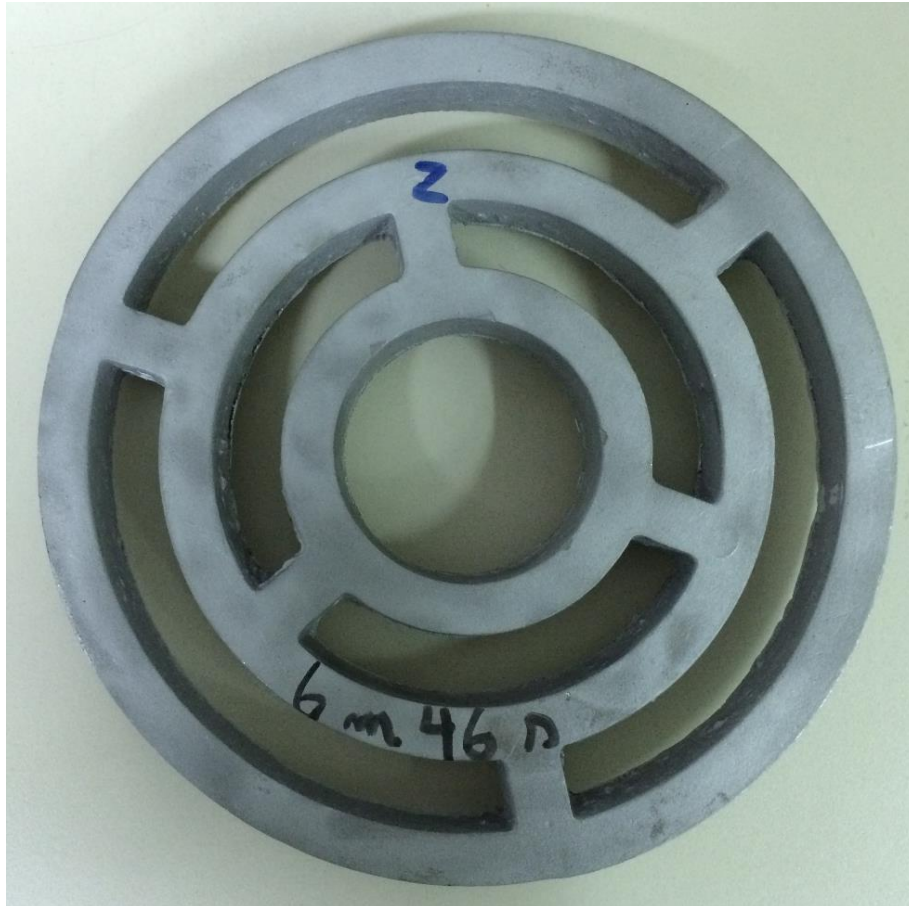


Figura 51. Peça 2 de fundição após a rebarbagem na célula robótica. O tempo de rebarbagem desta peça foi de 6 minutos e 46 segundos.



Figura 52. Peça 2 de fundição após a rebarbagem na célula robótica.

O tempo total gasto na rebarbagem do segundo alinhamento foi de 3 minutos e 23 segundos, dando um tempo total das duas rebarbagens desta peça de 6 minutos e 46 segundos.

Neste caso, conseguiu-se atingir o objetivo de rebarbar a peça de fundição na célula robótica num tempo inferior ao gasto a rebarbar a mesma peça manualmente, poupando-se cerca de **55 segundos** utilizando a célula robótica.

11. Metodologia

Todo o processo precedente a cada rebarbagem, desde a fixação da peça de fundição à parte móvel do gabari, passando pelo alinhamento utilizando o *Microscribe G2* e o *PowerSHAPE*, de seguida a programação da estratégia de rebarbagem em PRI, o pós-processamento, passagem dos ficheiros para o controlador

do robô e finalmente fixação da parte móvel do gabari à parte fixa do gabari no robô (ver Figura 53) demora tempo que foi medido para a última peça, onde todo o processo já estava ajustado, demorando cerca de **20 minutos**, tempo esse que pode ser muito otimizado como se vai discutir mais à frente.



Figura 53. Montagem da parte móvel do gabari à parte fixa do gabari com parafusos M5.

Na Figura 54 pode observar-se um fluxograma com todas as fases da metodologia, e no Anexo B pode consultar-se o Manual do Utilizador, onde se mostra passo a passo todas as etapas do processo, rebarbagem de uma peça de fundição numa célula robótica com programação *offline* em CAM, com os equipamentos disponíveis no CINFU.

Todo o processo precedente à rebarbagem pode ser dividido em 4 fases: a Fixação, o Alinhamento, a Programação da Estratégia de Rebarbagem e o Pós-Processamento, mostrando-se de seguida, de que modo é que estas fases podem ser otimizadas de modo a diminuir-se consideravelmente o tempo de preparação.

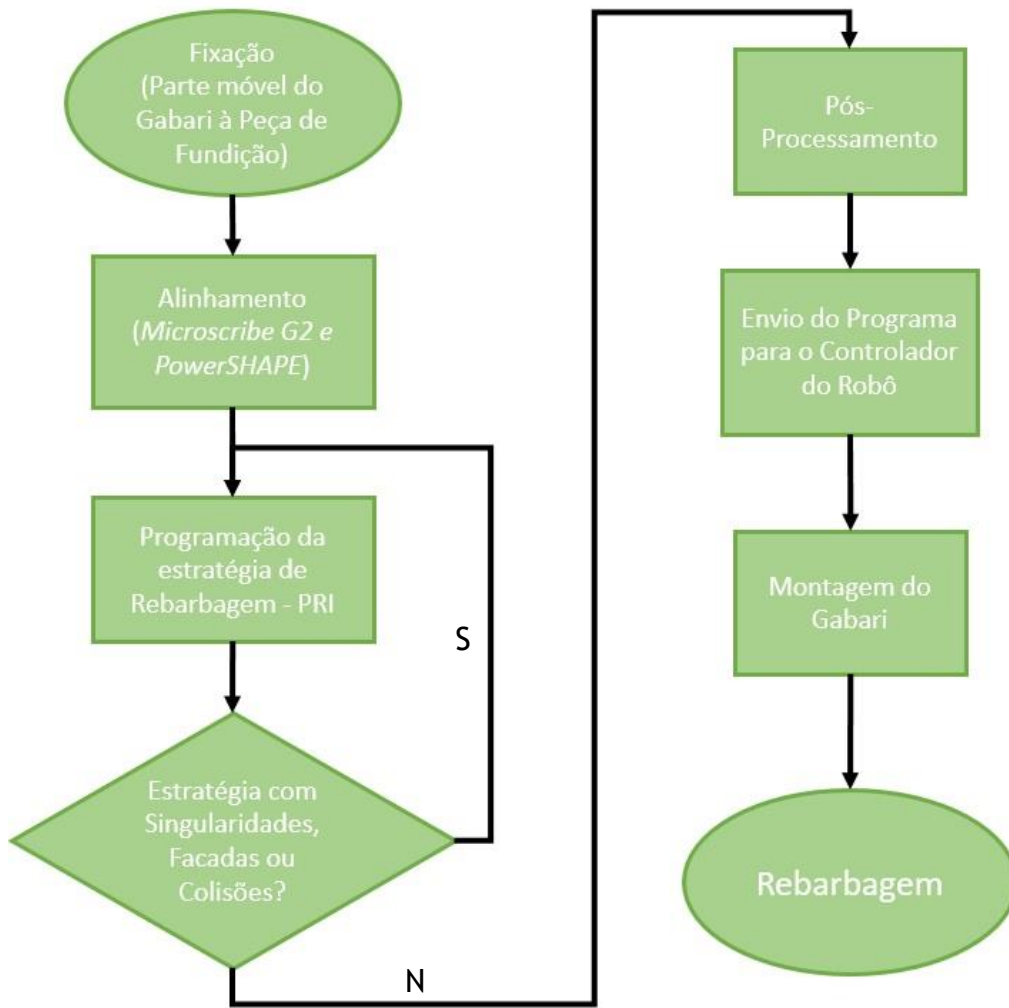


Figura 54. Fluxograma do processo de rebarbagem de peças de fundição através de programação offline em CAM.

12. Discussão dos Resultados

Porquê *Part-on-robot*?

Para a rebarbagem de peças de fundição, escolheu-se a cinemática *part-on-robot* uma vez que apresenta mais vantagens, sendo a principal, a grande liberdade de movimento conferida à peça. Por outro lado, quando a ferramenta é segura num *spindle* que está numa bancada fixa, isto confere maior rigidez à rebarbagem, do que se a ferramenta fosse fixa ao robô.

Gabari

A produção de um gabari tornou-se vital neste processo uma vez que a garra do robô não era forte o suficiente para segurar uma peça durante a rebarbagem, podendo a peça, mudar de posição, impedindo a rebarbagem devido ao percurso calculado não poder ser utilizado ou mesmo a peça soltar-se.

O gabari foi também contruído com duas partes (móvel e fixa), uma vez que para se fazer o alinhamento, o CINFU possuía um braço de medição tridimensional, pelo que para se saber o posicionamento da peça, era necessário fixar a peça ao gabari e depois levar o conjunto para junto do braço de medição para se saber a posição da peça relativamente à parte móvel do gabari. Como era sabido exatamente como encaixava a parte móvel do gabari à parte fixa do gabari que estava presa a um componente do robô, conseguia-se então saber a posição da peça no PRI para se calcular a estratégia de rebarbagem.

Contudo, o gabari poderia ter menor volume, reduzindo o peso do mesmo, o que iria contribuir para a rebarbagem, podendo rebarbar-se peças de maior peso, estando este robô limitado a 12 Kg.

Maquinagem do *cowling* em poliuretano expandido

Com a maquinagem do *cowling* pretendeu-se comprovar que é possível utilizar a mesma estratégia de maquinagem em peças com posicionamentos diferentes.

Usando a mesma ferramenta e a mesma estratégia de maquinagem sobre uma peça já maquinada com essa estratégia, o ideal seria que a ferramenta percorresse exatamente o mesmo percurso, não penetrando a peça em poliuretano expandido, ocorrendo exatamente isso. De seguida, mudou-se a peça de posição, fez-se um novo alinhamento e usou-se outra vez a mesma estratégia de maquinagem, comprovando-se que era possível rebarbar peças muito semelhantes, aplicando-se a mesma estratégia de rebarbagem.

Com comprovou que se conseguiam alinhar peças com o equipamento disponível.

Produção de peças de Fundição

As peças foram produzidas por fundição, utilizando areia de contacto para os moldes. A placa molde em madeira que deu origem aos moldes já existia no CINFU. Já o ficheiro CAD da peça não, pelo que teve de ser desenhada utilizando o *software* de modelação tridimensional, *PowerSHAPE*, a partir da placa molde, utilizando um paquímetro para as medições, que pode ter dado origem a alguns erros nas dimensões do ficheiro CAD da peça relativamente às dimensões reais do modelo e por ventura, nos percursos de ferramenta calculados em *PowerMILL*.

Rebarbagem das peças de Fundição

Com todo o trabalho realizado verificou-se ser possível a rebarbagem de peças de fundição numa célula robótica com programação *offline* em CAM, verificou-se também que o tempo de rebarbagem utilizando o robô obtido foi melhor do que a mesma feita manualmente, isto, sem contabilizar que, a rebarbagem manual implica muita mão-de-obra, implica um trabalho doloroso para os colaboradores, implica riscos para a saúde humana, implica legislação muito apertada, implica um trabalho menos previsível do que quando feito com o robô enquanto que utilizando o robô, a rebarbagem pode ser feita continuamente, com previsibilidade e automática quando o processo muito otimizado.

Os únicos defeitos foram o tempo de preparação para cada rebarbagem, o qual pode ser bastante reduzido e a baixa rigidez da célula robótica, tanto da bancada onde se encontra o *spindle* como do robô, o que prejudica a velocidade da rebarbagem e a qualidade da mesma, obrigando a utilizar velocidades e passos laterais menores. Outro problema, foi a necessidade de se usar uma ferramenta com baixo diâmetro (6 mm) devido ao *spindle* só segurar ferramentas até esse diâmetro, tendo menor robustez o que prejudica a velocidade de rebarbagem. Todos estes

problemas advêm de se ter utilizado uma célula robótica “acadêmica” onde a maior parte dos constituintes têm baixa rigidez, também a bancada onde se encontra o suporte de *spindle*, quando solicitada, por vezes, vibrava em demasia o que prejudica a rebarbagem, sendo necessário optar-se por estratégias com velocidades de avanço inferiores.

Observando as Figuras 33, 34, 37, 38, 44, 45, 51 e 52 das peças pós rebarbadas, verifica-se que as que foram rebarbadas no robô têm maior qualidade superficial e uniformidade que a peça rebarbada manualmente.

Metodologia

Todo o processo mostrou ser eficaz, uma vez que se conseguiu rebarbar três peças de fundição, mas pouco eficiente, devido ao tempo de preparação para cada rebarbagem ser muito alto, como já foi referido. Já o tempo de rebarbagem efetivo foi bom, apesar de todas as melhorias que se podem fazer, como a utilização de robôs mais robustos e precisos, uma célula robótica industrial, com bancadas rígidas e que admitam ferramentas mais robustas, diminuindo-se ainda mais o tempo de rebarbagem.

O tempo de preparação também pode ser muito reduzido, se utilizar um scâner tridimensional para fazer o alinhamento. Deste modo, a peça poderia ser fixa diretamente no robô com a utilização de um gabari (mais pequeno e rígido) e de seguida, caso a célula robótica tivesse um scâner, poderia ser feita a digitalização da peça, relativamente ao plano do sexto eixo do robô. A nuvem de pontos serviria para fazer um alinhamento *best fit* do CAD da peça, sendo só necessário recalcular o percurso em PRI na nova peça alinhada, pós-processar e rebarbar. Todo este processo seria automático com a utilização de macros feitas para cada referência, sendo necessário um colaborador a fazer a fixação da peça ao robô, um trabalho muito menos doloroso.

13. Conclusão

Esta dissertação de mestrado consolidou os conhecimentos adquiridos durante o Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais sobre algumas das ferramentas usadas no mundo empresarial, em particular no campo da maquinagem. Para o desenvolvimento da mesma foi possível realizar um estágio no CINFU que permitiu contactar diretamente com outra realidade mais próxima da indústria.

Para se executar a rebarbagem em peças de fundição numa célula robótica através de programação *offline* em CAM foi necessário ultrapassar alguns obstáculos:

- Aprender e dominar o *software* PRI para programação dos percursos de ferramenta;
- Aprender o funcionamento, manipulação e controlo do robô ABB IRB 2400-16;
- Aprender a utilizar o braço de medição tridimensional, *Microscribe G2*.

Após a resolução destes problemas, foi possível iniciar alguns testes para se verificar se conseguiam executar os mesmos percursos de ferramenta em peças com alinhamentos diferentes, e para isso foi necessária a elaboração de um gabari, que inicialmente não solucionou o problema, uma vez que a posição em que o robô ficava para maquinar a peça, era de singularidade, pelo que se teve de alterar o projeto do gabari, de modo ao robô ficar numa posição perpendicular à que estava.

Depois da elaboração do novo gabari, conseguiu comprovar-se a execução do mesmo percurso em peças desalinhadas, passando depois para a rebarbagem de peças de fundição.

Para a execução da rebarbagem, definiu-se uma metodologia, que foi otimizada no final da rebarbagem de cada peça, a qual é constituída por 4 fases, nomeadamente: Fixação, Alinhamento, Programação do percurso de ferramenta e o Pós-processamento. Esta metodologia, foi executado várias vezes com sucesso, conseguindo-se atingir o objetivo desta dissertação, a rebarbagem de peças de fundição numa célula robô através de programação *offline* em CAM. Contudo, houve algumas limitações no processo, devido ao equipamento disponível no CINFU, durando, todas as etapas antecedentes à rebarbagem, um tempo excessivo, atingindo-se na última peça rebarbada o melhor tempo de preparação, cerca de 20 minutos.

Todavia, o melhor tempo efetivo de rebarbagem na célula robótica foi muito promissor, uma vez que foi bastante menor que o tempo da rebarbagem manual de uma peça idêntica, apesar de todos os defeitos inerentes à célula robótica “acadêmica” do CINFU que obrigaram a utilizar velocidades de avanço na rebarbagem inferiores. Entre eles, a baixa robustez e rigidez da bancada onde se encontra o suporte de *spindle*, o que provocava elevada vibração da mesma durante a rebarbagem, a utilização de uma fresa em vez de um disco de rebarbagem, que era mais apropriado e também devido à baixa rigidez do robô, o que obrigou a utilização de velocidades de rebarbagem menores. Mesmo assim, conseguiram-se tempos de rebarbagem com robô inferiores aos tempos de rebarbagem manuais, o que leva a pensar que se se conseguir otimizar todo o processo que inclui a fixação, o alinhamento, a programação do percurso de maquinagem e o pós-processamento, de uma forma semiautomática, pode mesmo conseguir-se rebarbar em pouco tempo peças de fundição, o que irá trazer vantagens tanto para as empresas como para os colaboradores.

Todo este trabalho culminou com a publicação de um artigo, “Rebarbagem e Acabamento em Célula Robô através de Programação *Offline* em CAM”, na revista “Fundição” da Associação Portuguesa da Fundição.

14. Sugestões para Otimização do Trabalho

Para a melhoria do trabalho sugeria-se o desenho de todas as bancadas da célula robótica e adicionar ao ficheiro *mtd.* do robô do CINFU, isto para evitar colisões não previstas pelo *software*.

Sugeria-se também o melhoramento do pós-processador do robô, nomeadamente o que já foi referido anteriormente, no final de algumas estratégias de maquinagem o *spindle* desliga, não voltando a ligar quando inicia uma nova estratégia de maquinagem.

A diminuição do peso do gabari para aumentar a capacidade disponível para peças a rebarbar também pode ser importante, sugerindo a elaboração de um gabari mais pequeno e leve.

Sugeria-se também a elaboração de macros para o cálculo das estratégias de rebarbagem de peças da mesma série e também para se fazer o alinhamento em *PowerSHAPE*, sendo necessário apenas a captação de pontos manualmente e o restante ser feito de modo automático com a utilização da macro. Mas para isto, os pontos captados teriam de ser sempre das mesmas zonas em peças diferentes e com a mesma ordem de captação, pelo que seria muito propício a erros.

Poderia fazer-se o alinhamento com um scâner tridimensional como já foi referido ou então, utilizando a cinemática *part-on-table*, havendo uma primeira etapa onde o robô segurava uma ponteira de medição tridimensional para captar os pontos na peça e de seguida segurava a ferramenta para execução da rebarbagem, mas com isto perdia-se mobilidade, uma vez que a peça estava fixa a uma bancada e perdia-se muito tempo na troca de ferramentas.

Referências Bibliográficas

- [1] - CINFU, <http://www.cinfu.pt>, acessido a 7 de Junho de 2016.
- [2] - Norcam, <http://www.norcam.pt>, acessido a 7 de Junho de 2016.
- [3] - Marques Barbosa J., 2010, “Concepção e Simulação de Célula Robotizada para Operações de Acabamento”, FEUP.
- [4] - Domingues L. F., 2015, “Implementação de Solução CAM na célula robótica do CINFU”, FEUP.
- [5] - Delcam, PowerMILL Robot Interface -*Robot Workplanes / Output Files*, 2011.
- [6] - Delcam, PowerMILL Robot Interface -*Introduction to Robotics*, 2011.
- [7] - PowerMILL Robot Interface, *Introduction to Robotics*, Franck Messmer, Senior Analyst, Delcam Plc, 2011.
- [8] - ABB, *Product manual - IRB 2400*. Västerås, Sweden: ABB AB - Robotics Products, 2013.
- [9] - ABB, *Operating manual - IRC5 with FlexPendant*. Västerås, Sweden: ABB AB - Robotics Products, 2013.
- [10] - Delcam, "*PowerMILL Robot - Training*," [Apresentação]. Birmingham, UK: Delcam, 2012.
- [11] - Delcam, <http://www.delcam.com>, acessido a 12 de Março de 2016.
- [12] - Tct, <http://www.tctmagazine.com>, acessido a 18 de Março de 2016.
- [13] - Welbourn, Donald. "The Development of Computer Aided Design and Manufacture - CAD/CAM". Cambridge University Engineering Department.
- [14] - Autodesk, "Autodesk Completes Acquisition of Delcam".
- [15] - "Delcam's New PowerSHAPE CAD Enhances Direct Modelling and Reverse Engineering". CIMdata.
- [16] - Dean, Al. "PowerShape Pro 2013". Develop3D.

[17] - PowerSHAPE CAD Software, www.powershape.com, acessido a 15 de Abril de 2016.

[18] - DELCAM UK, PowerSHAPE Training Course, 2012.

[19] - PowerMILL CAM software, www.powermill.com, acessido a 20 de Abril de 2016.

[20] - DELCAM UK, PowerMILL Training Course, 2014.

[21] - DELCAM UK, PowerINSPECT Training Course, 2012.

Anexo A

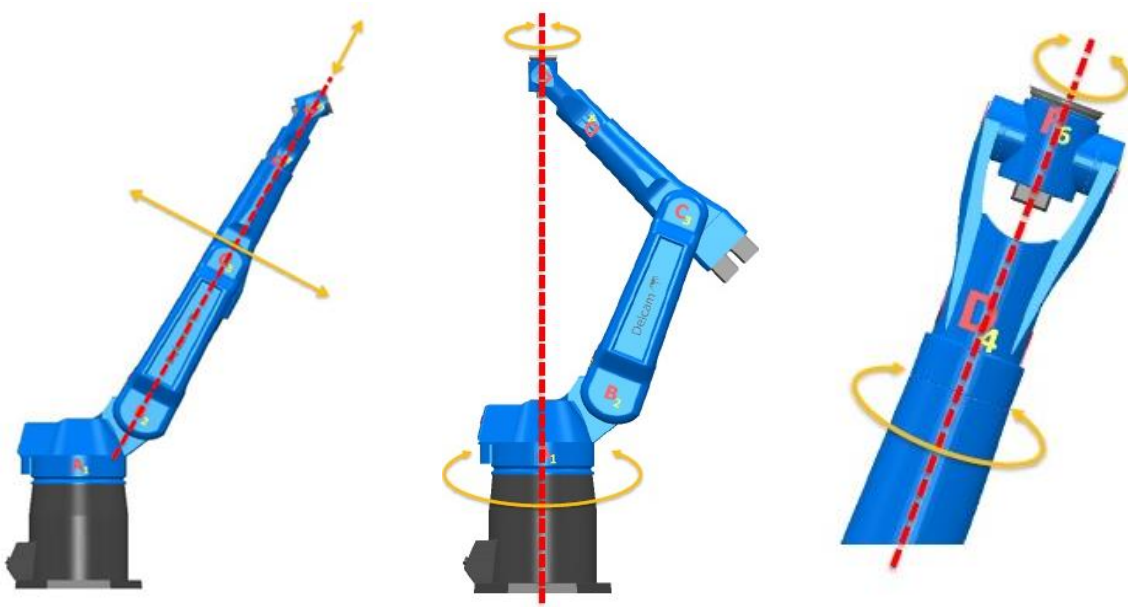


Figura A1. À esquerda verifica-se a singularidade do cotovelo, no centro verifica-se a singularidade de alinhamento e à direita verifica-se a singularidade de pulso [6].

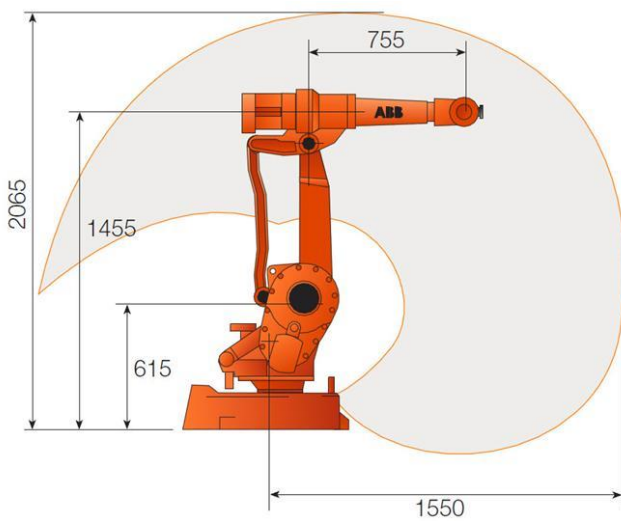


Figura A2. Representação esquemática do robô IRB 2400-16.

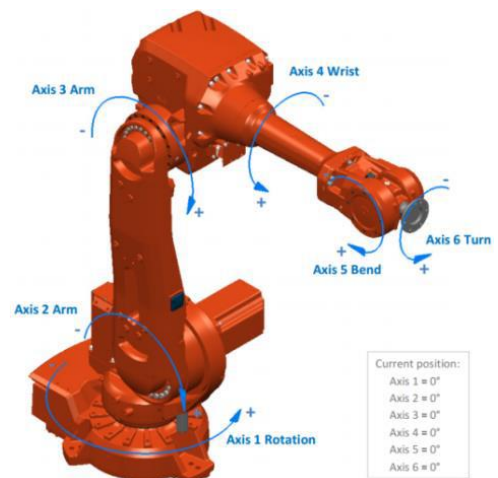


Figura A3. Representação esquemática dos eixos do robô IRB 2400-16.



Figura A4. O botão de cima é o de paragem de emergência, o do meio é o de ligação dos motores e em baixo de seleção do modo de funcionamento.

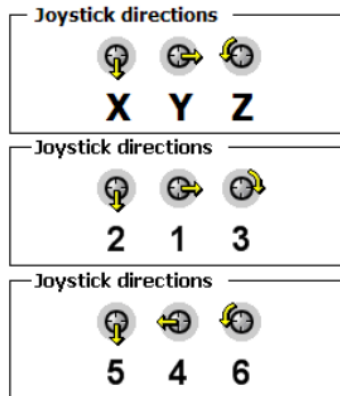


Figura A5. Correlação entre os movimentos do joystick e a movimentação do robô [9].



Figura A6. A laranja, botões de paragem de emergência da célula robótica do CINFU.

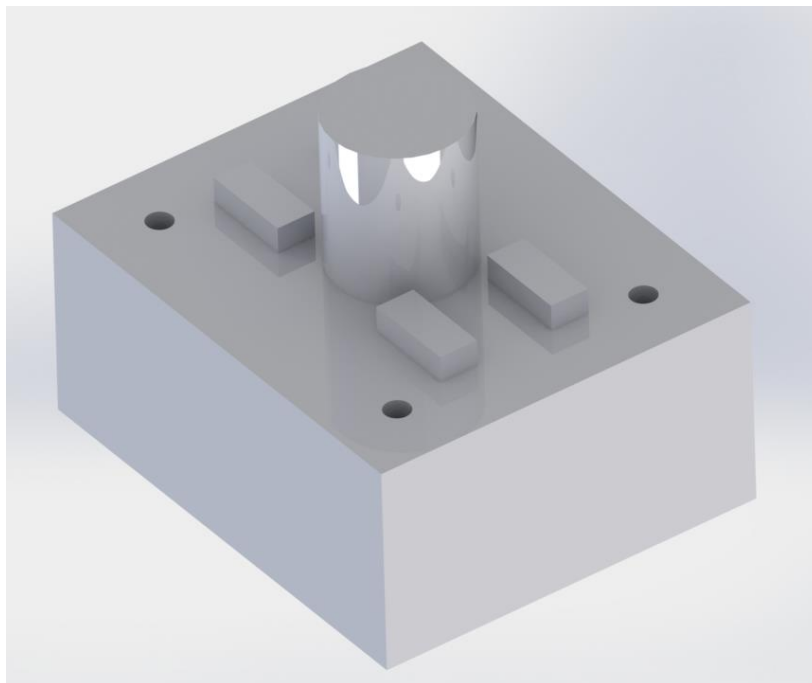


Figura A7. Render do gabari 1 em PowerSHAPE.

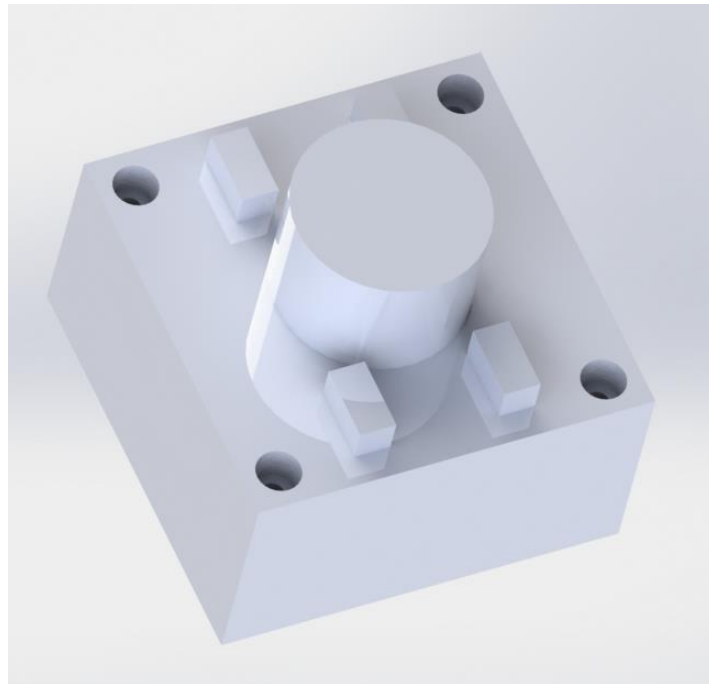


Figura A8. Render do gabari 2 em PowerSHAPE.

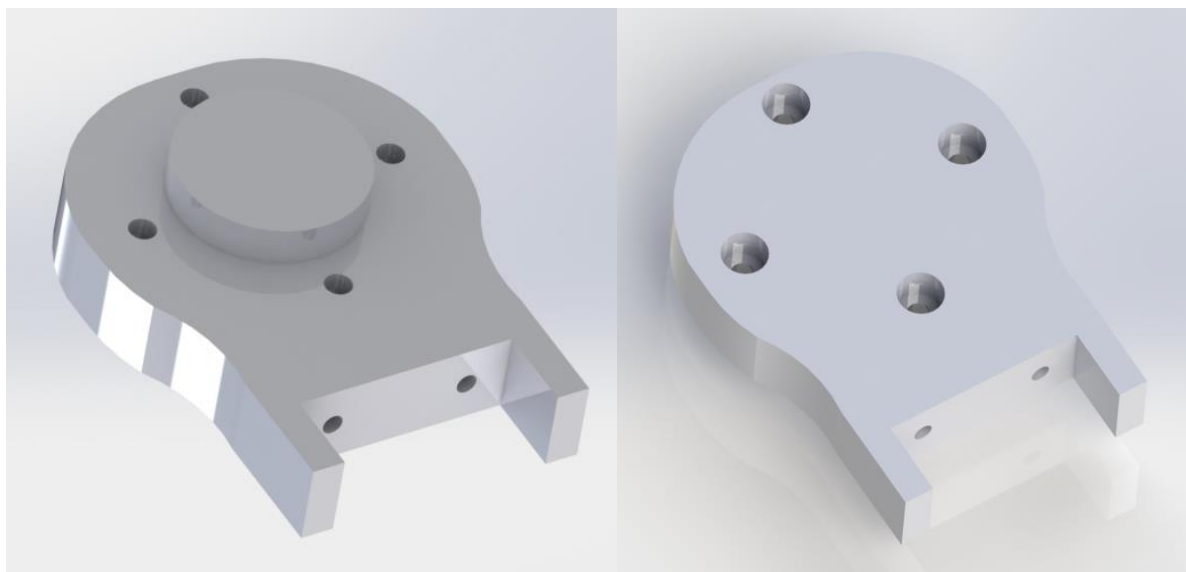


Figura A9. Render do acessório do Gabari 3 em PowerSHAPE em diferentes vistas.

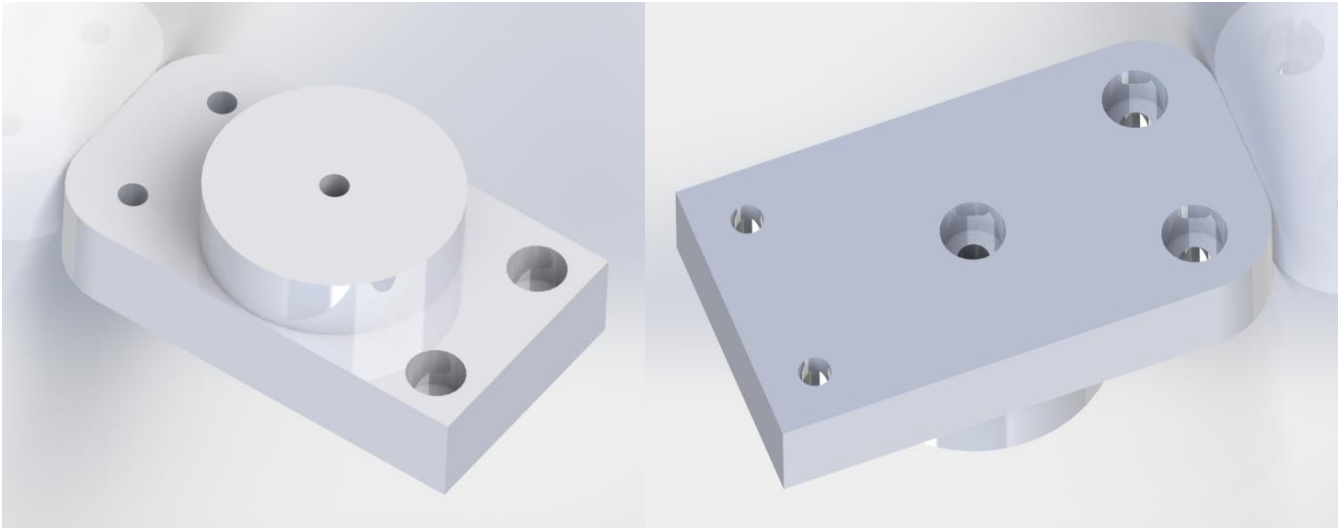


Figura A10. Render do acessório do Gabari 3 em PowerSHAPE em diferentes vistas.

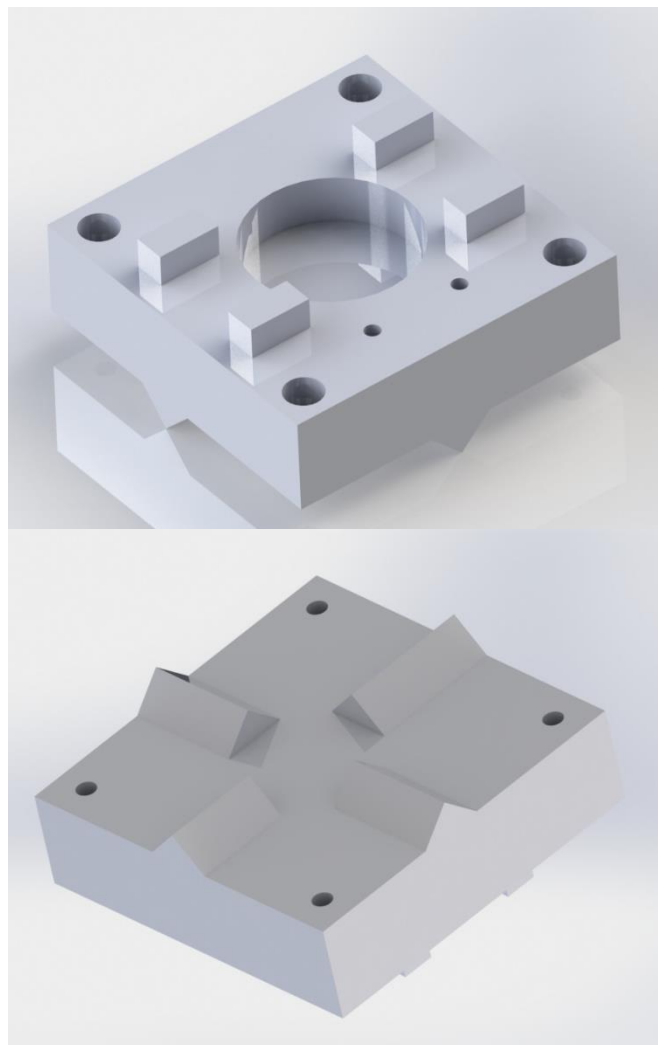


Figura A11. Render do Gabari 3 com diferentes vistas em PowerSHAPE.

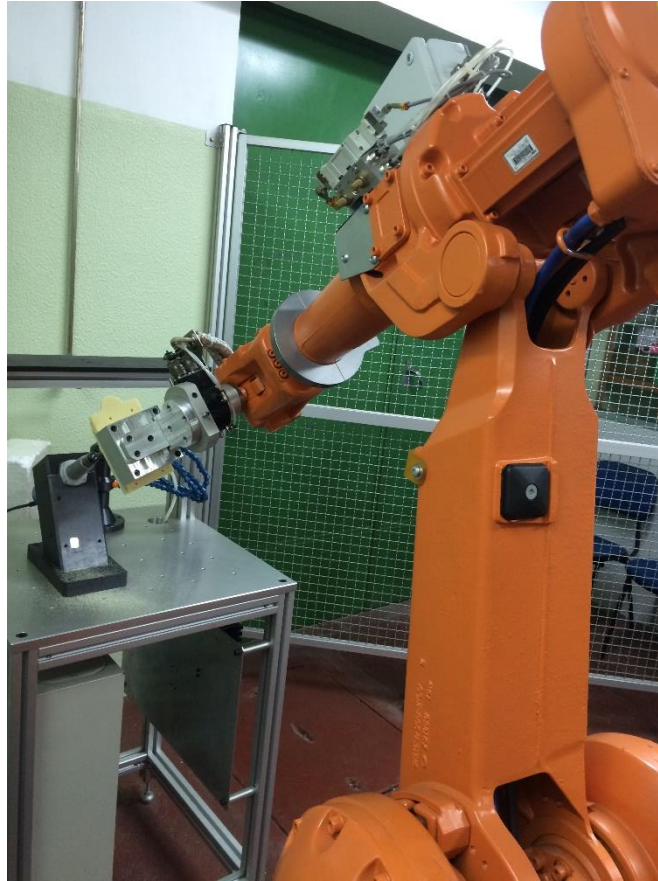


Figura A12. Maquinagem do cowling na célula robótica do CINFU



Figura A13. Placas molde com pó de desmoldação e caixas de moldação.



Figura A14. Enchimento das caixas de moldação com areia de contacto e posterior prensagem.



Figura A15. Moldações prontas para o vazamento.

Anexo B

Manual do Utilizador para Rebarbagem de uma Peça de Fundição



Sérgio Oliveira da Costa

Porto, Junho de 2016

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

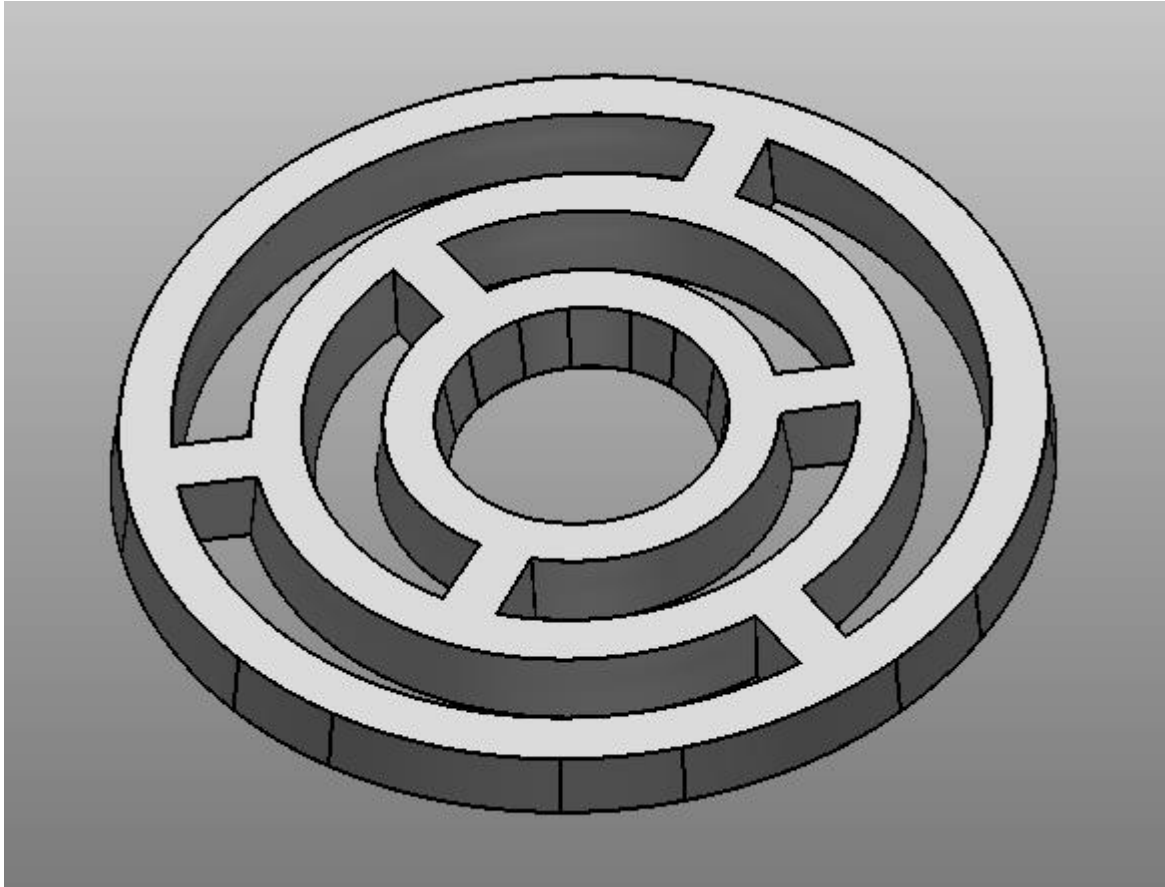
Índice

| | |
|--|-----|
| 1. Desenhar modelo CAD do Fundido | 72 |
| 2. Montagem da Peça de Fundição | 72 |
| 3. Ligar <i>PowerSHAPE</i> | 74 |
| 4. Alinhamento | 74 |
| 4.1 Alinhar GABARI | 75 |
| 4.2 Alinhar PEÇA..... | 81 |
| 5. Posicionamento no <i>PowerMILL</i> | 106 |
| 6. Programação do percurso de ferramenta em <i>PowerMILL</i> | 108 |
| 7. Pós-Processamento | 108 |
| 8. Montagem do Gabari..... | 111 |
| 9. Colocação de percursos no controlador do Robô | 112 |
| 10. Execução da Rebarbagem | 114 |

1. Desenhar modelo CAD do Fundido

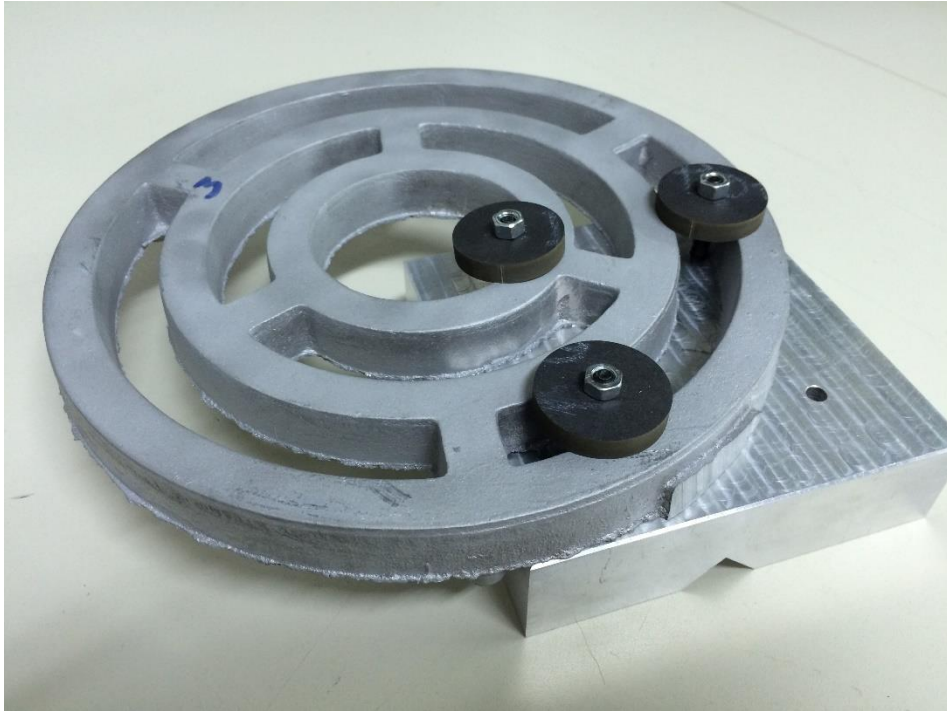
Se a peça de fundição a ser rebarbada na célula robótica não tiver modelada, inicialmente, deverá proceder-se à modelação da mesma, num *software* de modelação tridimensional.

Depois de modelada, deve gravar-se o ficheiro num dos seguintes formatos: *dgk* ou *IGES*, de modo a ser compatível com os programas usados mais à frente.

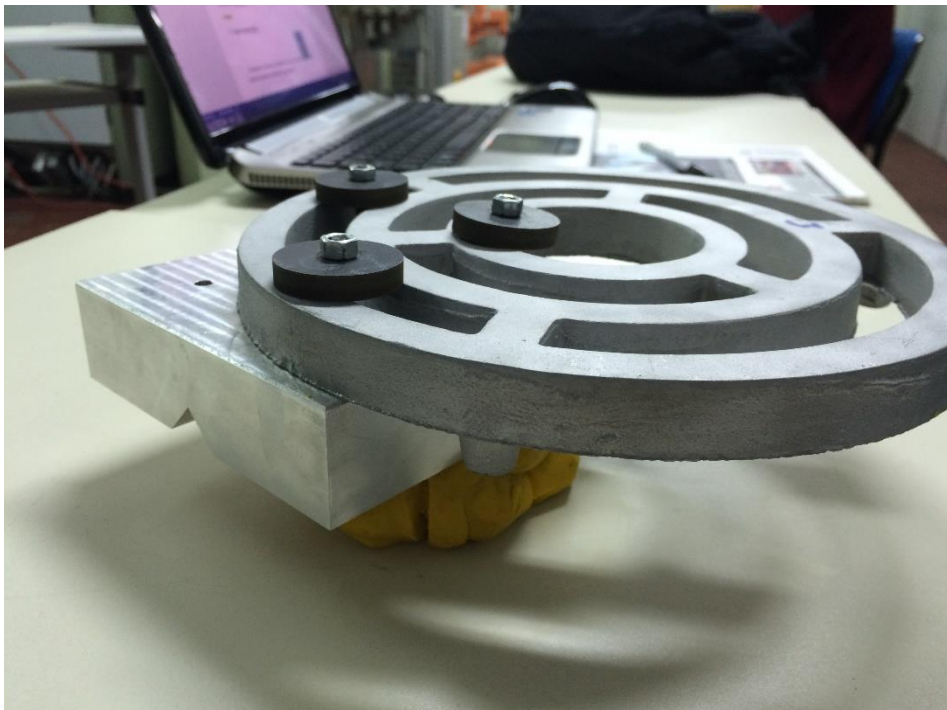


2. Montagem da Peça de Fundição

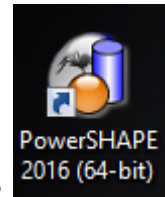
De seguida, acopla-se a peça de fundição à parte móvel do gabari (cada tipo peça de fundição tem uma parte móvel do gabari própria para a sua fixação, deverá escolher a parte móvel do gabari adequada para a fixação da peça de fundição).



Depois de acoplada, com o auxílio de plasticina, fixar o conjunto (parte móvel do gabari mais a peça de fundição) a uma bancada junto ao braço de medição tridimensional, *MicroScribe G2*.



3. Ligar *PowerSHAPE*




No ambiente de trabalho do computador, clicar 2 vezes no ícone do software de modelação tridimensional, *PowerSHAPE*.

4. Alinhamento

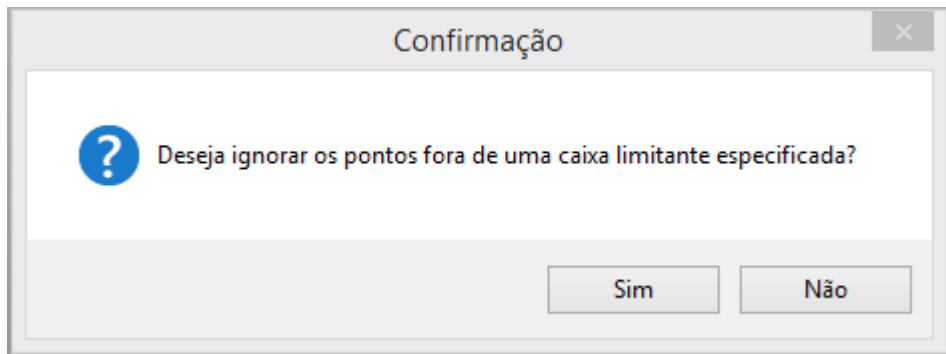
Inicialmente, faz-se a ligação do braço de medição 3D ao computador:

- Ligue o braço à corrente elétrica,
- Ligue o cabo USB a uma entrada USB do computador,
- Ligue o comando para captação de pontos ao braço de medição 3D.

Depois de conectado, carregue no botão branco “*HOME*” no braço de medição e no *PowerSHAPE* carregue em conectar o braço .



Cancele a janela que aparece e na seguinte mensagem, responda “não”.



| Coordenadas CMM | |
|-----------------|---------|
| X | 70.527 |
| Y | 17.274 |
| Z | 272.615 |

Deverá aparecer-lhe esta janela, não a encerre.

4.1 Alinhar GABARI

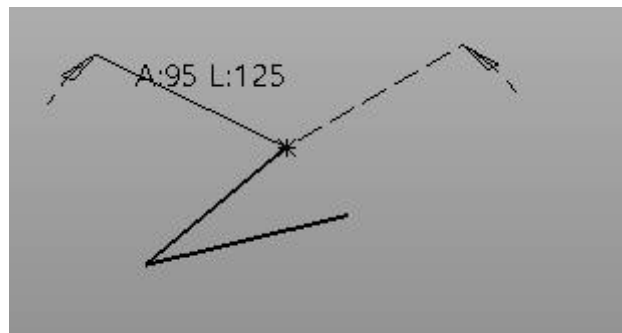
O ficheiro CAD da parte móvel do gabari foi gravado segundo determinado plano de trabalho, pelo que deve saber exatamente qual é esse plano de trabalho para a próxima fase.



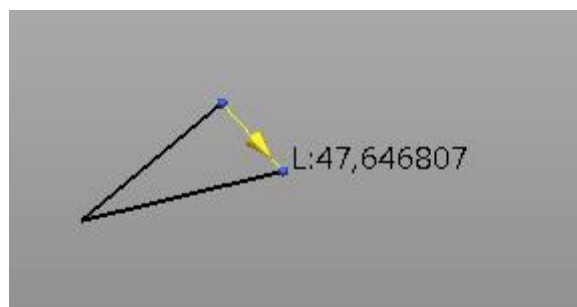
Clique em criar uma linha contínua e posicione a ponteira do braço de medição 3D na superfície de cima da parte móvel do gabari e com o botão direito do braço de medição capte um ponto.





De seguida capte outro ponto nessa mesma superfície, deslocando a ponteira do braço para outro local e clicando no botão direito do pedal. Finalmente capte um terceiro ponto com a mesma técnica.

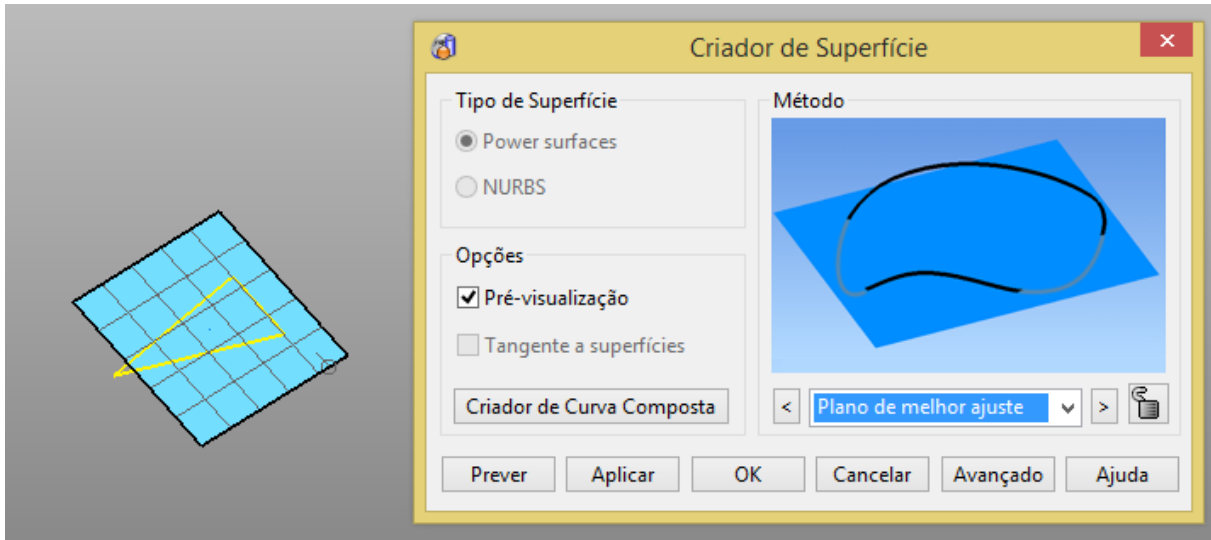


Depois com o rato feche a figura que construiu no *PowerSHAPE*. O resultado deve ser o seguinte:



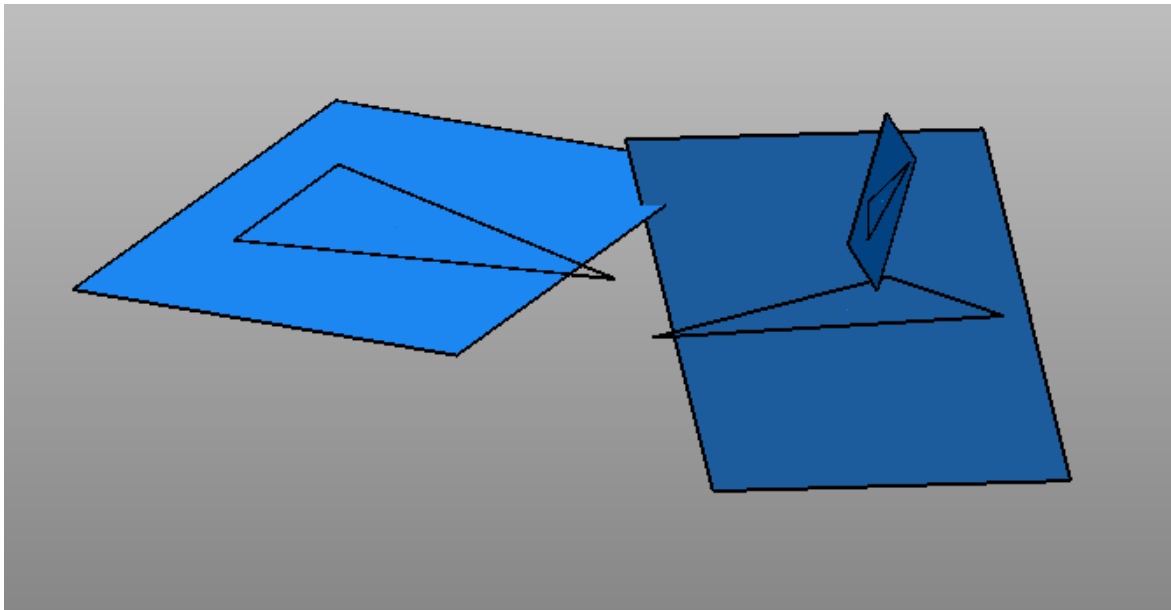
Com isto, construa um plano, clicando em Superfície  e de seguida seleccione o modelo de arames e clique em Criador de Superfície .

Selecione a opção “Plano de Melhor Ajuste” e aceite o diálogo.

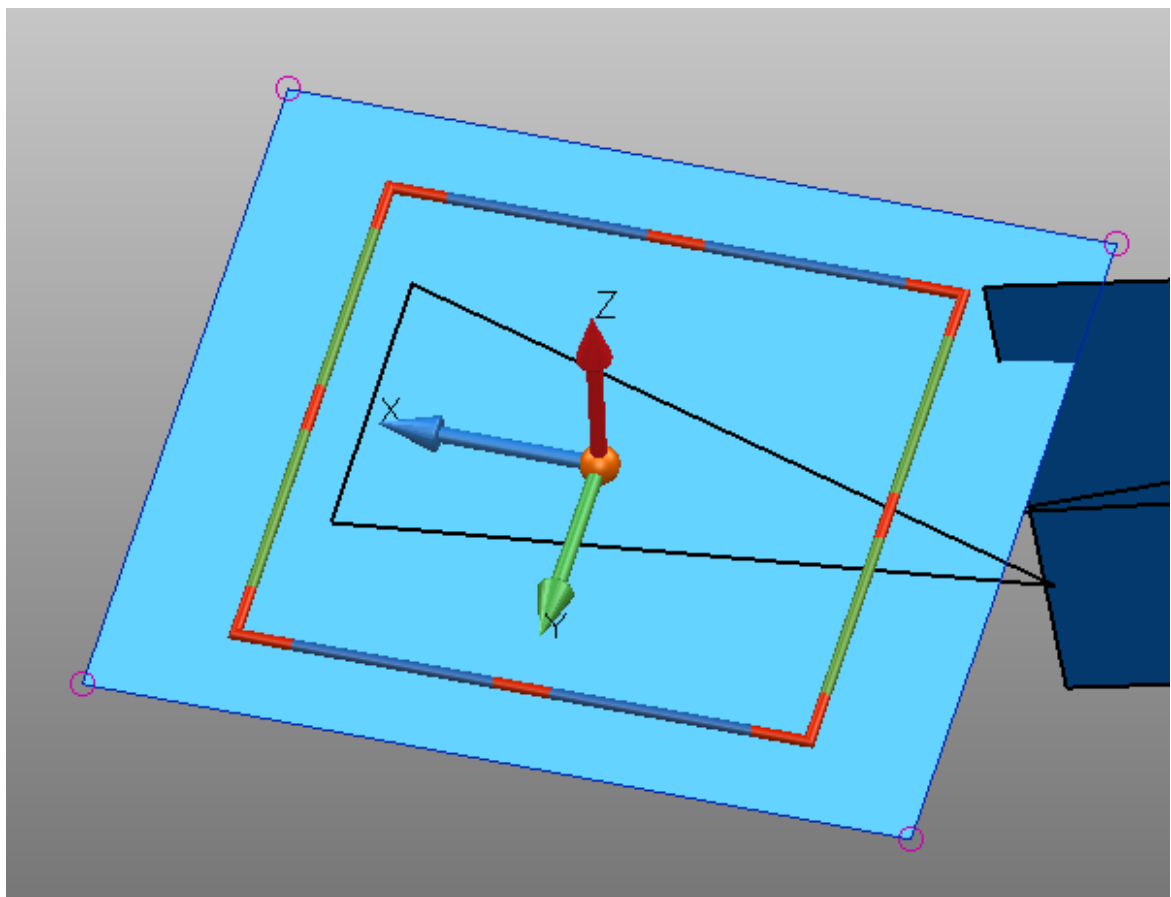


Repita o processo para o plano da direita e de seguida para o plano de trás, pelo que deverá obter algo semelhante ao seguinte:

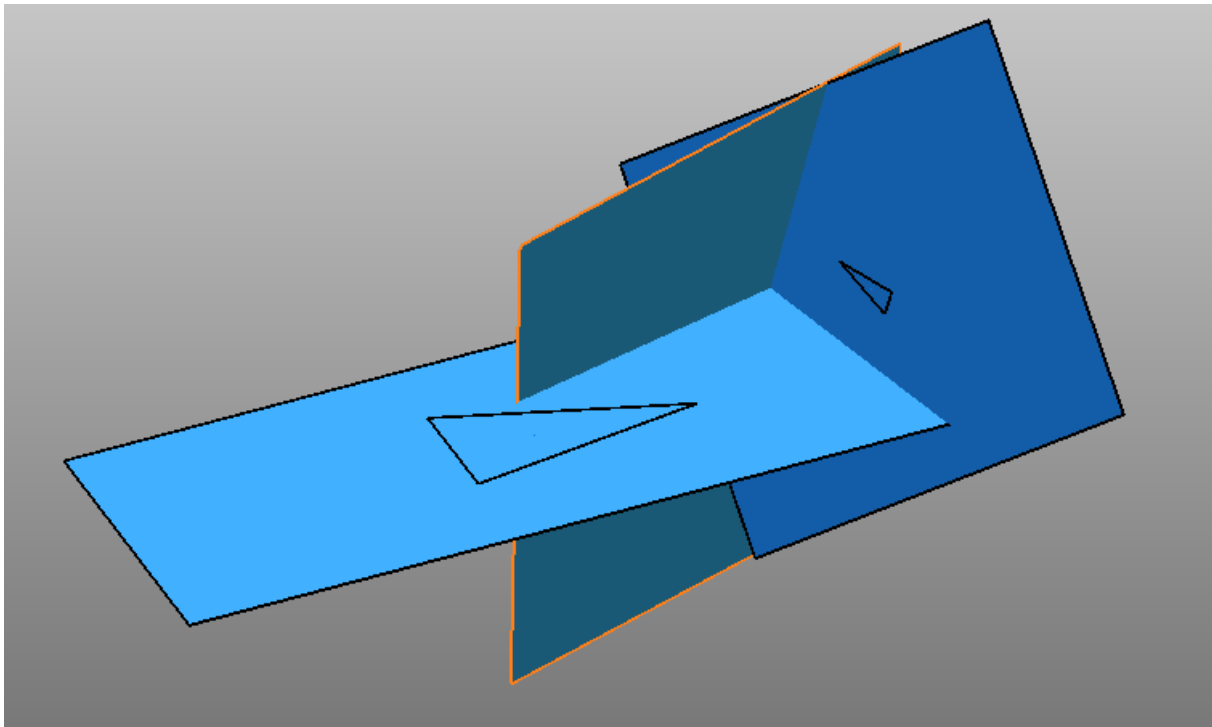






De seguida, aumente o tamanho dos planos clicando em cima deles e de seguida arraste as laterais.

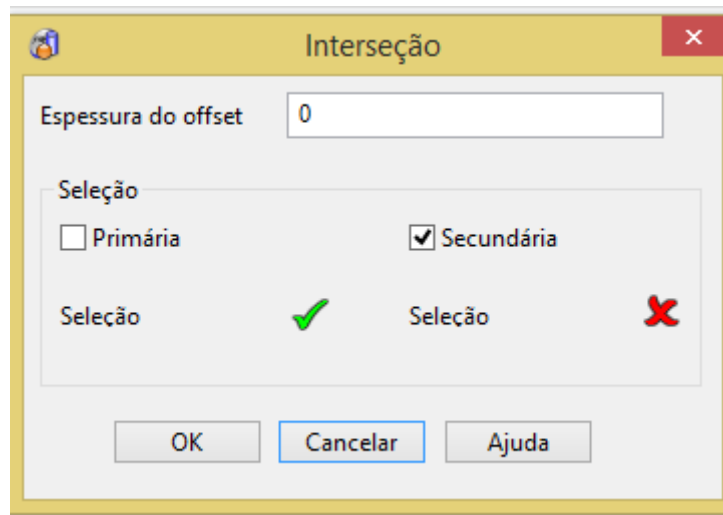


Faça o mesmo em todos os planos de modo a eles se intersectarem.

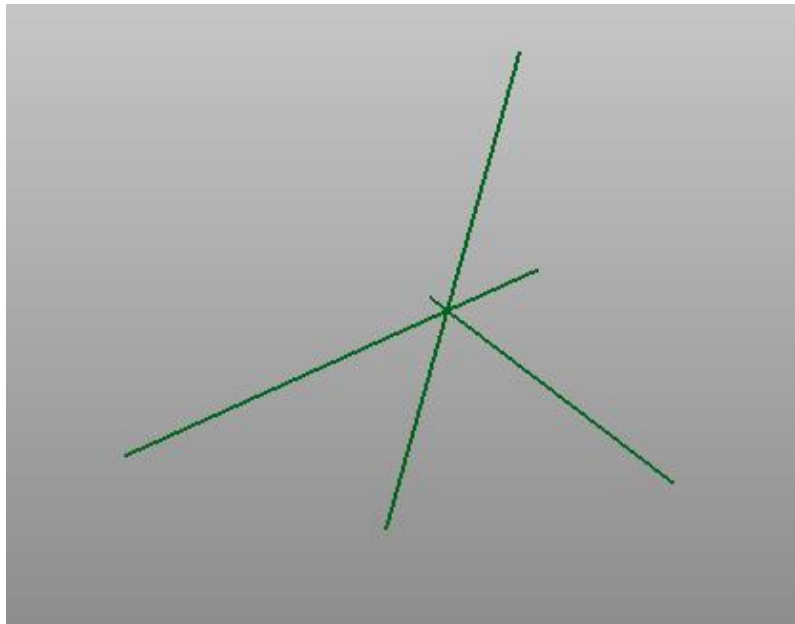


Selecione só os planos criados (não selecione os modelos de arames) e clique em

Curva  e de seguida em Interseção de Superfície, Sólido ou Malha  e carregue “OK” no diálogo.



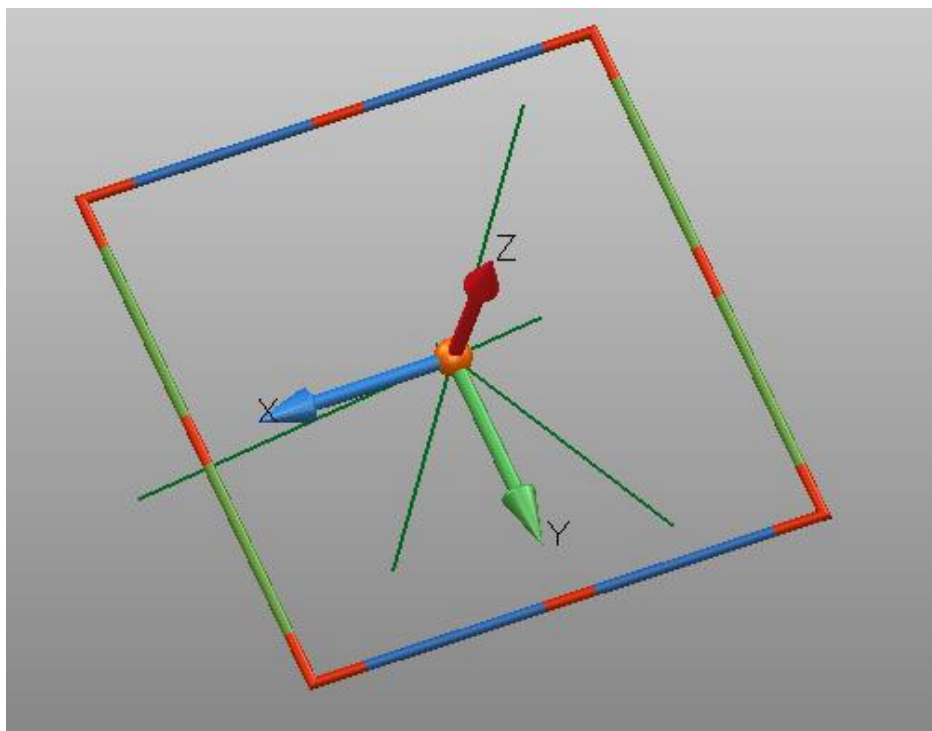
De seguida esconda os planos e os modelos de arames capturados pelo Braço de medição 3D de modo a ver só o seguinte na área gráfica:



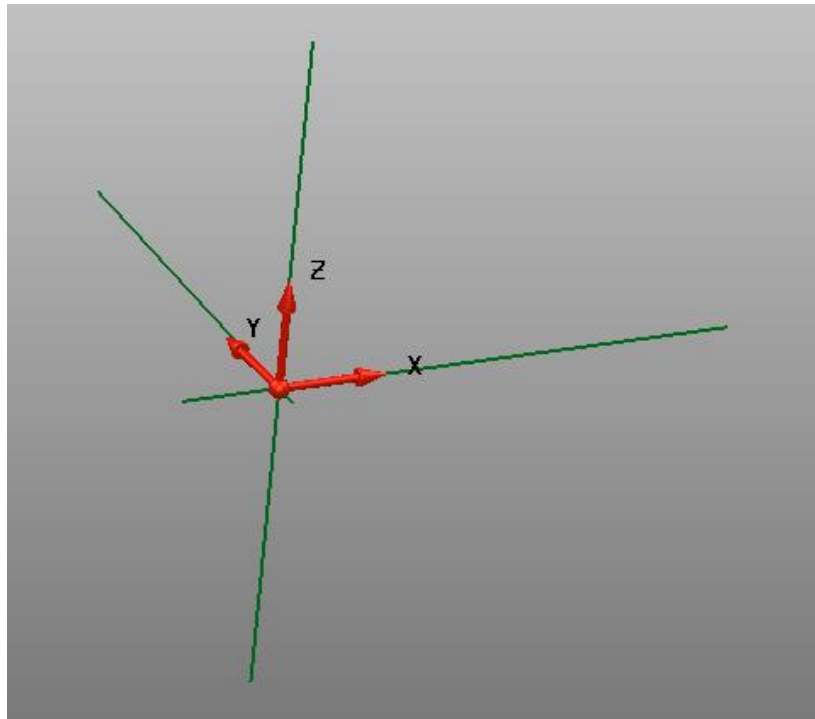
Crie um plano de trabalho na interseção das 3 retas, clicando em Plano de Trabalho



e de seguida no ponto da interseção.



Agora oriente, do mesmo modo que o ficheiro CAD da parte móvel do gabari, o plano de trabalho criado, segundo as retas obtidas:




De seguida, pode apagar tudo, exceto o plano de trabalho encontrado.

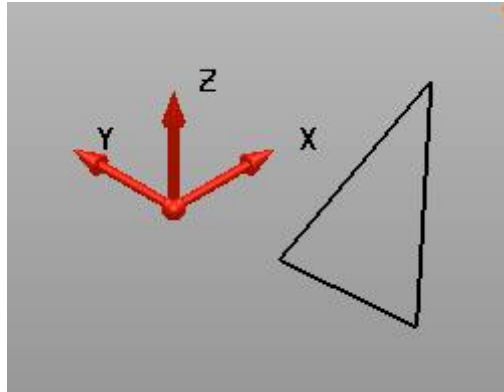
Para encontrar o plano de trabalho da peça, deverá saber qual a orientação e posição do plano de trabalho CAD segundo o qual foi gravado o ficheiro CAD da peça de fundição.



Para fazer o alinhamento da peça de fundição, deve fazer-se um estudo prévio da mesma, pelo que cada tipo de peça terá um procedimento diferente para o seu alinhamento. De seguida, exemplifica-se o procedimento para a peça em questão.

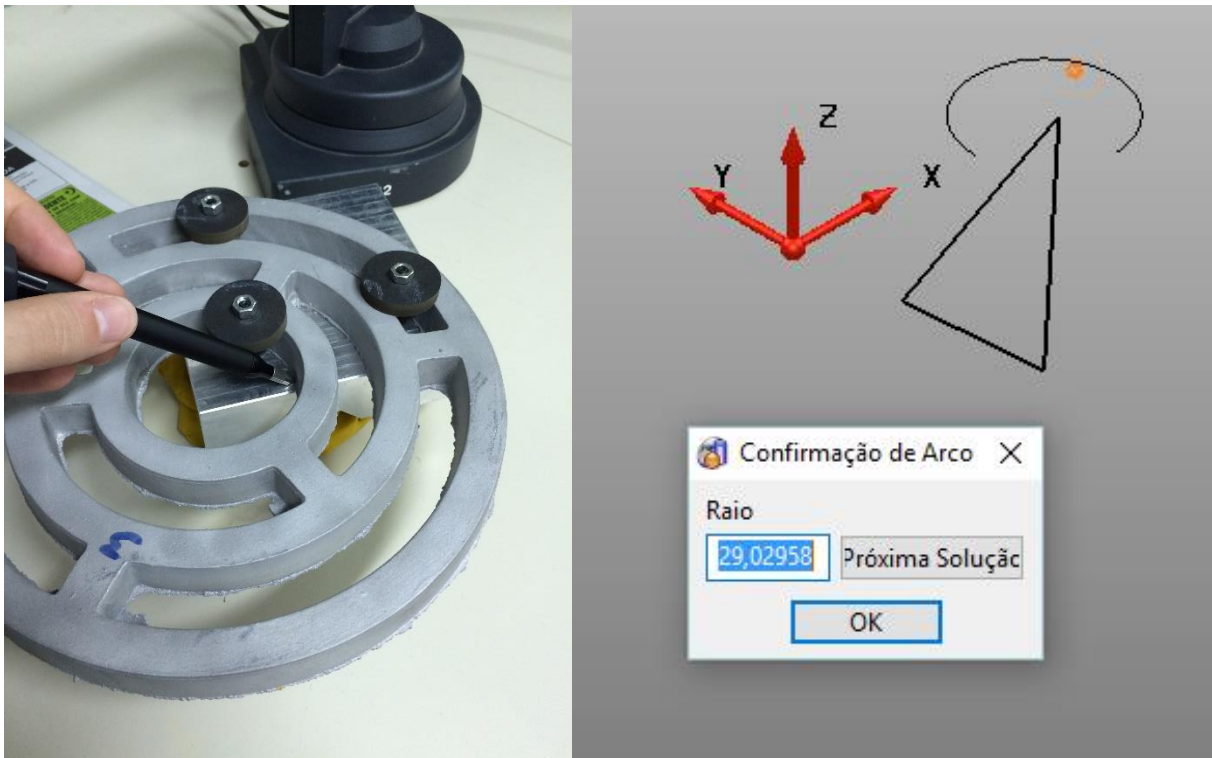
4.2 Alinhar PEÇA

Clique em Criar uma linha contínua  e posicione a ponteira do braço de medição 3D na superfície de cima da parte móvel do gabari e com o botão direito do braço de medição capte um ponto. De seguida capte outro ponto nessa mesma superfície, deslocando a ponteira do braço para outro local e clicando no botão direito do pedal, e faça o mesmo para um terceiro ponto, isto para se obter o plano da base da peça.

Depois com o rato feche a figura que construiu no *PowerSHAPE*. O resultado deve ser o seguinte:

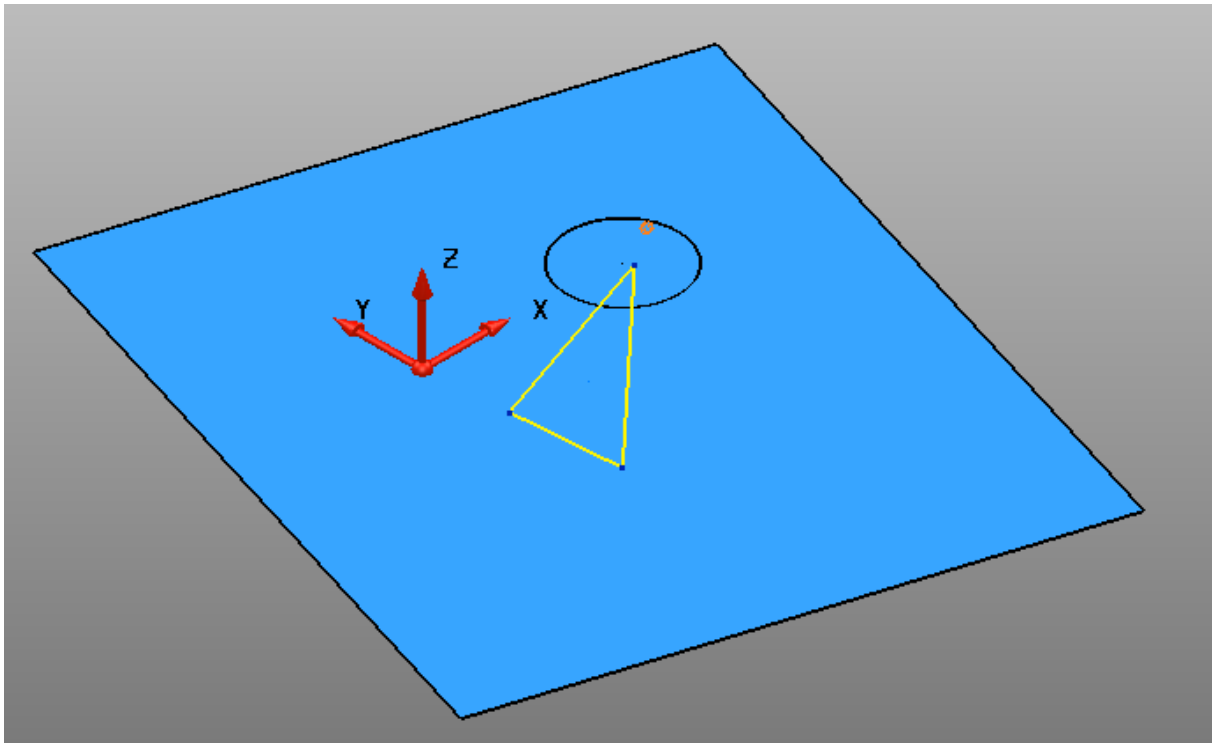



De seguida clique em Arco , e em Criar arco através de 3 pontos , captando três pontos da cavidade central da peça, pontos esses junto à base como de seguida se exemplifica.



Na mensagem, clique “OK” e feche a circunferência.

Crie um plano de melhor ajuste com o modelo de arames que captou:

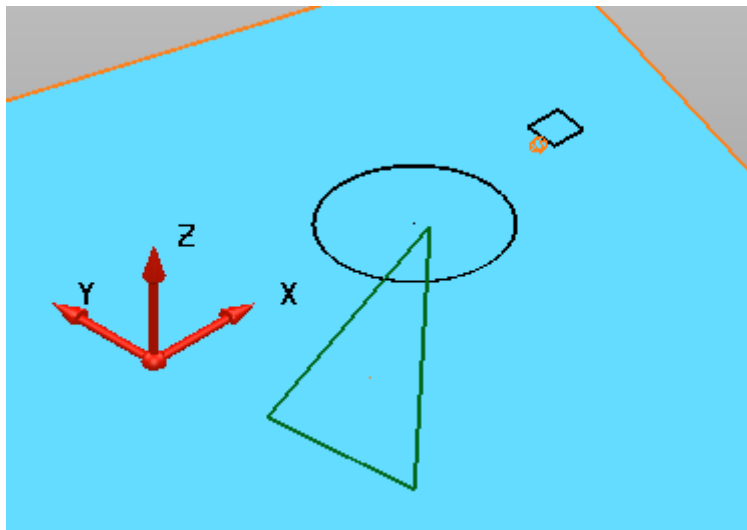



Crie outro modelo de arames, clicando em Criar uma curva contínua  e capture 2 pontos de cada lado de um dos elos de ligação entre o primeiro círculo e o segundo da peça, como mostram as figuras.

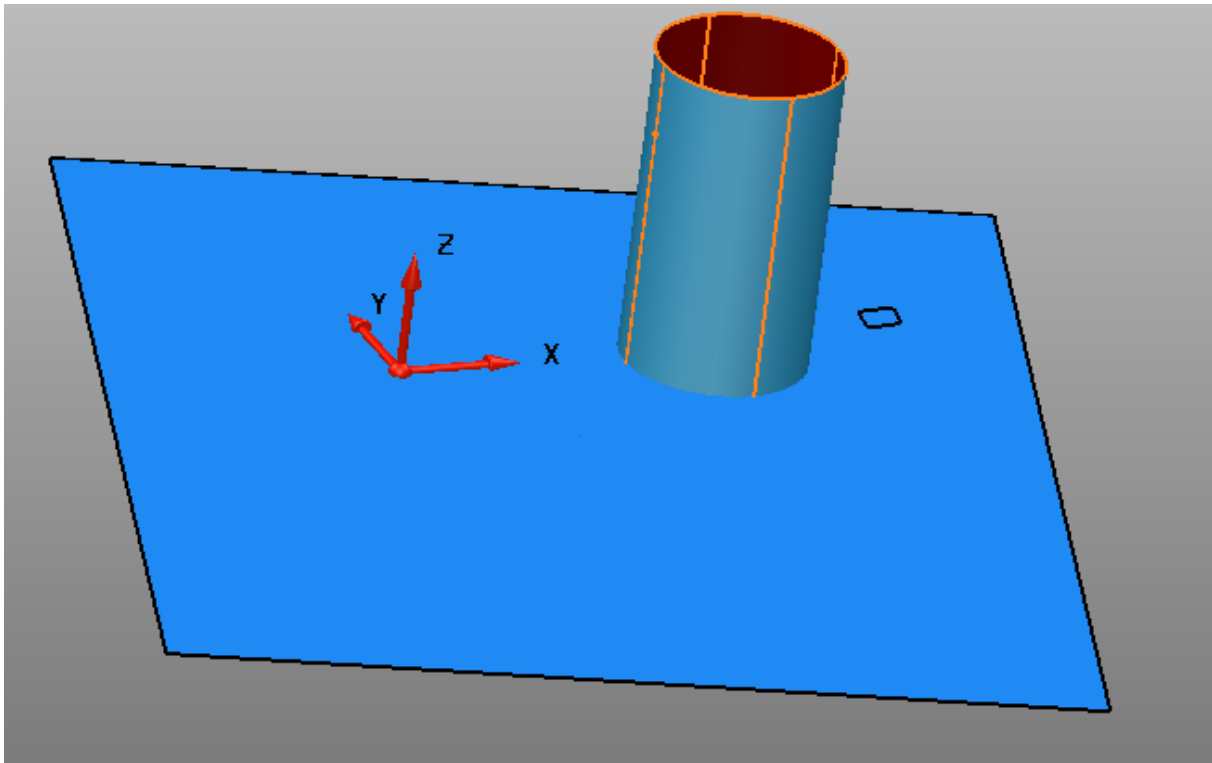





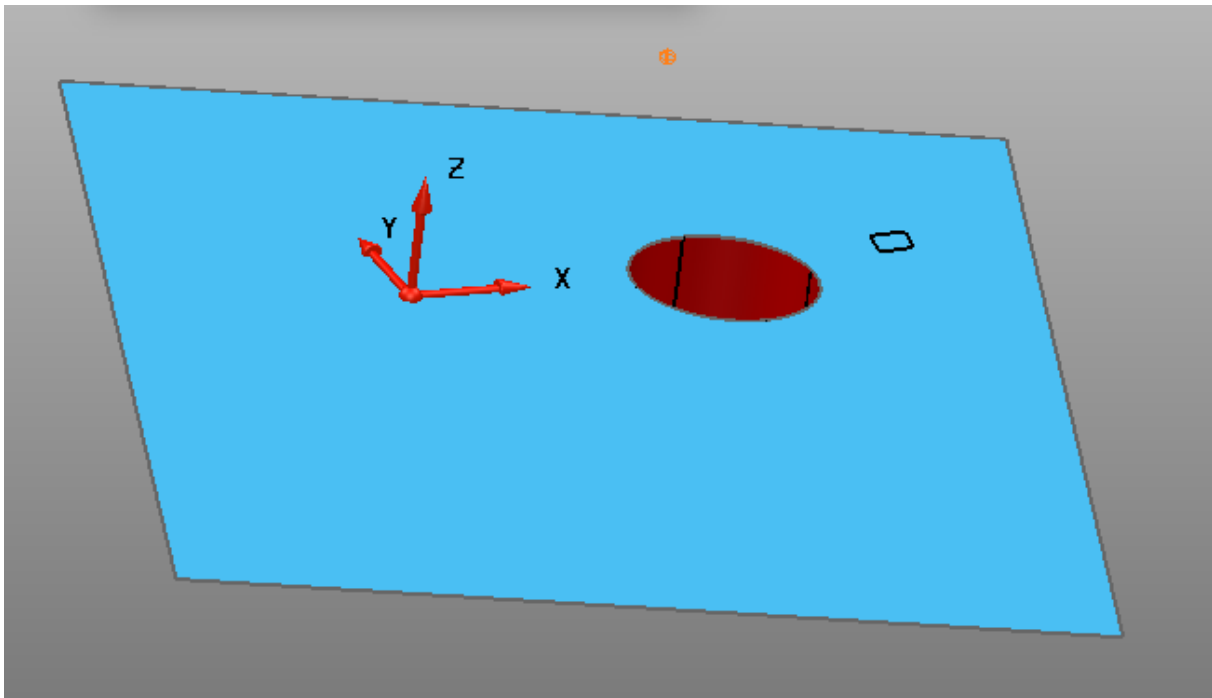
No final deverá obter o seguinte:



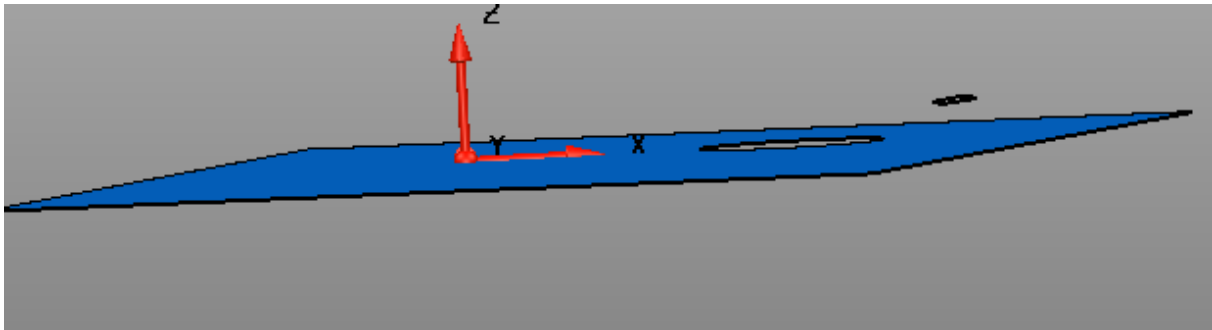
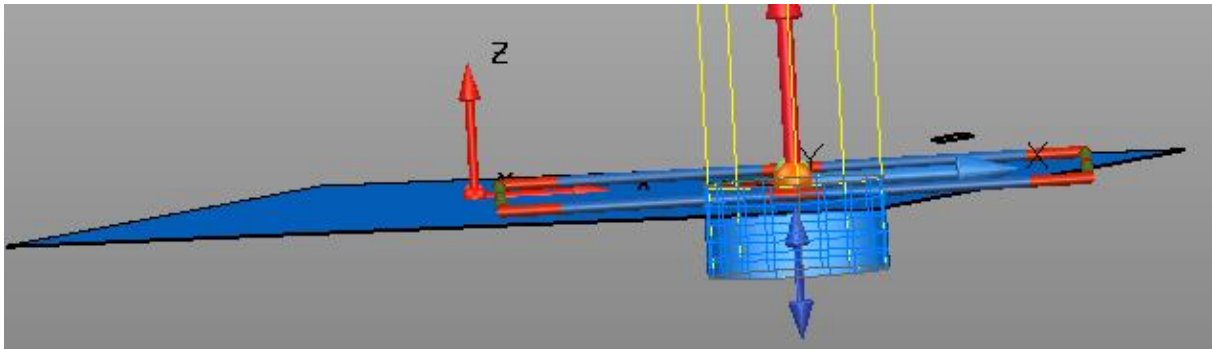
Selecione a circunferência e crie uma superfície por extrusão, clicando em Extrusão .



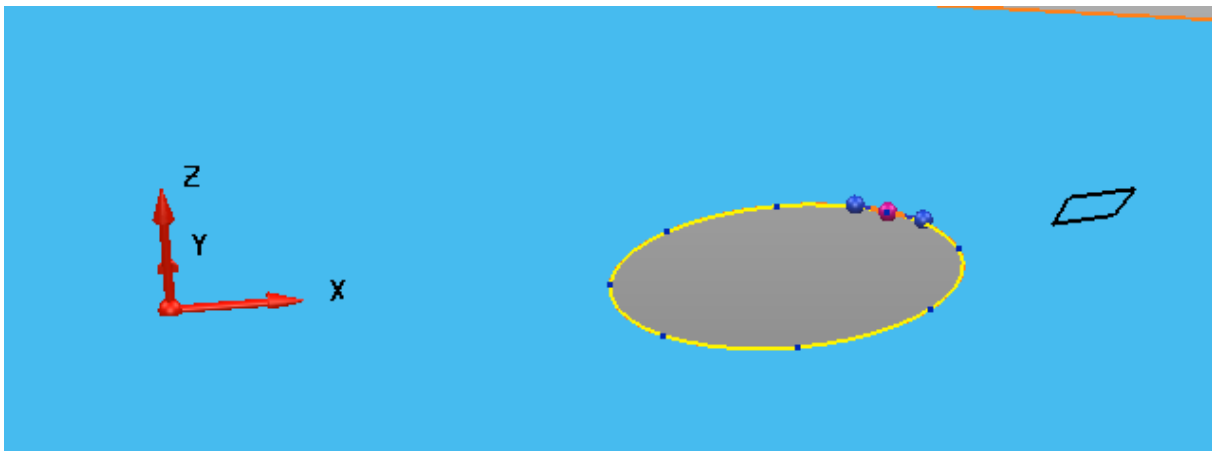
Depois intersecte o plano com a superfície de extrusão. Clique em Trimar  e selecione o plano e de seguida a superfície de extrusão, obtendo o seguinte:

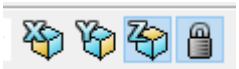


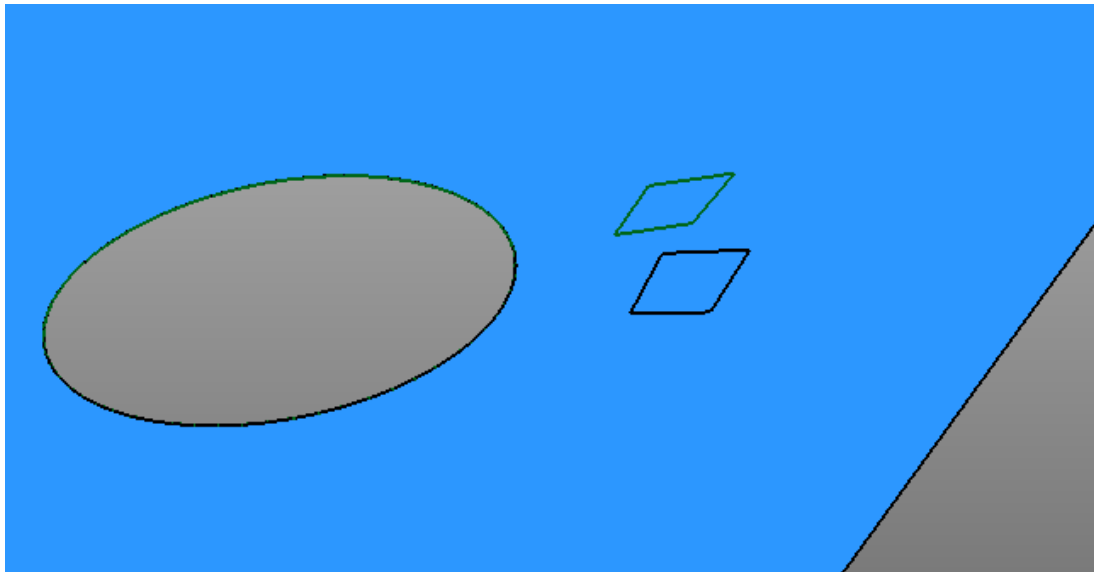
Apague a superfície de baixo.



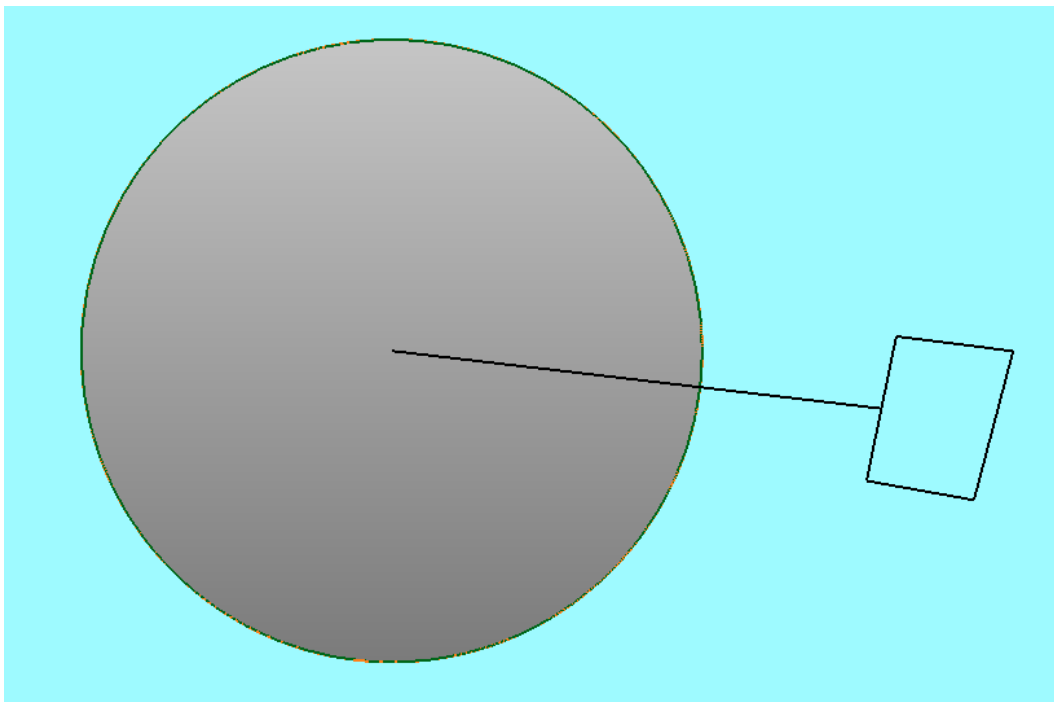
Crie uma curva composta na circunferência, clicando em “*alt*” e na circunferência simultaneamente.




Bloqueie o eixo Z , e com a vista de cima, desenhe por cima do modelo de arames outro modelo de arames, de modo a obter o seguinte:

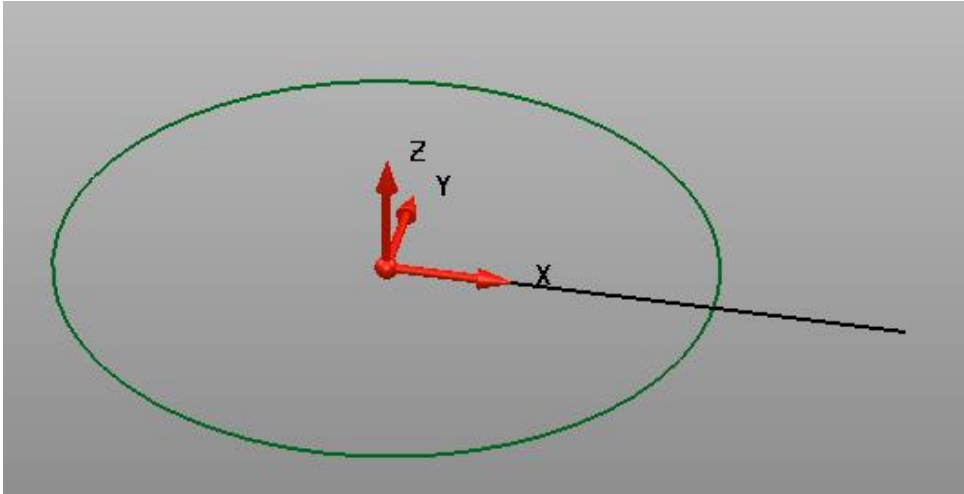


Crie uma linha do centro da circunferência ao ponto médio da linha do modelo de arames, tal como na figura.



Pode apagar o plano e o modelo de arames.



Finalmente, crie o plano de trabalho , no centro da circunferência, e alinhado em X com a reta desenhada:




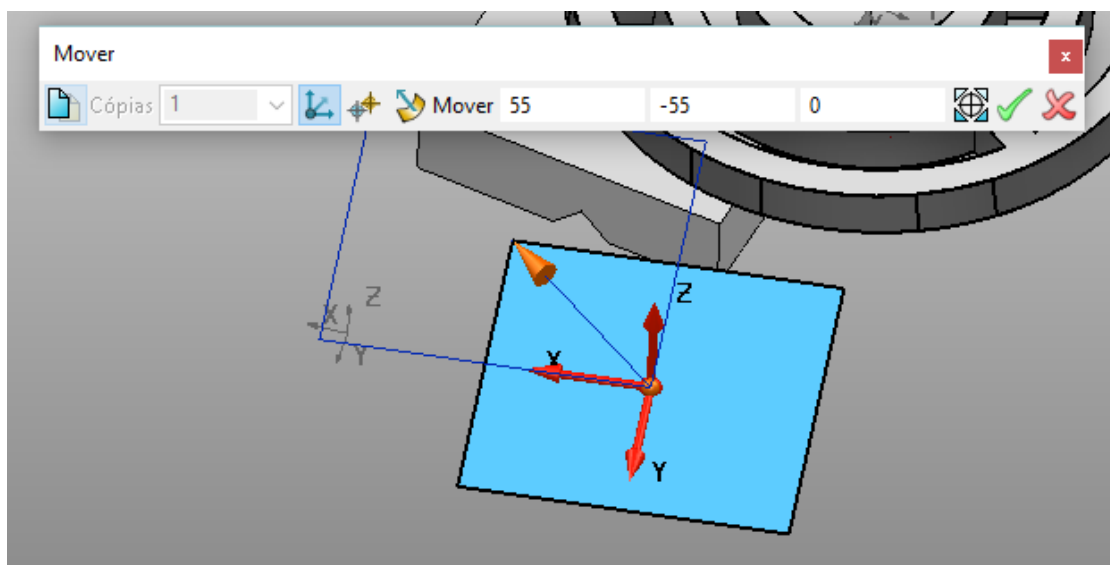
Pode apagar tudo, exceto, os dois planos de trabalho.

Depois de se obterem os dois planos de trabalho, importam-se os ficheiros CAD da peça de fundição e da parte móvel do gabari.

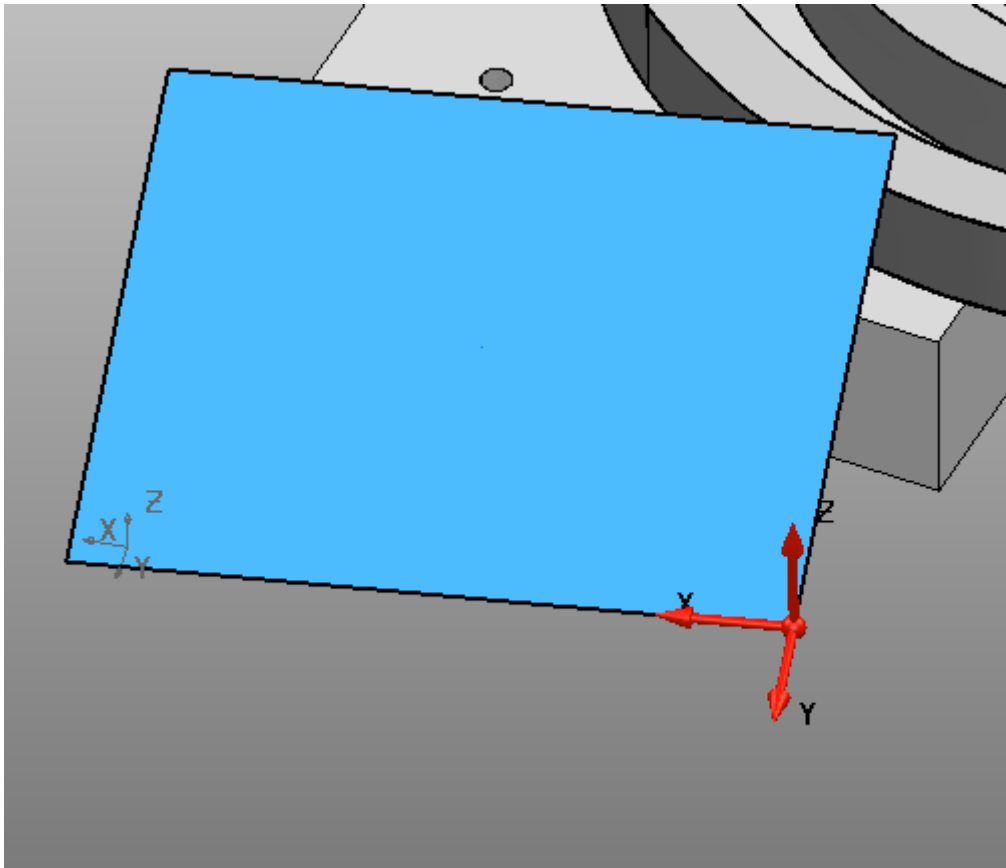
Posicionamentos dos ficheiros CAD de acordo com os planos de trabalho adquiridos


Clique em Superfície  e de seguida em Plano Primitivo  e crie um plano no plano de trabalho de alinhamento do gabari, clicando no mesmo. Altere a dimensão do plano para 110 mm de largura e 110 mm de comprimento.

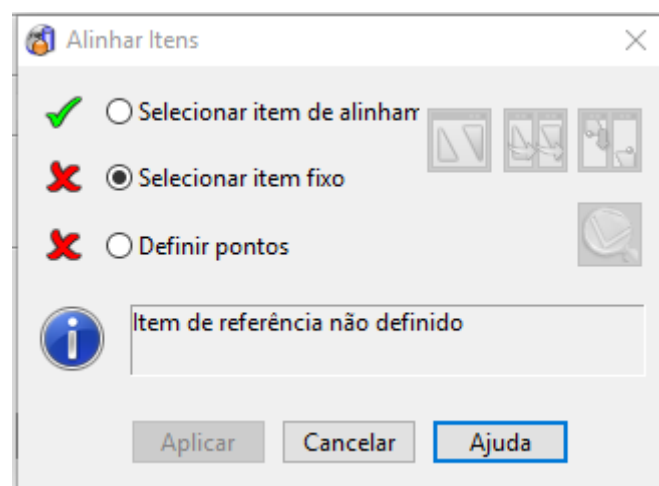
Finalmente mova-o para a origem, clicando em Mover/Copiar Itens  e de seguida preencha o quadro de acordo com a figura:



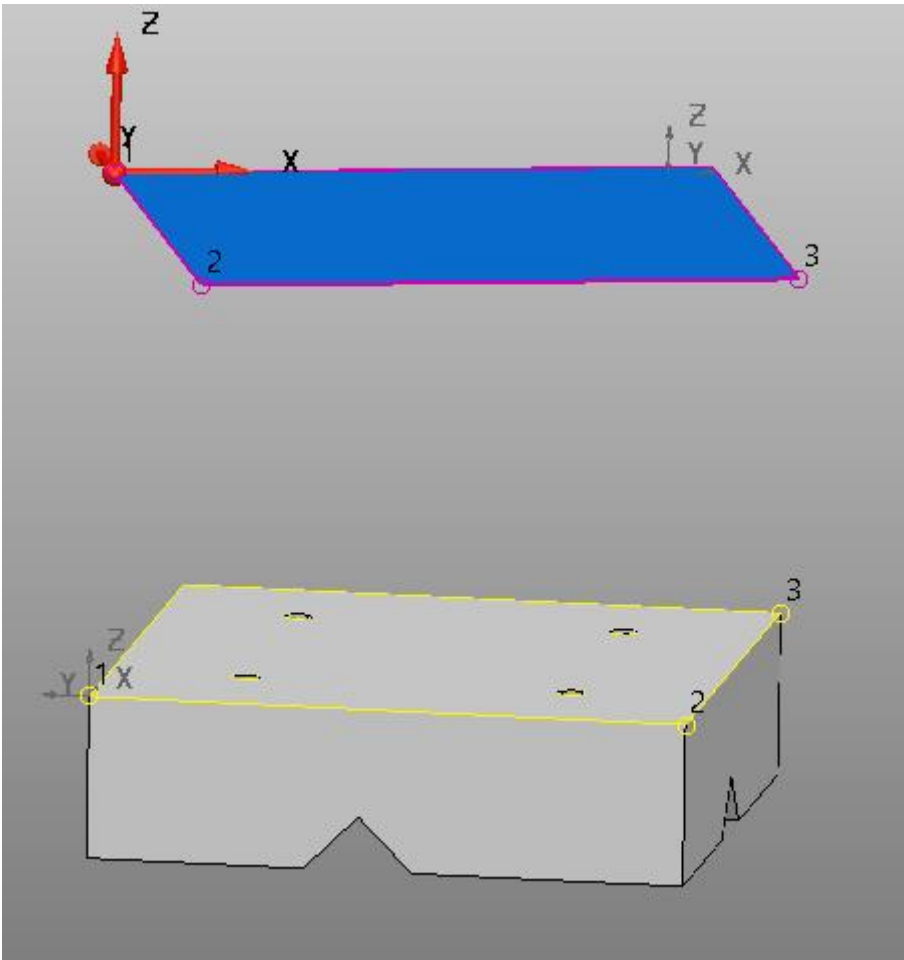
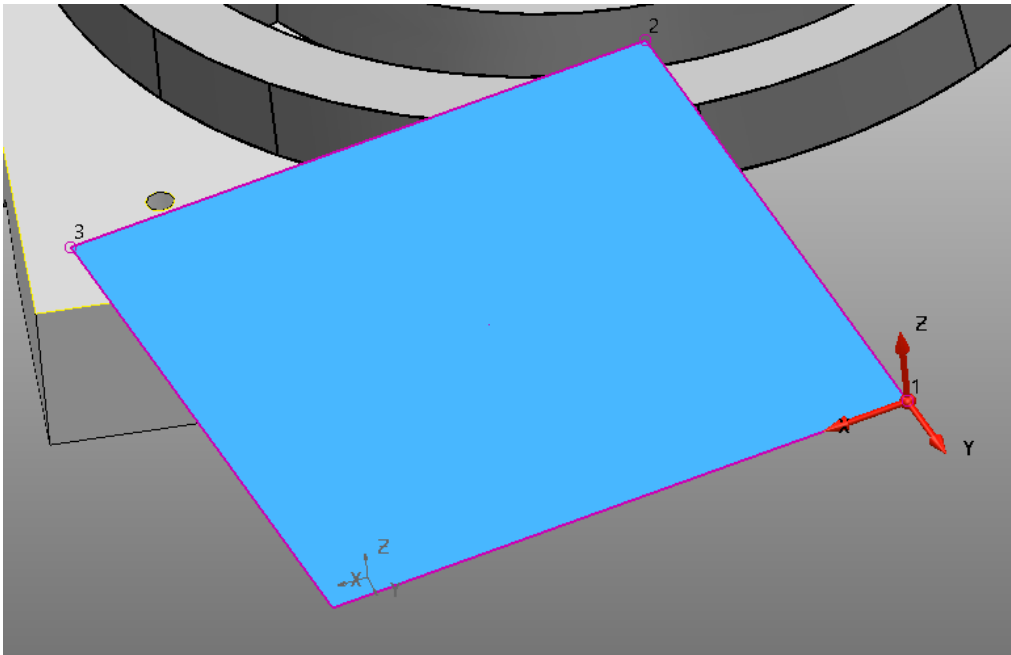
Obtendo o seguinte:



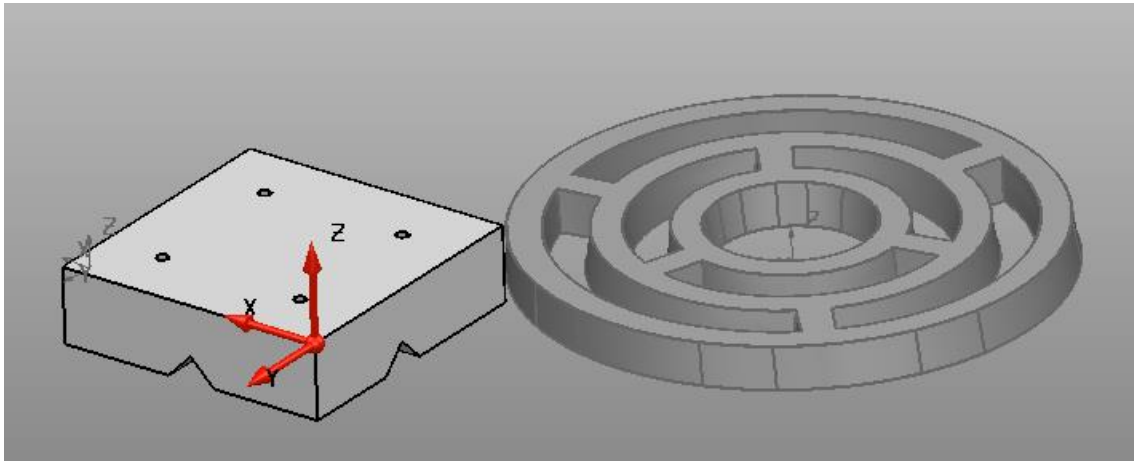
Posteriormente, selecione o ícone para Alinhar itens,  e siga os passos:

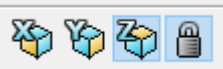



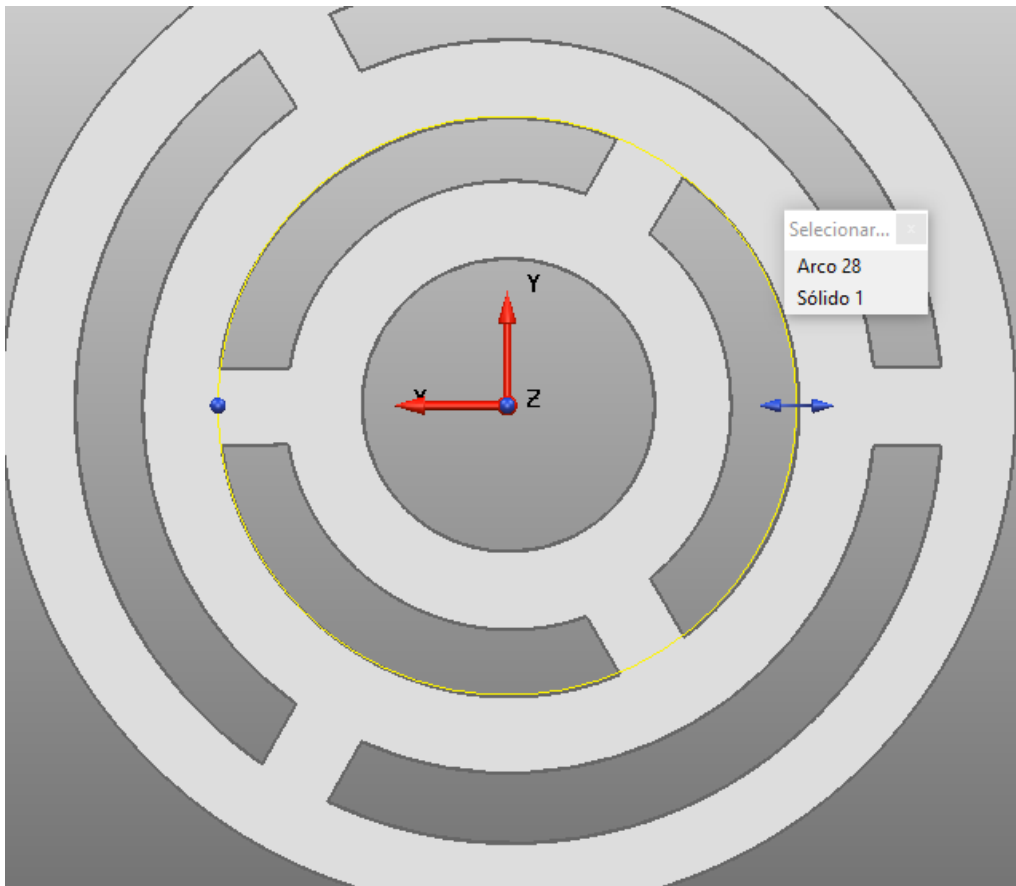
- Em selecionar o item de alinhamento, selecione o gabari;
- Em selecionar o item fixo, selecione o plano criado;
- E no último, selecione os pontos de acordo com as imagens:



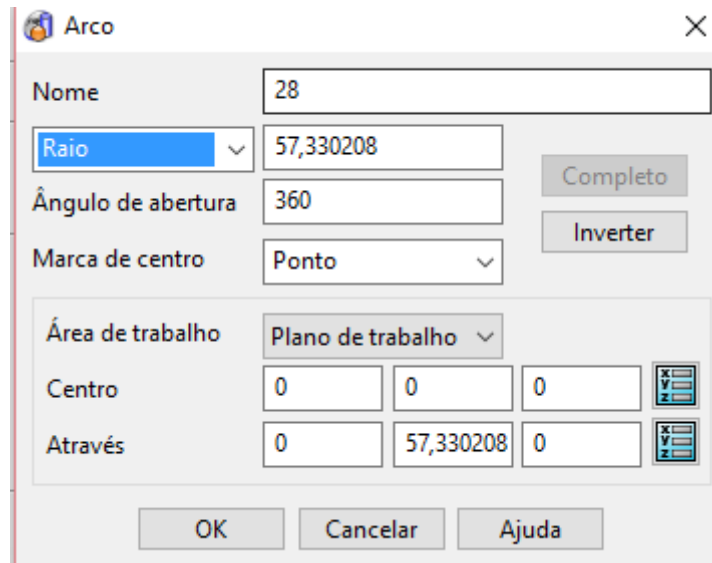
E faça “Aplicar”.



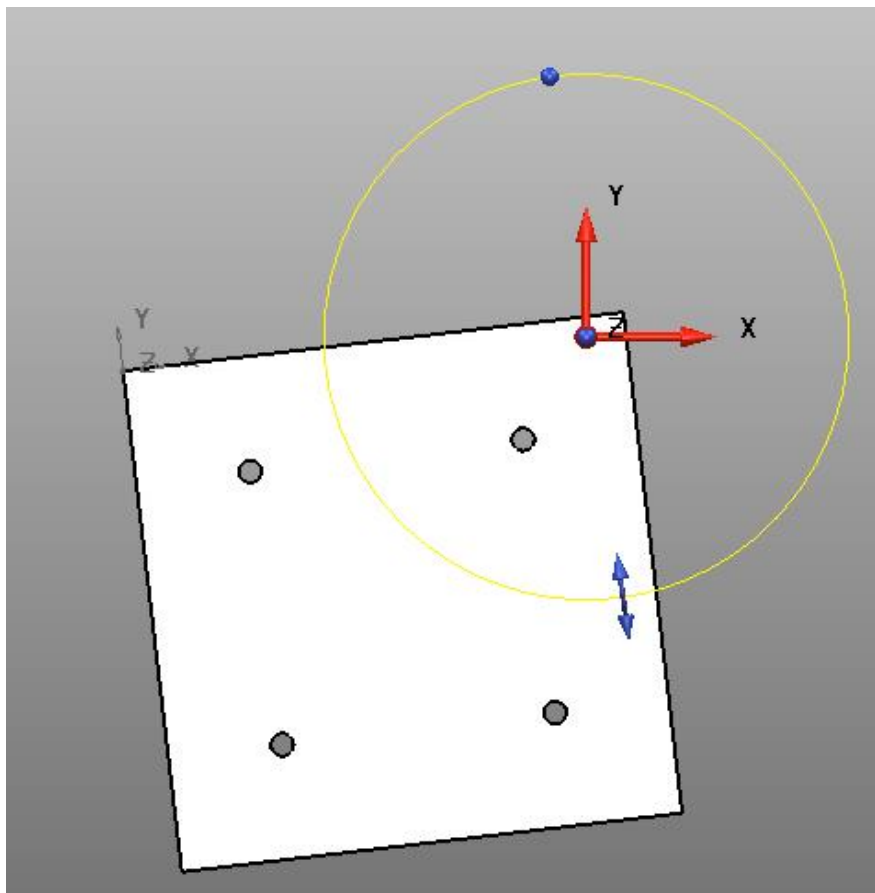
Para posicionar a peça de fundição, fixe o eixo Z, , e de seguida crie uma circunferência em Criar um Arco Completo  na base da peça de fundição, tal como a figura mostra:



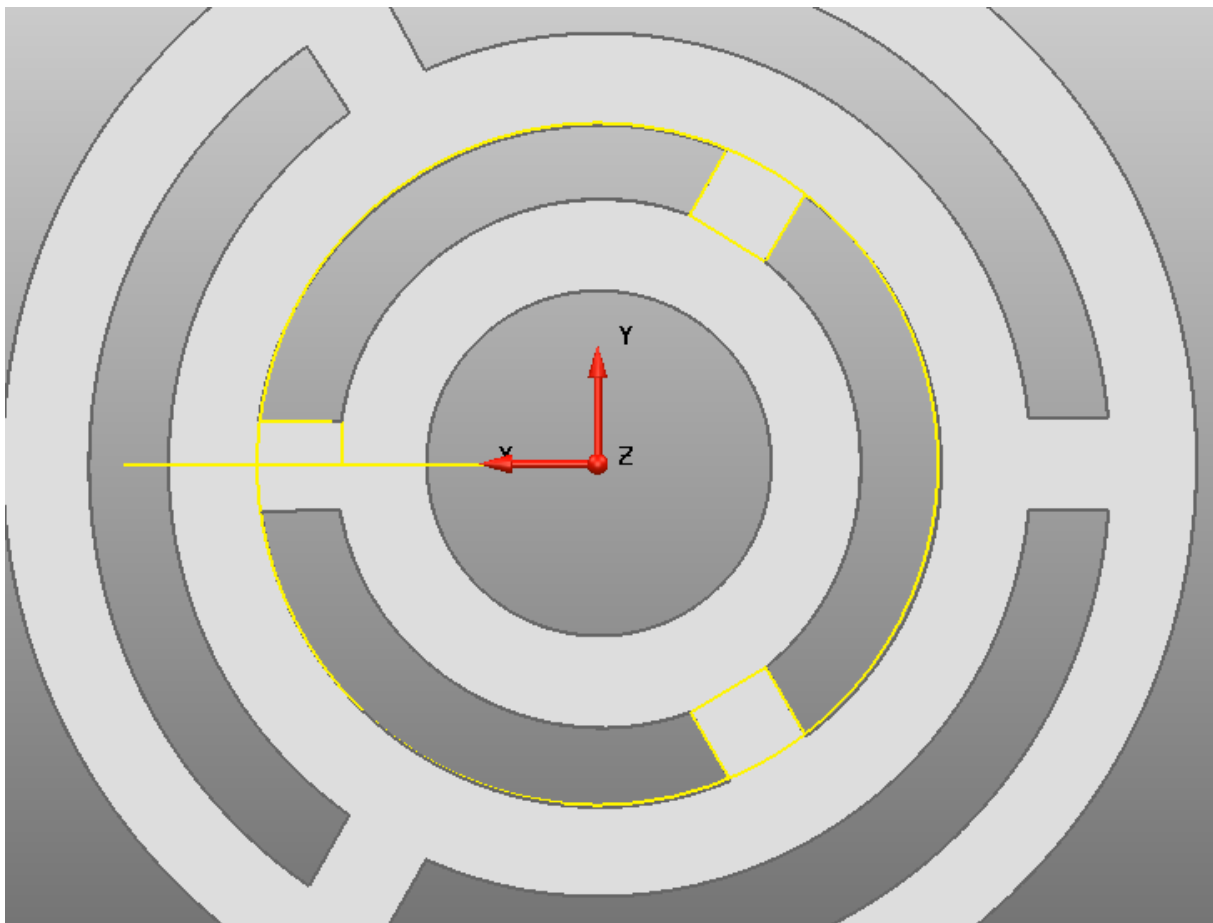
Copie o raio dessa circunferência, clicando duas vezes em cima da mesma para abrir a seguinte janela:



Copie o raio e crie outra circunferência com esse mesmo raio no outro plano de trabalho:

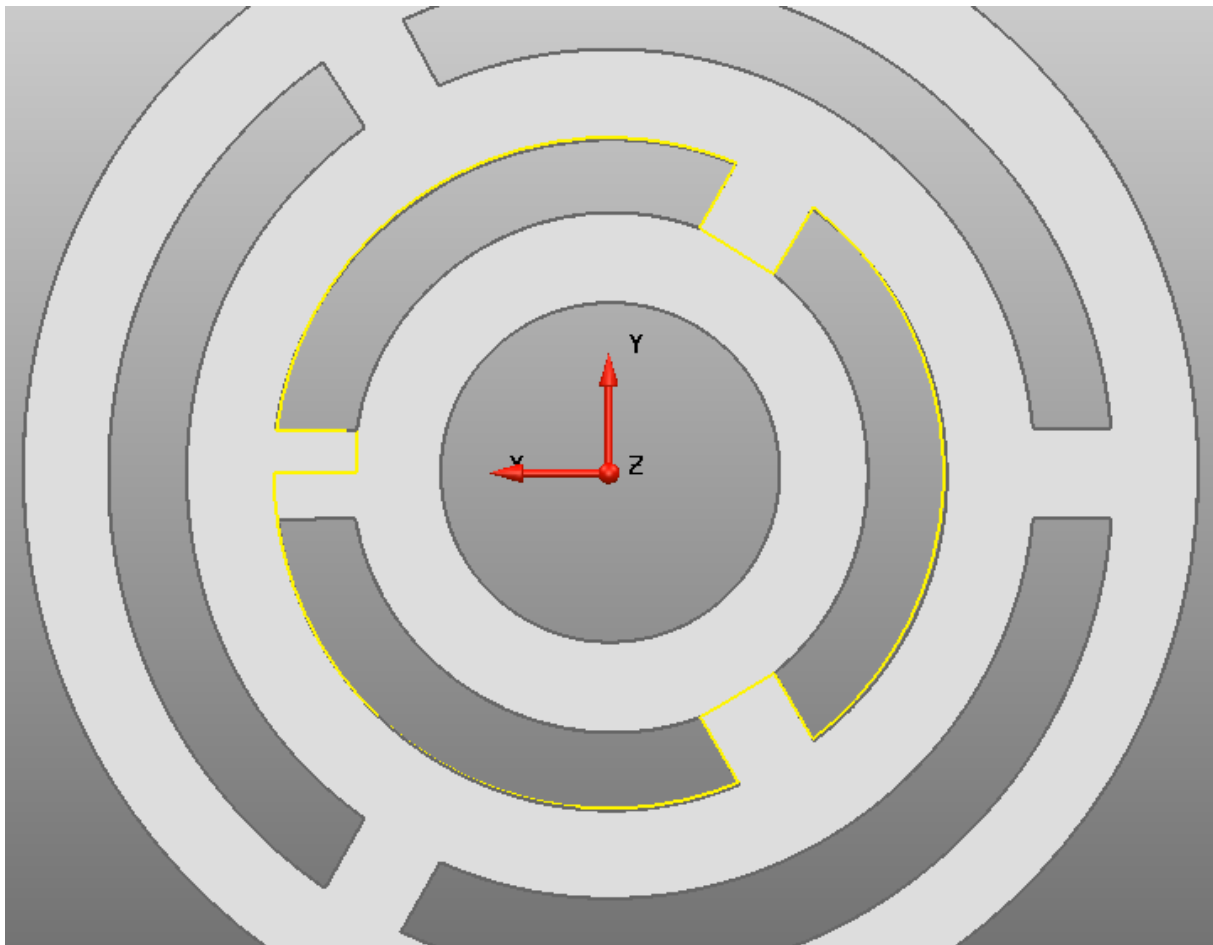


Crie todas estas linhas, como mostra a figura:

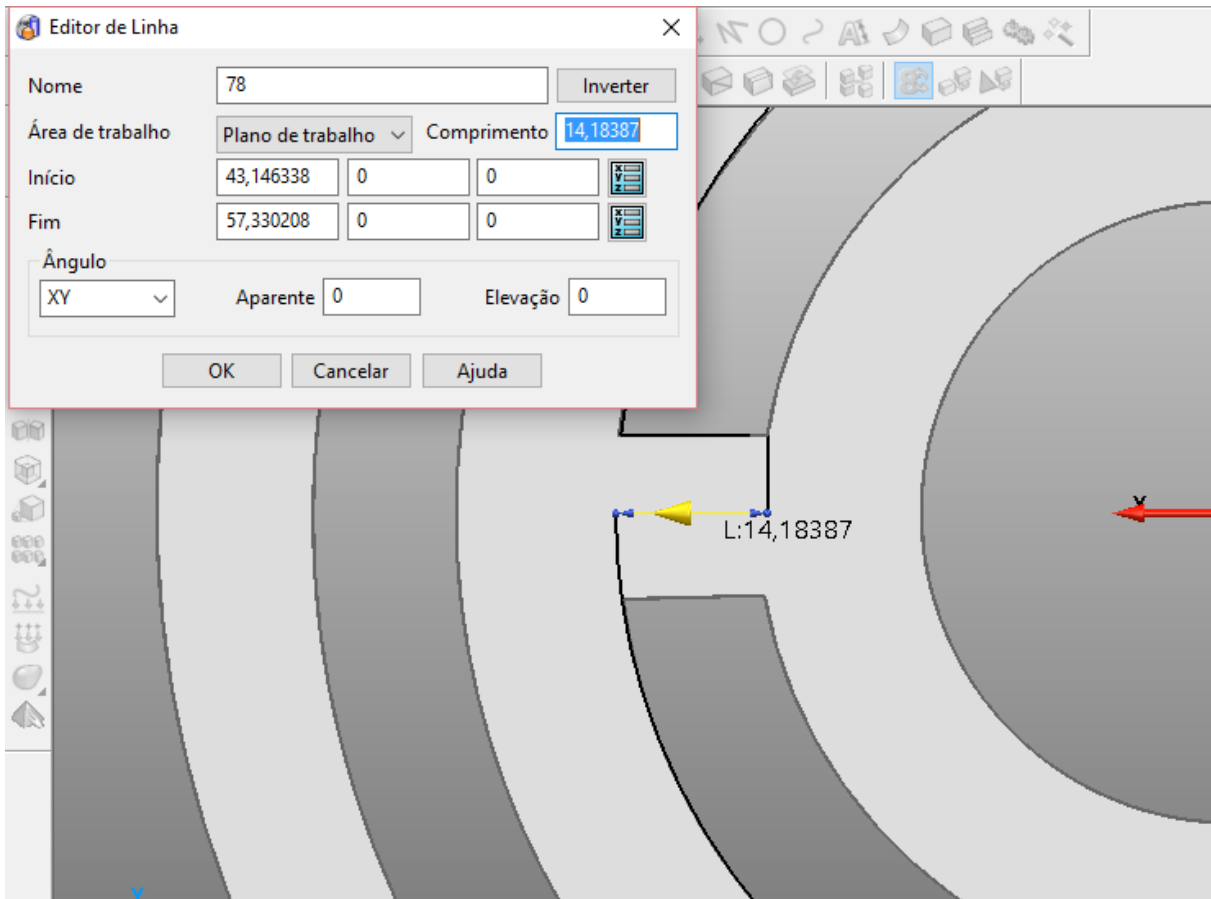


E de seguida trime algumas linhas, clicando em Trimar arames interativamente até obter a seguinte curva:

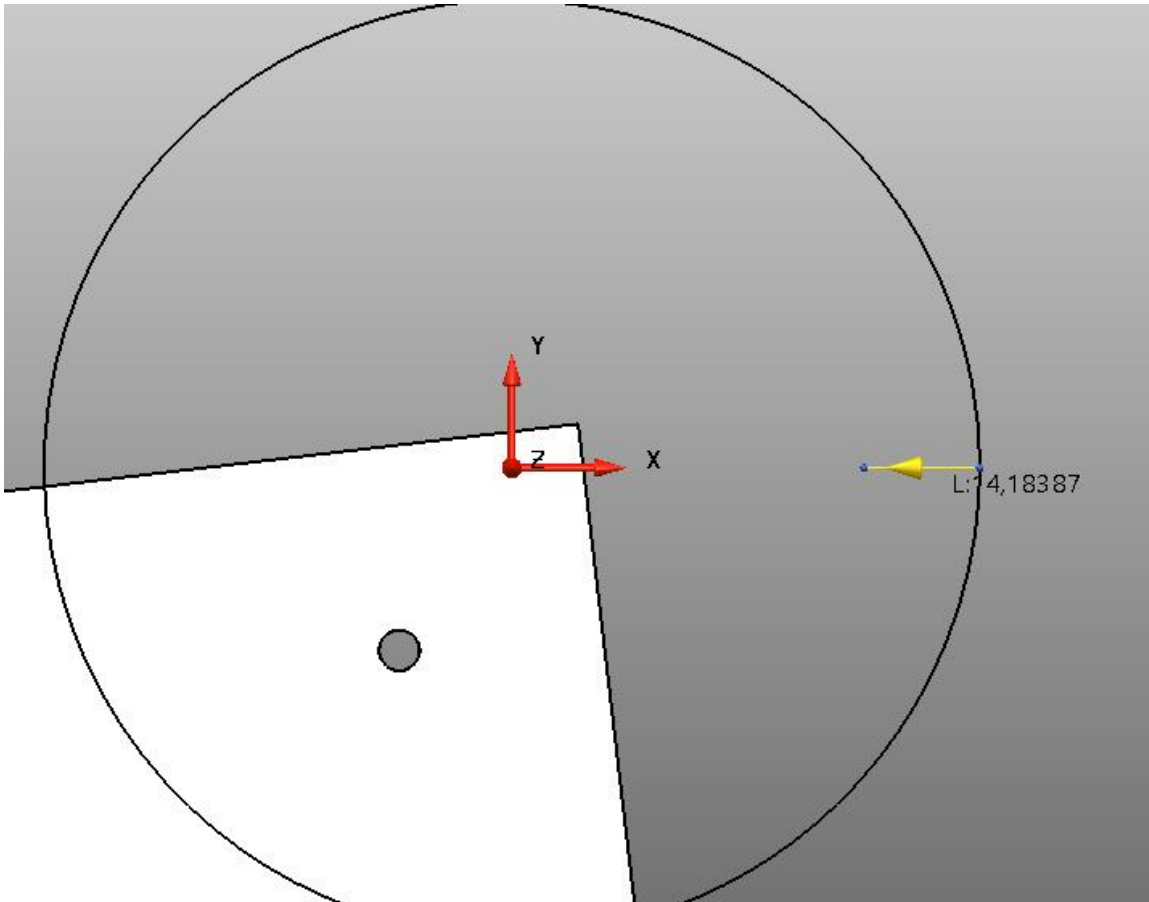




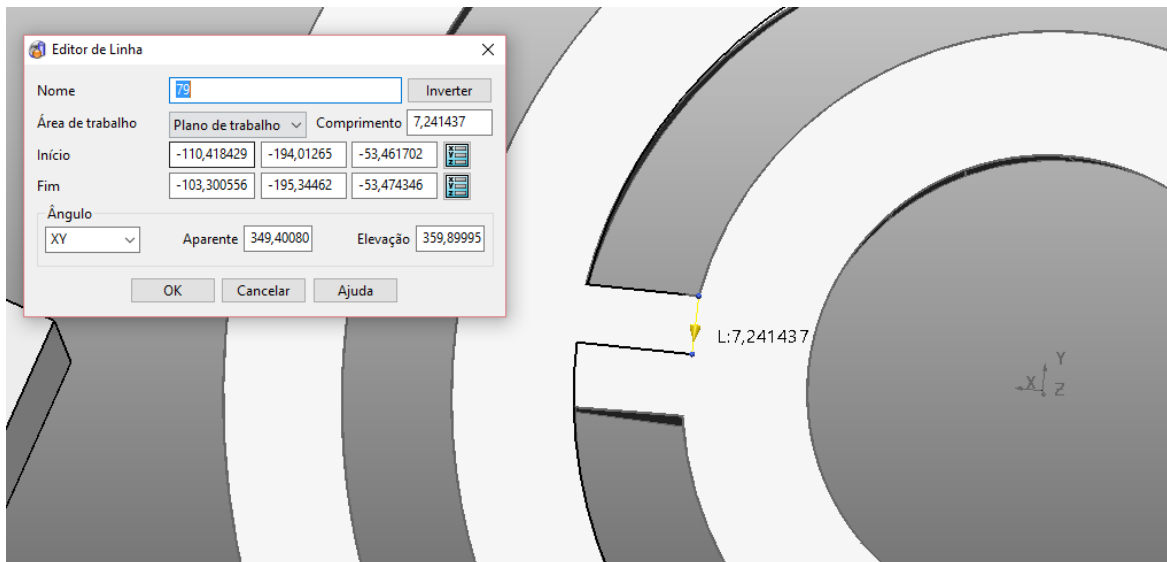
Verifique o comprimento das seguintes linhas, clicando duas vezes em cada uma delas:



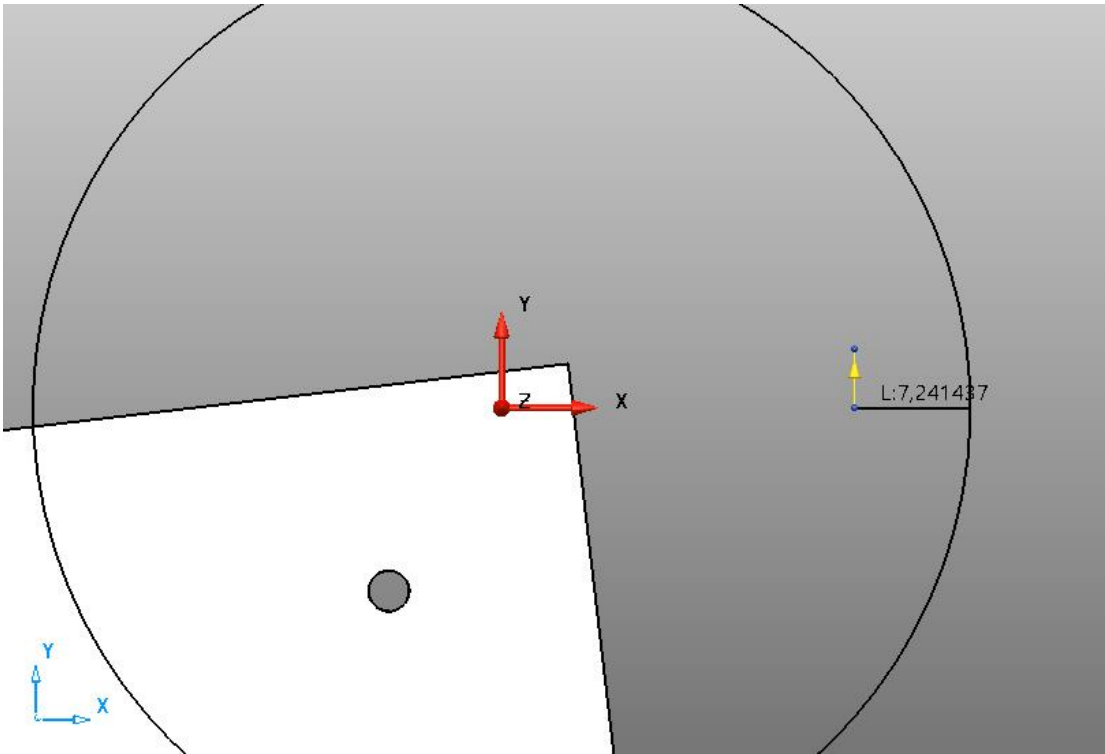
Crie então, uma linha com o mesmo comprimento, alinhada com o eixo do X na outra circunferência:



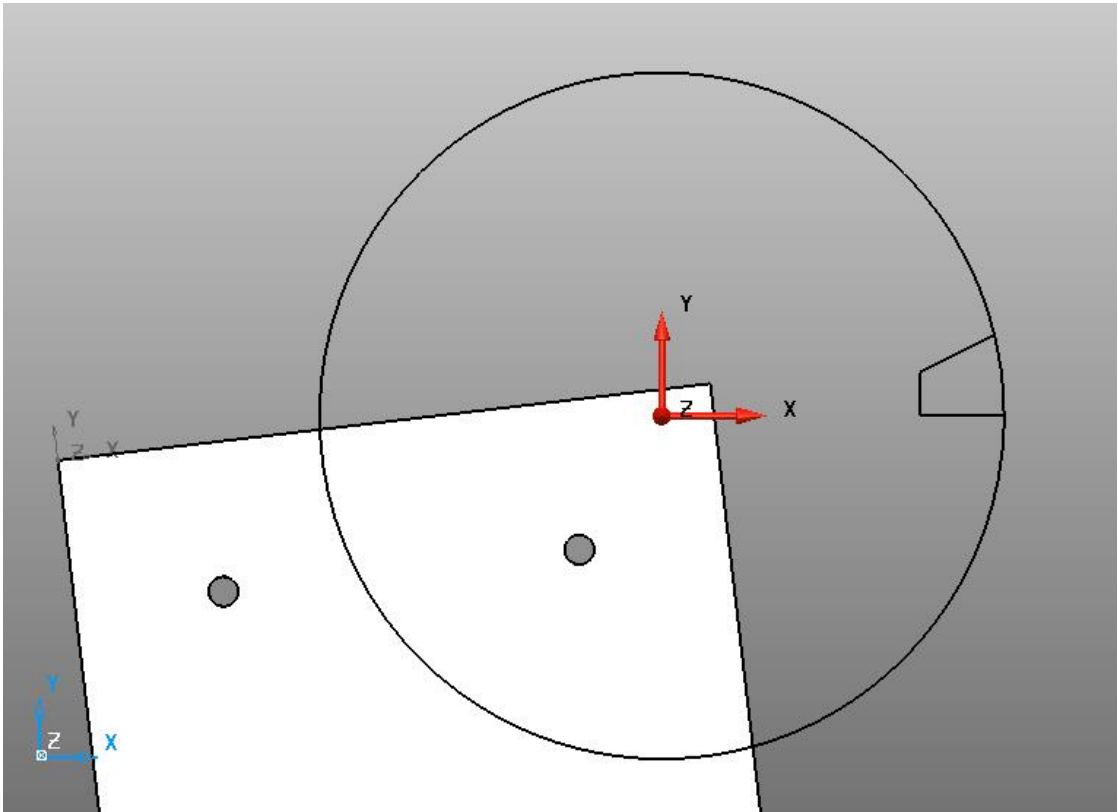
E faça o mesmo para a seguinte:

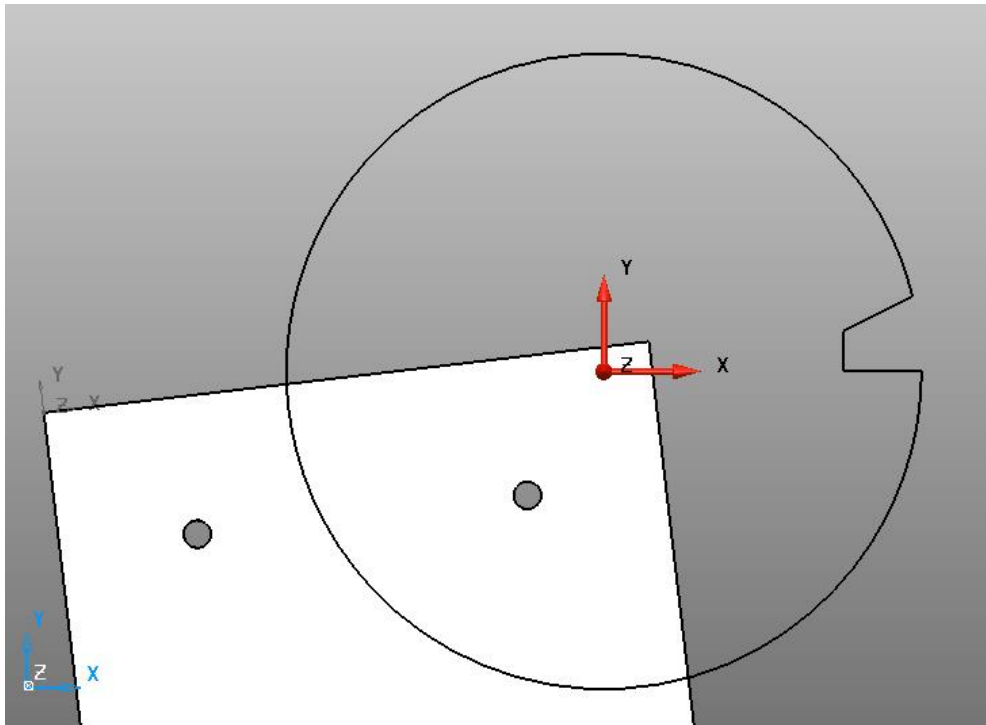


E de seguida, crie outra linha com este comprimento na outra circunferência perpendicular à outra linha:

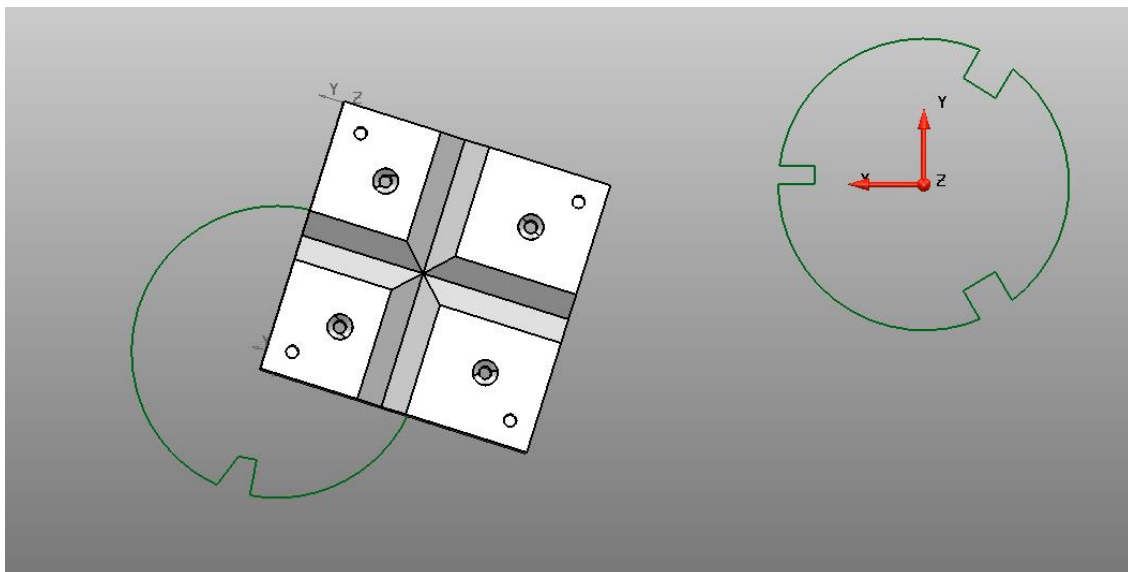



Una a linha criada a um ponto qualquer da circunferência e trime a curva central



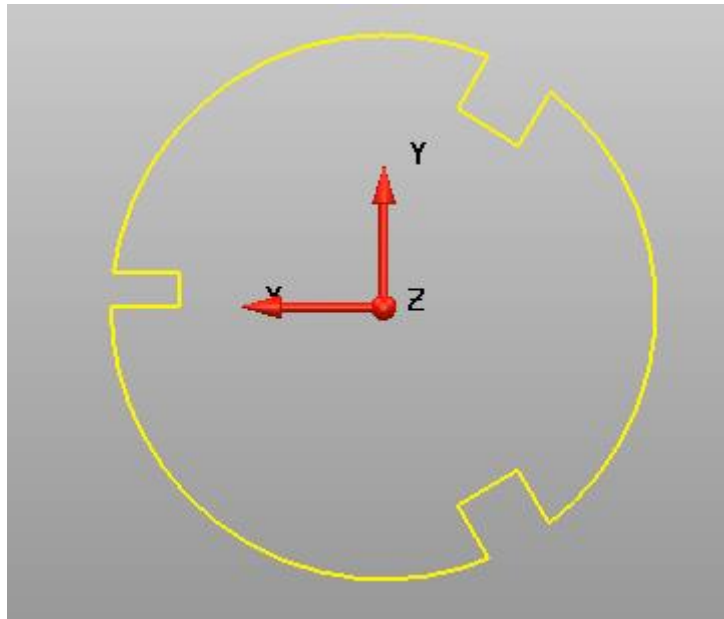


Crie duas curvas compostas, com o obtido:

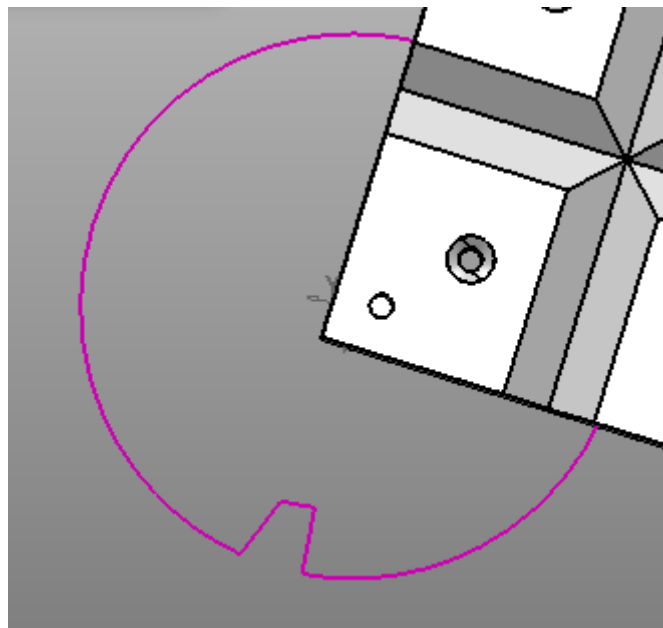


Desbloqueie o eixo Z e de seguida clique em Alinhar itens  e faça o alinhamento da curva criada:

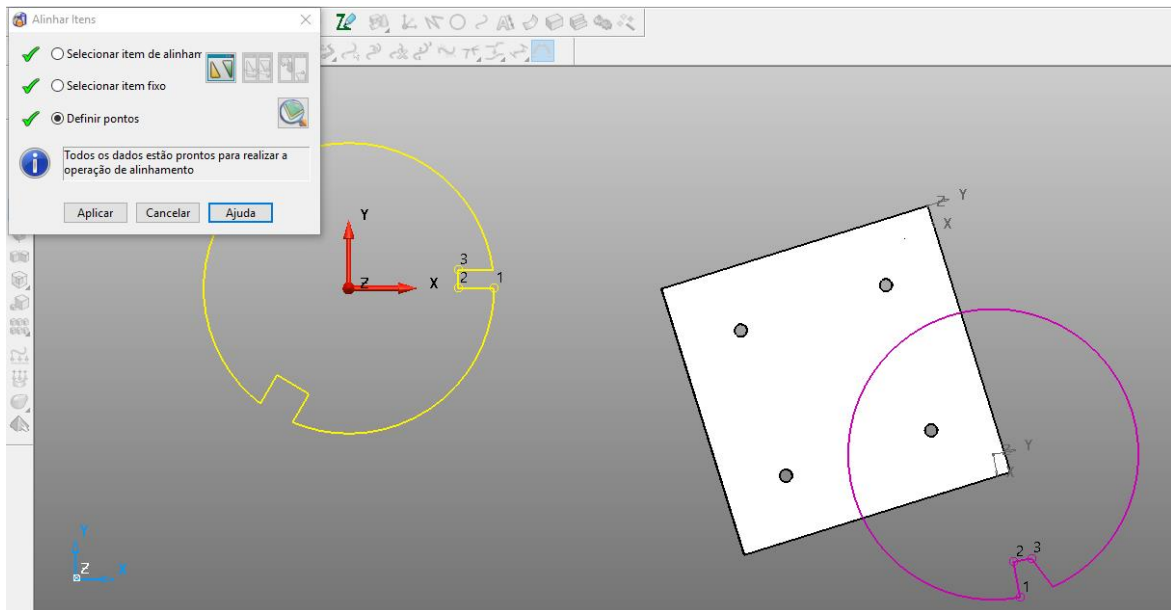
Selecione o item de alinhamento, clicando na curva que é mostrada na figura seguinte:



Selecione o item fixo:

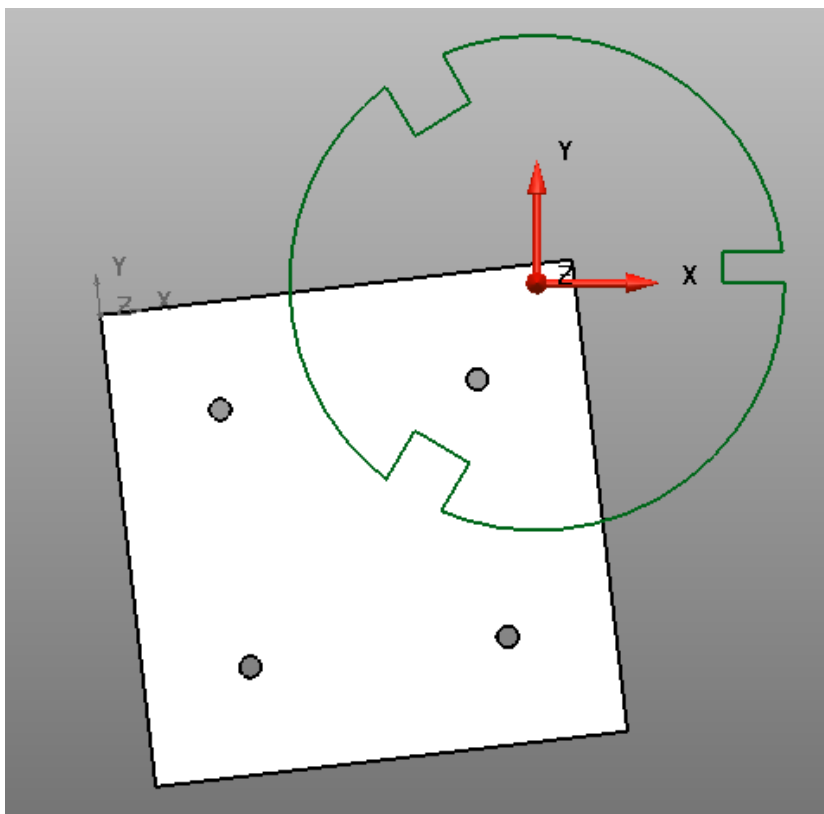



E finalmente, selecione 3 pontos em cada curva, exatamente como mostra a figura:



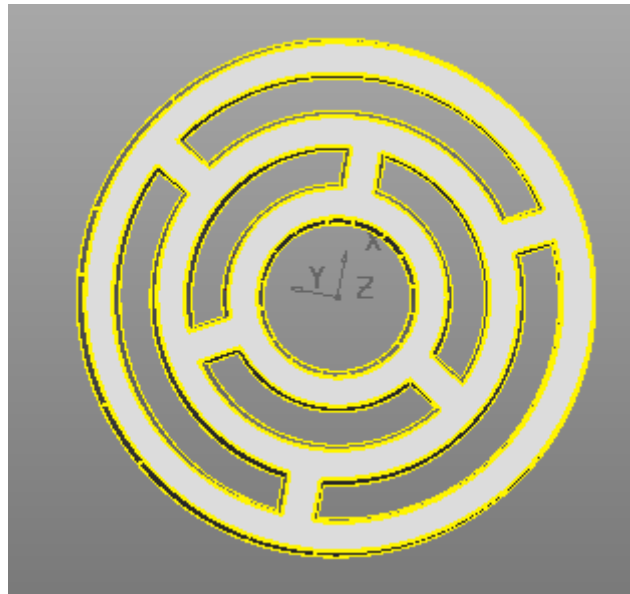
E faça “Aplicar”.

Apague a curva auxiliar, de modo a ficar só com o seguinte:

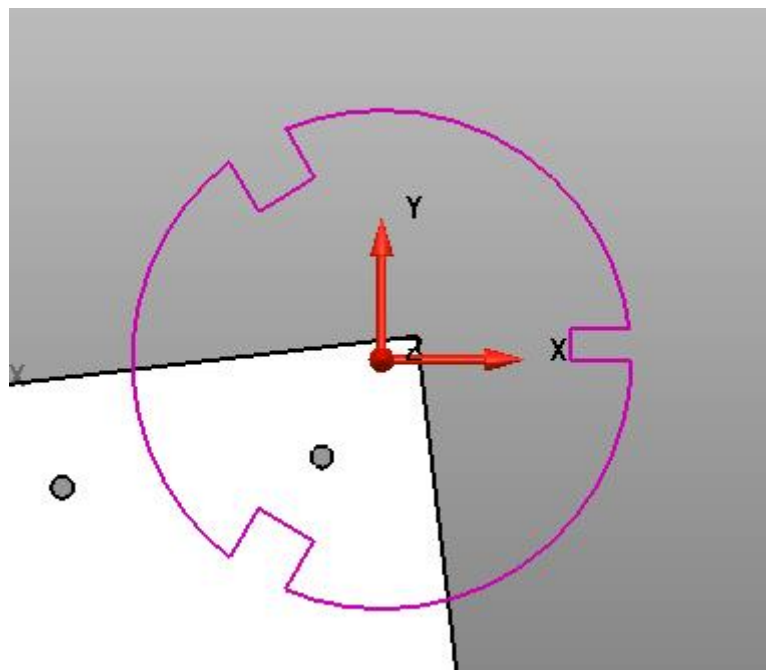


Agora, vai alinhar-se a peça, clique em Alinhar itens  novamente:

Selecione o item de alinhamento:



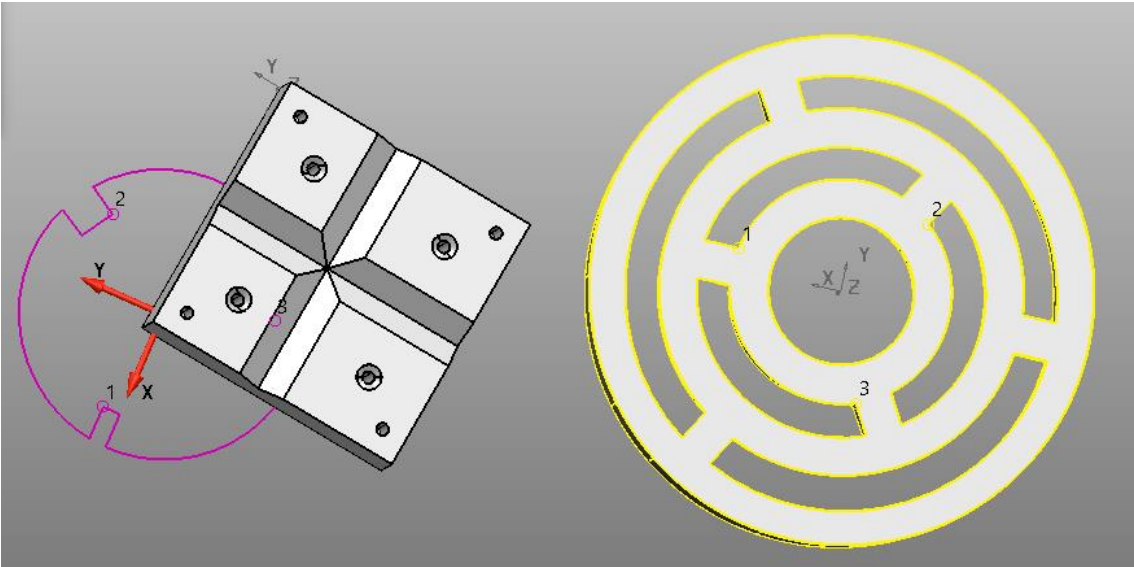
Selecione o item fixo:



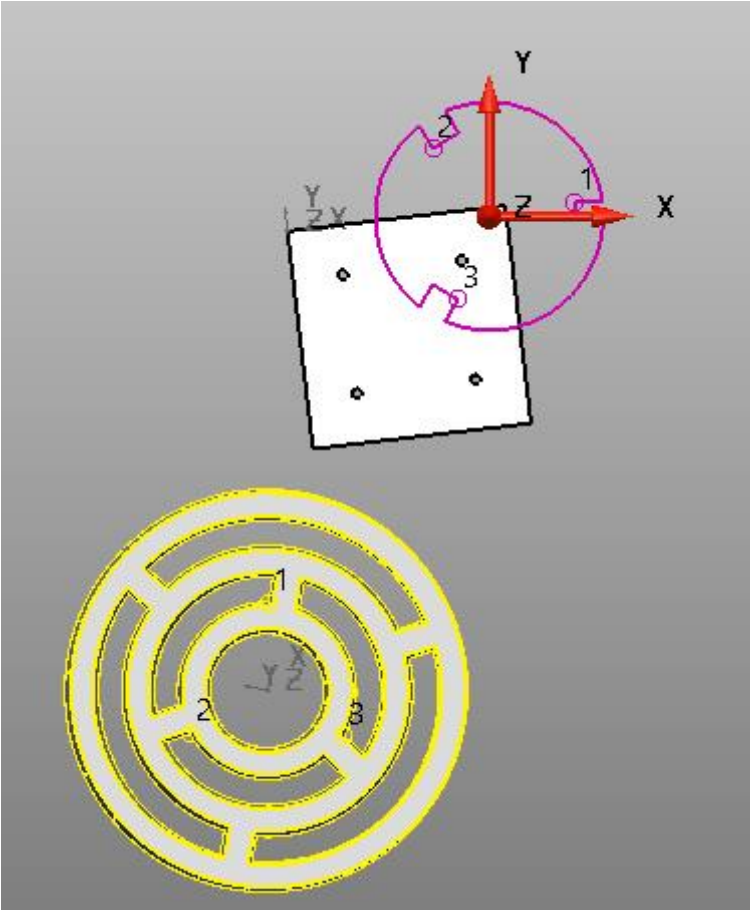
E selecione e 3 pontos em cada um deles exatamente como mostra a figura:

Nota: Os pontos selecionados na peça de fundição, pertencem à sua superfície inferior.

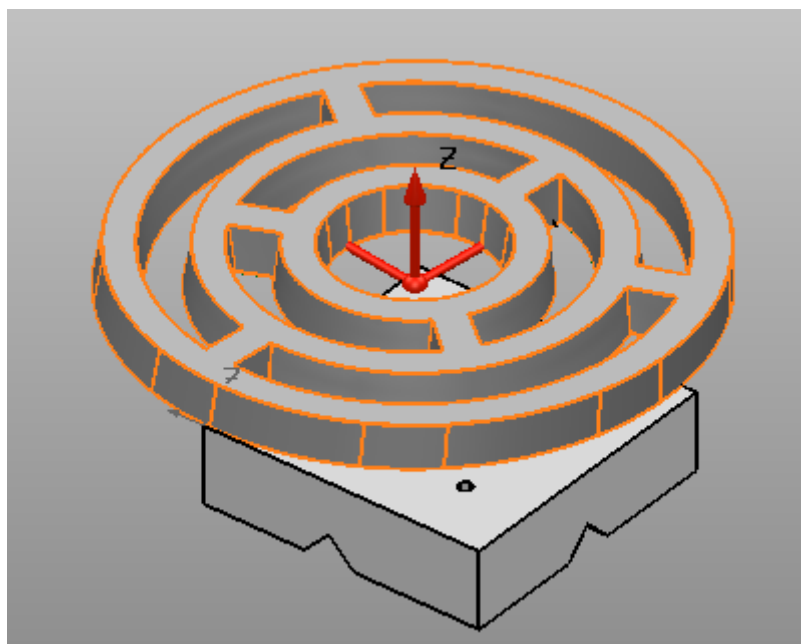
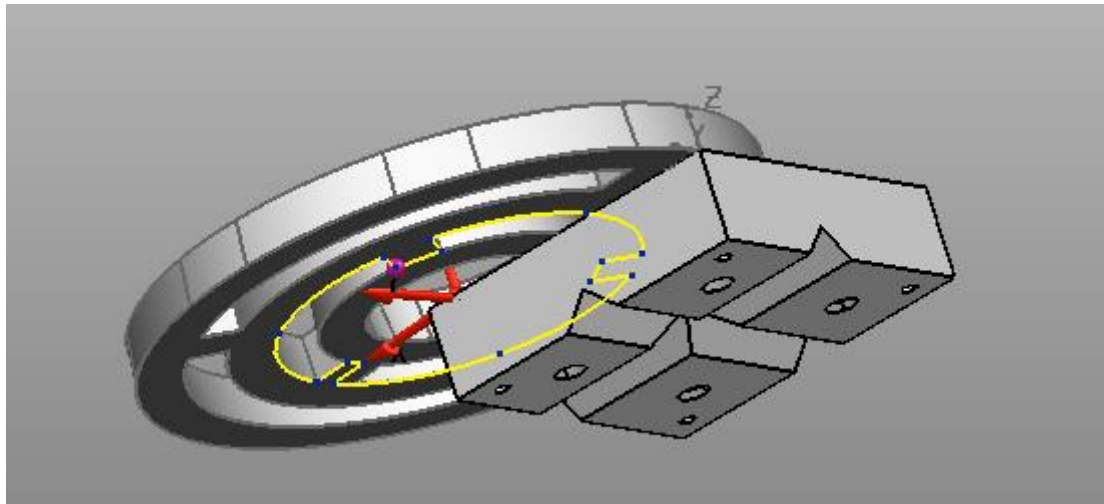
Vista de baixo




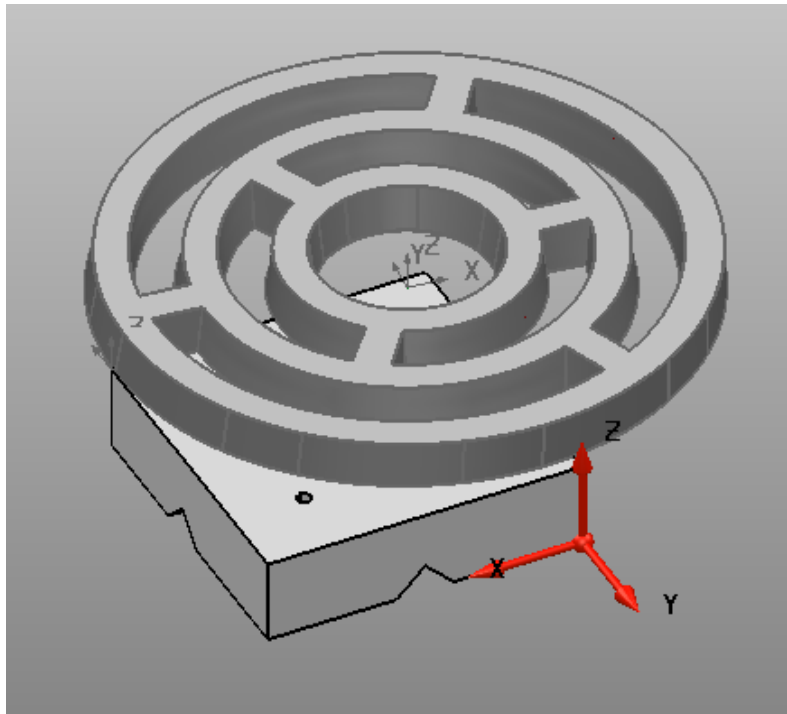
Vista de cima



Finalmente, faça aplicar, pelo que deve obter o seguinte:

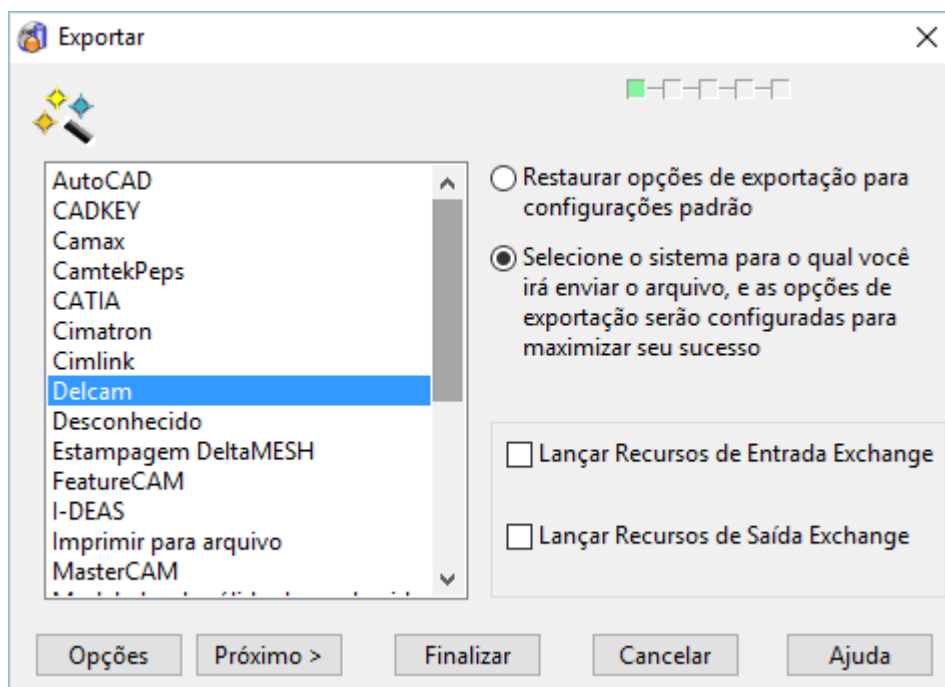


Para facilitar o posicionamento, no *software PowerMILL*, crie um plano de trabalho  e posicione-o, tal como na figura:



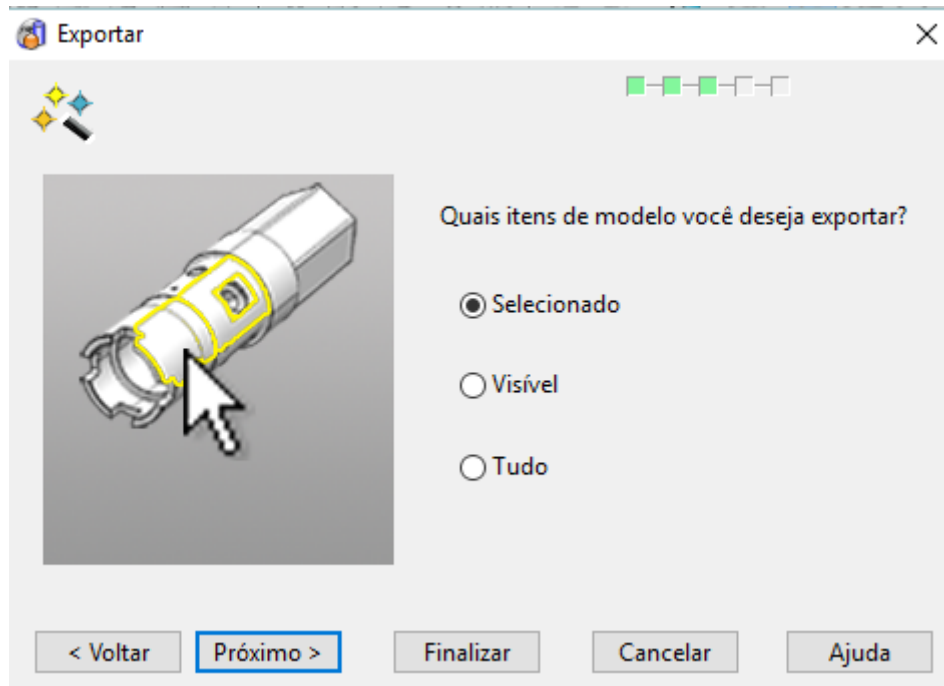
Finalmente, grave o ficheiro:

- Ative o plano de trabalho criado recentemente;
- Selecione só os dois sólidos;
- Clique em Arquivo > Exportar > *Delcam*;

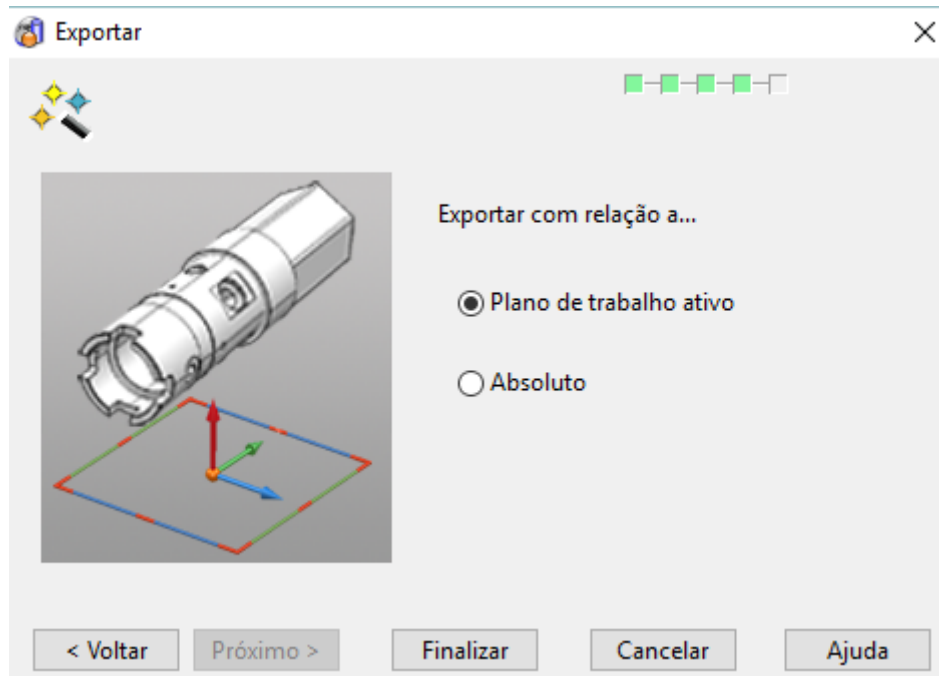


- Clique em Próximo;

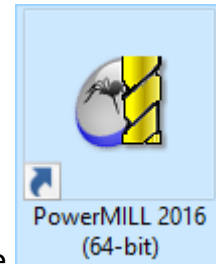
- Escolha o local onde pretende gravar;
- Selecione “Selecione” e faça “Próximo”;



- E no último selecione “Plano de trabalho ativo” e faça “Finalizar”.



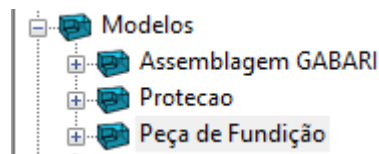
5. Posicionamento no *PowerMILL*



Abra o *software PowerMILL*, clicando 2 vezes no ícone

De seguida clique em Arquivo > Abrir Projeto e selecione o projeto “BASE”.


No Explorer clique no “+” em Modelos e clique com o botão direito do rato em “Peça de Fundição” e faça “Reimportar Modelo”.



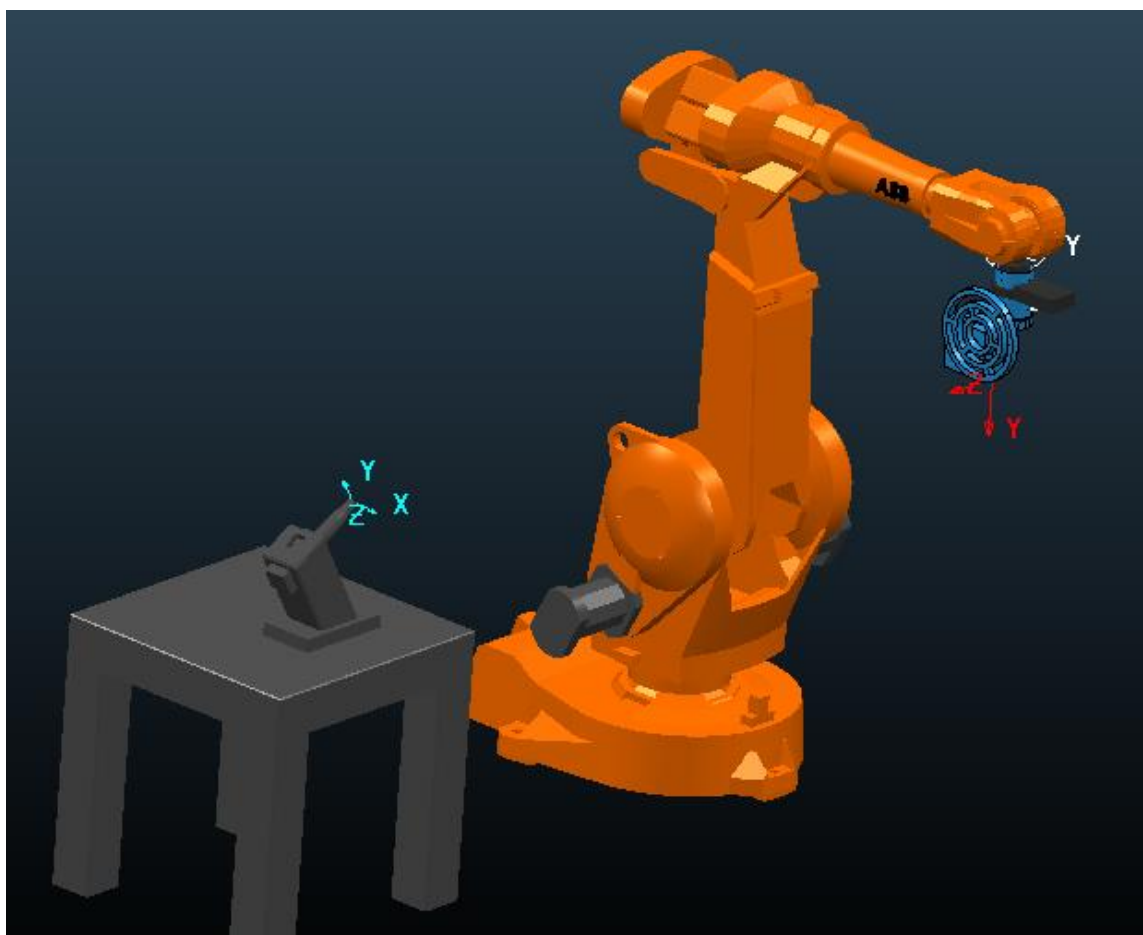
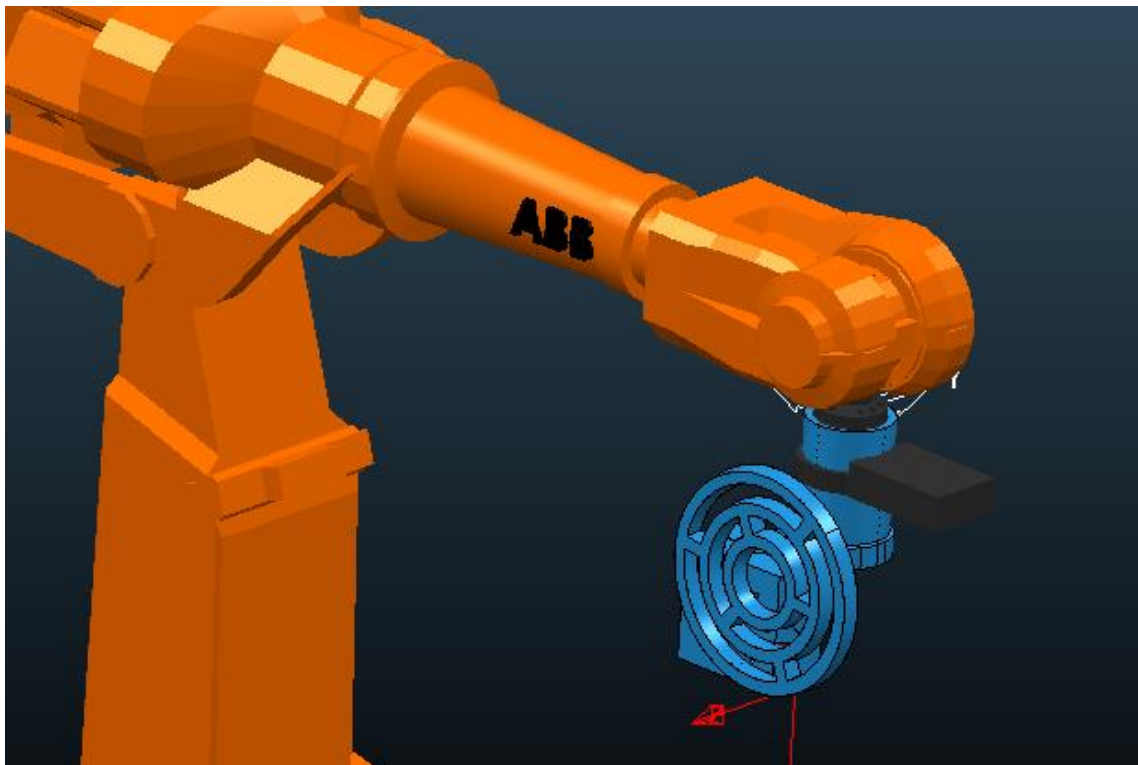
Selecione o modelo criado anteriormente.

Clique novamente com o botão direito do rato em “Peça de Fundição” e faça Editar > Transformar para abrir a seguinte janela, preencha-a da seguinte forma:



Ative o plano de trabalho “PlanoGabari” e clique em “Transformar para Plano de Trabalho Ativo” .

Desta forma deve obter o seguinte:



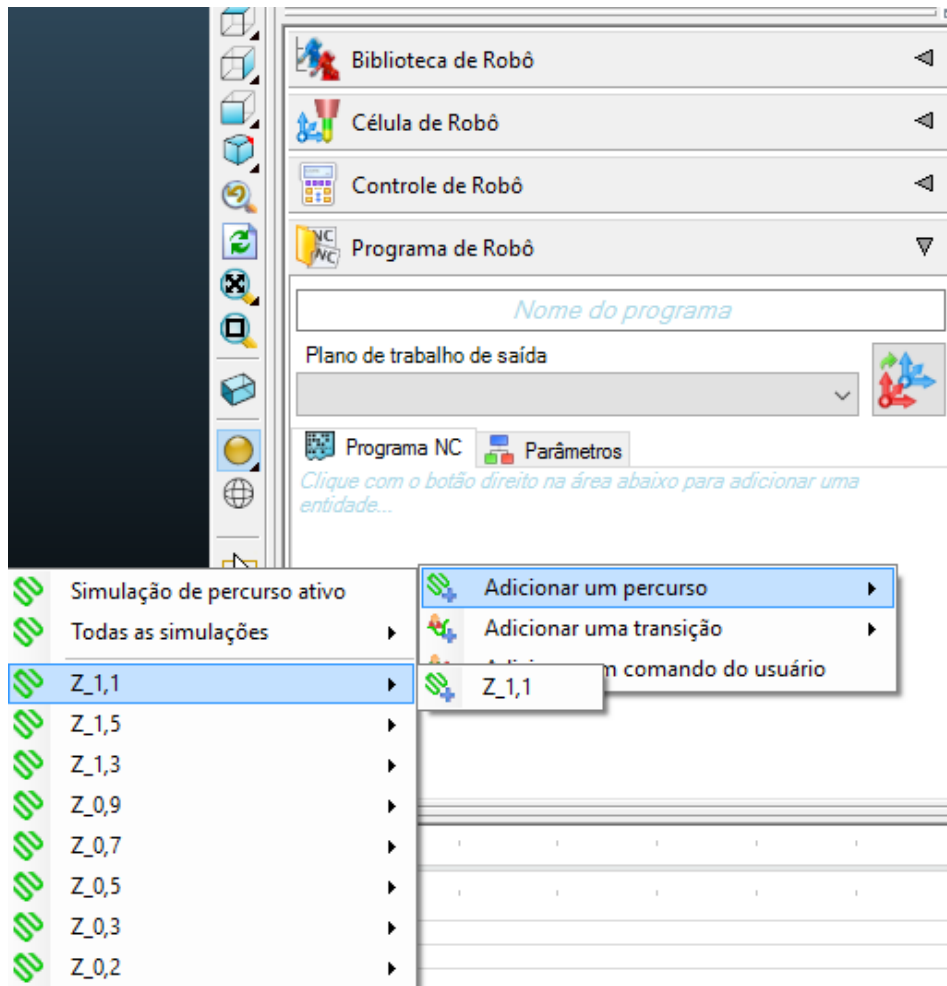
6. Programação do percurso de ferramenta em *PowerMILL*

Nesta fase, deve programar a trajetória mais adequada para a peça de fundição em questão (para esta peça, usaram-se estratégias de Acabamento *Swarf* com sobremetais consecutivamente decrescentes).

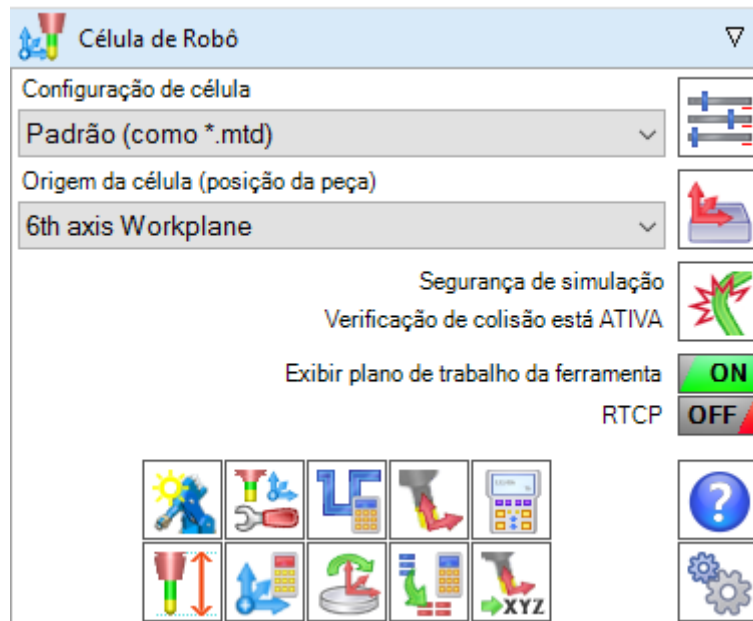
7. Pós-Processamento


Depois de conseguir trajetórias livres de colisões, singularidades, facadas, etc, deverá preencher os quadros de acordo com o que se segue:

1. Adicione os percursos: em “Programa Robô”, clique com o botão direito na janela e adicione o(s) percurso(s), tal como indica a figura;



2. Preencha o quadro “Célula Robô” da seguinte forma:



3. Clique em “calculador do plano de trabalho do robô”  e preencha o quadro do seguinte modo sem o fechar;

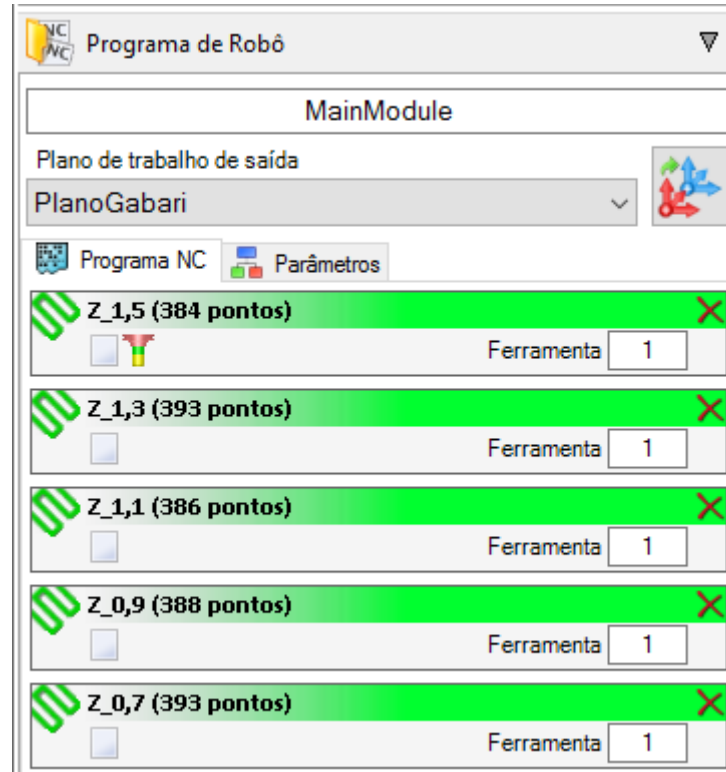
Cálculo do pln de trabalho do robô

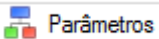
| Plano de trabalho base | | | Pln de trabalho da ferr. | | |
|--|-------------------|------------------|--|-------------------|------------------|
| Sistema de coordenadas plano de trabalho base | | | Sist. coord. do pln de trab. da ferr. | | |
| 6th axis Workplane | | | World Workplane | | |
| Plano de trabalho base | | | Pln de trabalho da ferr. | | |
| PlanoGabari | | | | | |
| <input type="checkbox"/> Usar pln trabalho da ferramenta atual | | | <input checked="" type="checkbox"/> Usar pln trabalho da ferramenta atual | | |
| Origem | Euler ZYXr | Quatémios | Origem | Euler ZYXr | Quatémios |
| X: -55 | Rz: 0 | Q1: 0,70710678 | X: 65,435 | Rz: -0,907 | Q1: 0,49924228 |
| Y: -110,65 | Ry: 0 | Q2: 0,70710678 | Y: -1098,714 | Ry: 0 | Q2: 0,8664263 |
| Z: 206,6 | Rx: 90 | Q3: 0 | Z: 897,756 | Rx: 120,098 | Q3: -0,00685549 |
| | | Q4: 0 | | | Q4: -0,00395008 |
| Planos de trabalho do robô World Workplane Criar | | | Base <input checked="" type="checkbox"/> Ferramenta <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | | | Copiar para lista de parâmetro de usuário | | Fechar |

Aviso: Certifique-se de que o robô esteja na posição de calibração ao calcular os planos de trabalho

4. Preencha o quadro “Programa de Robô” da seguinte maneira:

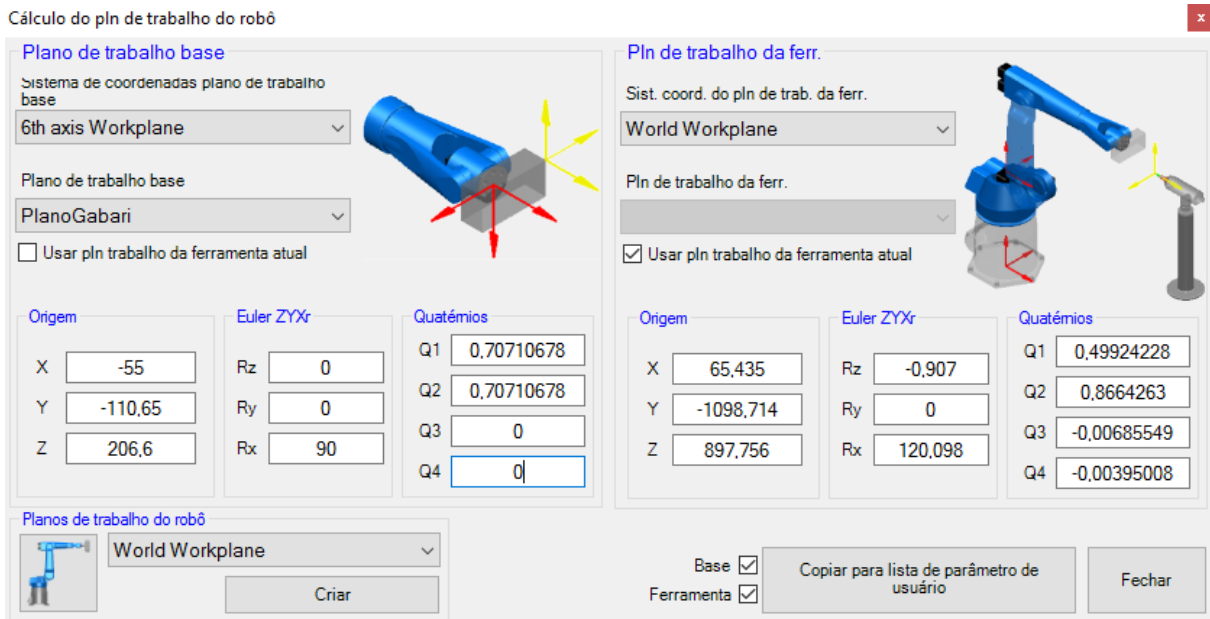
Nota: O nome do programa é “MainModule” devido à configuração do controlador do robô.



5. Clique em “Parâmetros”  e preencha o quadra como o que se segue:

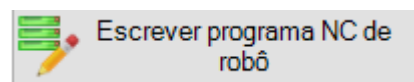
| Parâmetro | Valor | Unid... |
|----------------------|------------|---------|
| Robot | | |
| Module (Main) | MainModule | |
| Procedure (Main) | main | |
| Acceleration (Robot) | 20 | % |
| Smoothing (Zone) | 1 | |
| ConfJ | On | (On/... |
| ConfL | Off | (On/... |
| Spindle | | |
| Mass | 25 | kg |
| Gravity Center X | 0 | mm |
| Gravity Center Y | 0 | mm |
| Gravity Center Z | 100 | mm |

| Part origin | | |
|--------------------|-------------|----|
| Work Object Name | PlanoGabari | |
| Work Object X | -55 | mm |
| Work Object Y | -110,65 | mm |
| Work Object Z | 206,6 | mm |
| Work Object Q1 | 0,70710678 | |
| Work Object Q2 | 0,70710678 | |
| Work Object Q3 | 0 | |



Nota: Repare que os valores dados para o posicionamento do plano, são os mesmos que os dados pelo calculador de planos, daí esta janela ser necessária para copiar esses mesmos valores.

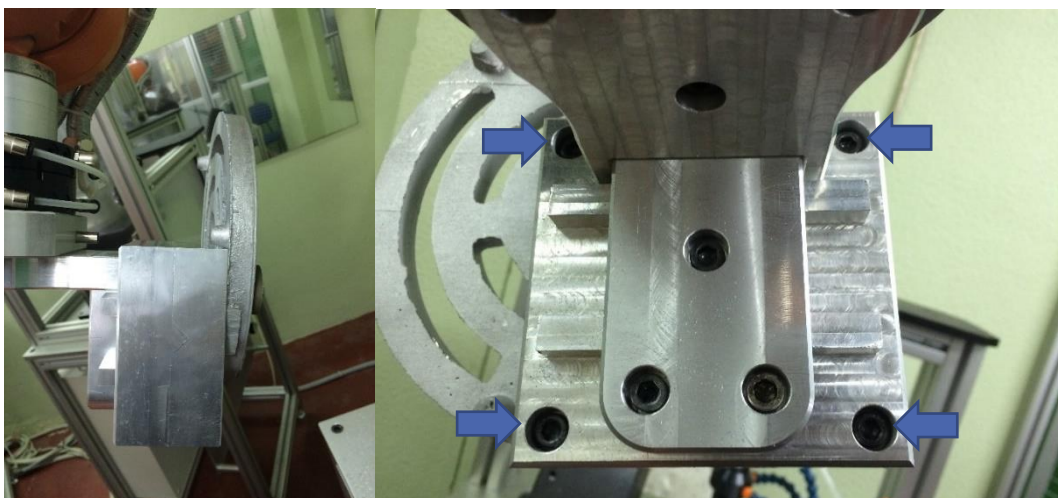
6. Finalmente escreva o programa, clicando em



gravando o projeto de seguida.

8. Montagem do Gabari

Junte as duas partes do gabari, apertando os 4 parafusos correspondentes, tal como na imagem seguinte:



9. Colocação de percursos no controlador do Robô

Com uma pen, copie o programa NC que está na pasta: “Nome do Projeto” > *Plugin_data* > *RobotInterface* > *Output Files* > *MainModule*.

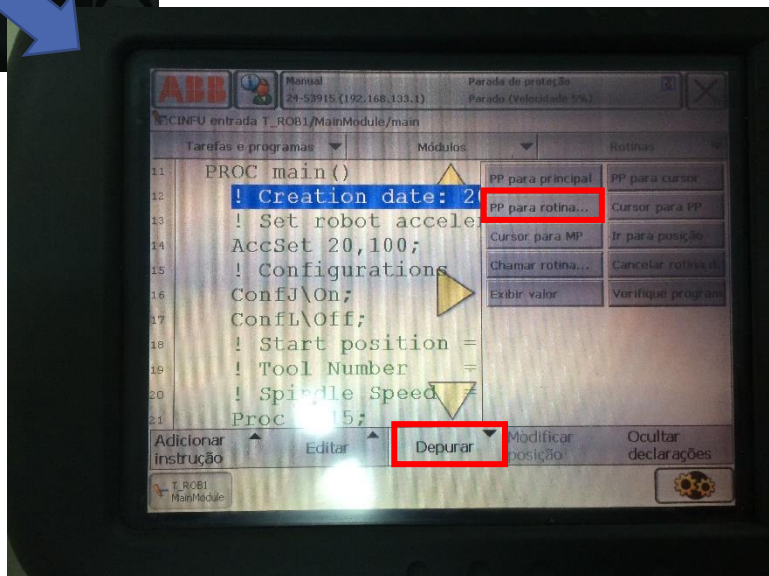
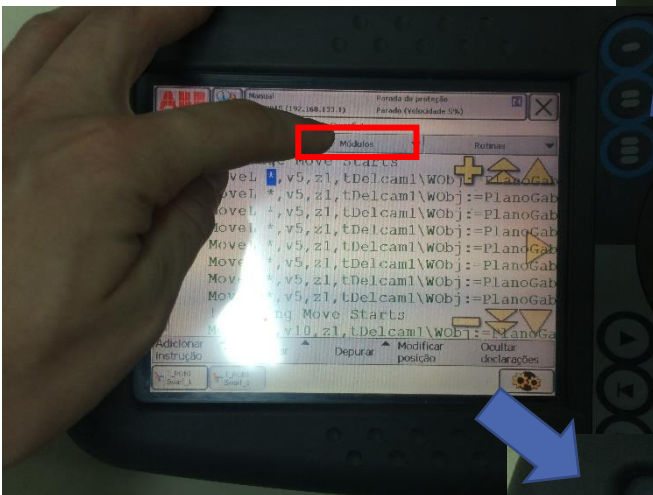
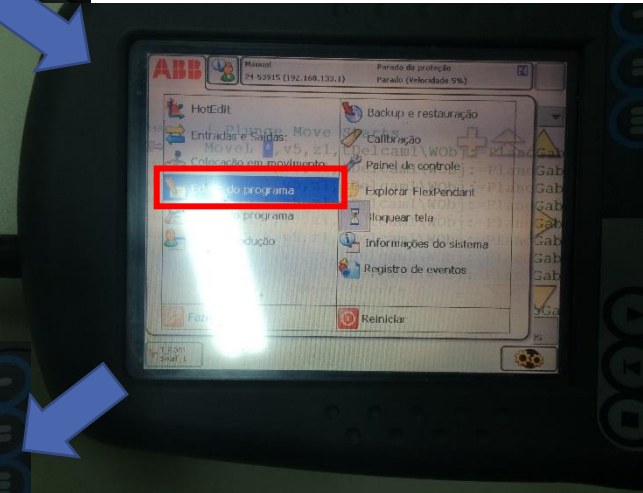
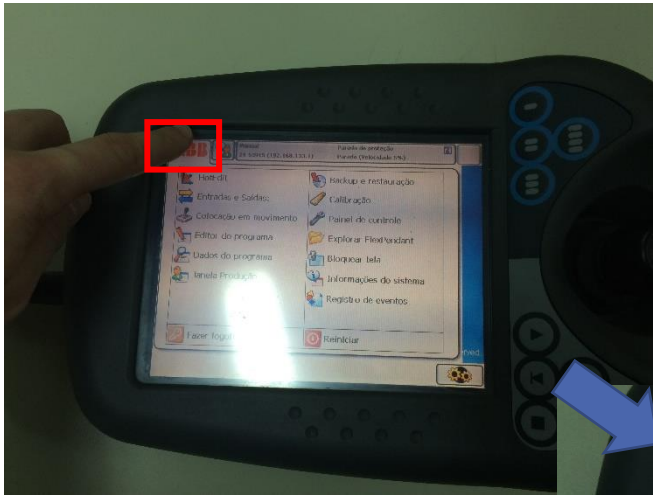
Copie a pasta *MainModule* para uma pen e insira-a no controlador do robô.



No *FlexPendant* siga os seguintes passos:

1. Carregue em ABB > Editor do programa > Módulos;
2. Arquivo > Carregar Módulo e aceite a mensagem;
3. Carregue da pen, um de cada vez, todos os seus percursos, incluindo o *MainModule*, seguindo este processo;
4. Selecione *MainModule* > Mostrar Módulo > Depurar > PP para rotina e faça “OK”.

Rebarbagem em Célula Robô através de Programação Offline em CAM



10. Execução da Rebarbagem

Finalmente, pode executar o programa em modo manual ou automático:

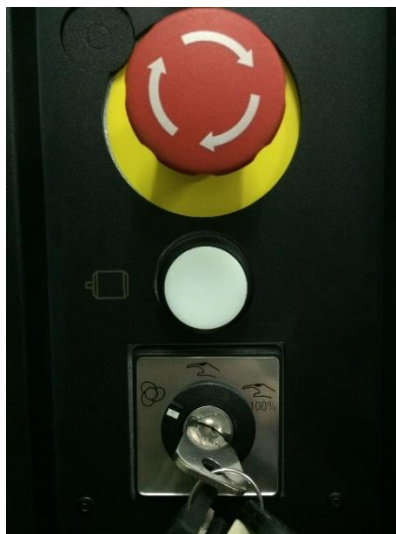
Manual:

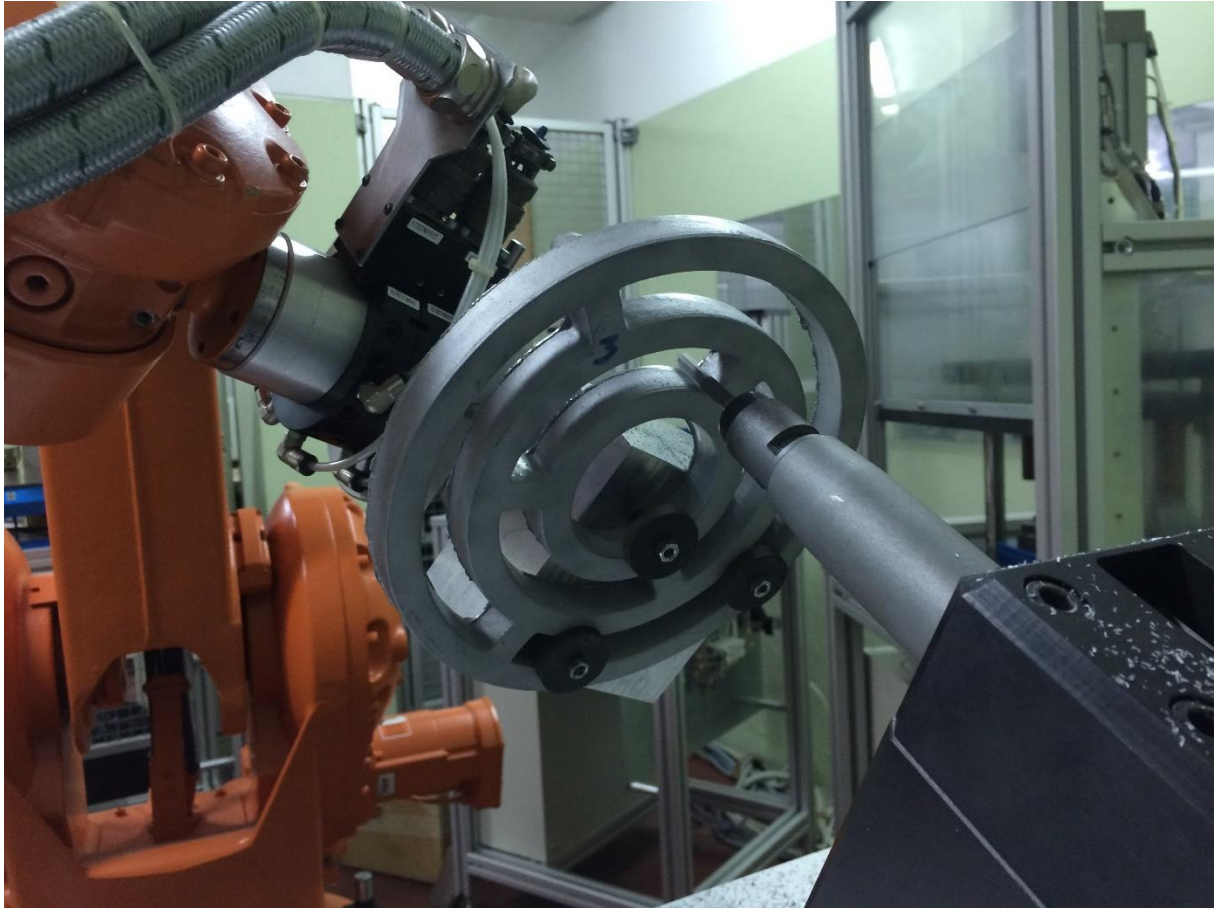
Em modo manual, abra o programa *MainModule* e de seguida tem de premir o botão da figura numa posição intermédia e fazer *play*.



Automático:

Em modo automático, abra o programa *MainModule*, clique no botão branco do controlador, até receber a mensagem no *FlexPendant* “Motores Ligados”, de seguida faça *play*.





FIM