

Otimização do Processo de Maquinagem de Bombas Centrífugas

Tiago Manuel Monteiro Valente

Dissertação de MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Manuel Romano dos Santos Pinto Barbosa

Coorientador na FEUP: Prof. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Coorientador na EFAFLU: Eng.^a Maria Benedita Pereira da Silva e Vasconcellos Ferreira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Especialização de Automação

Junho de 2019

À minha família

Resumo

A presente dissertação, desenvolvida na empresa EFAFLU, Bombas e Ventiladores S.A., é parte integrante da sua estratégia de desenvolvimento e visa a potenciação dos benefícios do centro de maquinagem (CM), recentemente adquirido pela empresa.

O trabalho desenvolvido consiste na análise dos processos de maquinagem atuais do CM, mais concretamente na maquinagem de componentes para bombas centrífugas produzidas na empresa, o corpo da bomba e a sua carcaça, onde se irá alojar o motor elétrico associado à bomba. Desta forma, foram elaboradas algumas propostas que têm como objetivo a otimização do processo de maquinagem em três vertentes distintas: os métodos e dispositivos de fixação das peças a maquinar; as ferramentas de corte; e a elaboração de programas de comando numérico.

Após uma análise detalhada dos métodos e dispositivos auxiliares de fixação existentes, foram idealizadas e projetadas várias soluções alternativas, manuais e automáticas, com intuito de fixar de forma mais célere as peças na mesa da máquina, nomeadamente, uma mesa de fixação adicional, um esquadro de suporte, grampos e buchas de aperto automático e pratos de apoio para o corpo da bomba e para a carcaça.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi também possível selecionar um processo de programação *offline*, através de um *software* CAM (*Mastercam*), testar e analisar as vantagens da sua aplicação na empresa, comparativamente com a programação *online* utilizada atualmente. O *software* CAM demonstrou superioridade mesmo em operações mais simples de maquinagem 2D, através de uma maior variedade de ciclos de maquinagem face aos disponibilizados no controlador (CNC) da máquina e da facilidade e rapidez na geração de código de comando numérico. Permite ainda uma avaliação dos tempos de maquinagem e verificação, através de simulação, da qualidade dos percursos definidos tornando mais fácil a otimização dos processos de maquinagem. Adicionalmente facilita a organização e registo de informação para apoio técnico concedido ao operador, através da criação de fichas de maquinagem.

Foram ainda analisadas as ferramentas e os respetivos parâmetros de corte utilizados no processo de maquinagem, sendo identificadas e descritas sugestões de modelos mais avançados que podem ser implementados no futuro, de modo a otimizar este processo de maquinagem. Esta análise inclui simulação das ferramentas na execução das operações de maquinagem no *Mastercam*.

Assim, este projeto abrange diversas áreas de engenharia, nomeadamente aspetos de processos de fabrico, gestão da produção e ainda potencia a automatização dos processos de maquinagem, visando, dessa forma, auxiliar e minimizar o trabalho do operador.

Optimization of the Machining Process of Centrifugal Pumps

Abstract

The present dissertation, developed in the company EFAFLU, Bombas e Ventiladores S.A., is an integral part of its development strategy and aims at enhancing the benefits of the machining center (MC), recently acquired by the company.

The work developed consists in the analysis of the machining processes currently performed at the machining center, more specifically the machining of two major components for centrifugal pumps produced by the company: the pump body and casing for the pump's electric motor. Herewith, some proposals have been made that aim to optimize, mainly through the reduction of setup times, the machining process concentrating on three areas: the methods and fastening devices to support parts to be machined in the machine table, cutting tools and cutting parameters used and the development of numerical control part programs.

After a detailed analysis of the methods and auxiliary fastening devices, some manual and automatic solutions were designed and explored in order to quickly fasten the parts to the machine table, which include a new fixing table, a support stand, staples and self-tightening bushings and support plates for both the pump body and the casing.

During the development of this work it was also possible to select and use an offline programming process through a CAM software, and analyze the advantages of its application in the company, compared to the online programming currently used. The CAM software demonstrated superiority even in simple 2D machining operations, through an increase in the number of machining cycles compared to the ones available at the machine controller (CNC), the speed in the generation of numerical control code and in the technical support made available to the operator, through the creation of machining setup sheets.

An analysis was also made of the tools and cutting parameters used in the machining process which allowed identification of alternative tools and respective cutting parameters to be used when machining the parts tested.

Thereby, this project covers several engineering areas, namely of manufacturing processes, production management and the implication of using automation technology at machining processes, with the purpose of minimize the operator's work.

Agradecimentos

Um especial agradecimento ao Professor Manuel Romano Barbosa e ao Professor Abílio de Jesus, meus orientadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela total colaboração, conhecimento transmitido e incentivos prestados na realização deste trabalho.

Agradeço também a todos os Engenheiros e Técnicos da EFAFLU, em especial à Engenheira Benedita Ferreira, pela partilha de ideias e apoio disponibilizado no decorrer do desenvolvimento deste projeto.

Gratifico ainda aos Engenheiros da empresa Palbit, particularmente o Engenheiro Daniel Figueiredo, pelo auxílio e cooperação na otimização deste projeto.

Gostaria igualmente de agradecer à empresa GrandeSoft que disponibilizou a versão mais recente do *software Mastercam*, tornando possível a execução dos testes no decorrer da dissertação.

Por último, dirijo um especial obrigado à minha mãe e irmã, pelo carinho, suporte e apoio incondicional demonstrados e pela ajuda na superação dos obstáculos ao longo desta etapa.

Um sincero obrigado a todos vós,
Tiago Manuel Monteiro Valente

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2	Desenvolvimento do projeto na EFAFLU	1
1.3	Objetivos do projeto.....	2
1.4	Estrutura da dissertação	2
2	Maquinagem de bombas centrífugas	5
2.1	Produção de bombas centrífugas.....	5
2.2	Maquinabilidade dos materiais	7
2.3	Maquinagem de bombas centrífugas e equipamentos CNC	9
3	Análise do processo de maquinagem atual	19
3.1	Métodos de fixação e operações realizadas	19
3.1.1	Corpo da Bomba TGCL 100-200 100L.....	19
3.1.2	Carcaça da bomba TGCL 100L.....	24
3.2	Elaboração dos programas de maquinagem (CN).....	28
3.3	Ferramentas.....	32
3.3.1	Ferramentas de Fresagem	33
3.3.2	Ferramentas de Furação	33
4	Análise e proposta de soluções para a maquinagem CNC	37
4.1	Métodos e dispositivos de fixação	37
4.1.1	Mesa de fixação	38
4.1.2	Prato de apoio para bombas.....	39
4.1.3	Esquadro de suporte	41
4.1.4	Prato de apoio para carcaças do motor	43
4.1.5	Batente	45
4.1.6	Grampos de aperto automático	46
4.1.6	Bucha de aperto automático	50
4.2	Elaboração dos programas de maquinagem.....	53
4.2.1	Utilização do <i>Software</i> CAM para otimizar os programas de maquinagem	55
4.2.2	Simulação do 4º eixo no <i>Mastercam</i>	66
4.2.3	Vantagens Globais do <i>Software</i> CAM na EFAFLU.....	67
4.2.4	Sugestão de ciclos de maquinagem no controlador.....	69
4.3	Otimização das ferramentas	72
4.3.1	Ferramentas para contornos.....	72
4.3.2	Ferramentas para furação.....	74
4.3.3	Ferramentas para chanfrar/escarear	74
4.3.4	Ferramentas para o interior da carcaça.	75
4.4	Ficha de maquinagem	77
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	83
5.1	Conclusões	83
5.2	Trabalhos Futuros	84
	Referências	87
	ANEXO A: Maquinagem de bombas centrífugas	91
	ANEXO B: Documentos do Centro de Maquinagem Akira-Seiki	104

ANEXO C: Operação realizadas com <i>Mastercam</i>	108
ANEXO D: Novos métodos de fixação.....	112
ANEXO E: Novas ferramentas para o centro de maquinagem	117

Índice de Figuras

Figura 2.1 Bomba Radial Centrífuga TGCL.	6
Figura 2.2 Etapas de produção de uma bomba.	6
Figura 2.3 Índices de maquinabilidade em função de grupos de materiais e respectivas durezas [3].	8
Figura 2.4 Configuração do sistema de controlo de um CM em anel fechado.....	11
Figura 2.5 Centro de maquinagem <i>Akira-Seiki Performa Classic V6 XP</i>	13
Figura 2.6 Sistema de mudança de ferramentas <i>Akira-Seiki</i>	14
Figura 2.7 Sonda OMP60 Renishaw e as suas operações [18].....	15
Figura 2.8 Sistemas auxiliares de maquinagem: a) Bucha pneumática; b) Guindaste.	16
Figura 2.9 Comandos principais do controlador Mitsubishi <i>Mi745</i>	17
Figura 3.1 Partes a maquinar no corpo da bomba – TGCL100-200 100L.	20
Figura 3.2 Componentes de fixação na 1º fase de maquinagem do corpo da bomba.....	21
Figura 3.3 Alinhamento do eixo da flange de descarga com o eixo X da mesa.	21
Figura 3.4 Alinhamento do esquadro com um comparador.	22
Figura 3.5 Grampos manuais e bloco para encosto da flange da bomba.....	23
Figura 3.6 Componentes de fixação na 3º fase de maquinagem do corpo da bomba.....	23
Figura 3.7 Partes a maquinar na carcaça – TGCL100L.	25
Figura 3.8 Maquinagem por torno vertical.	26
Figura 3.9 Primeira fixação da carcaça no centro de maquinagem.	27
Figura 3.10 Etapas gerais de programação nas bombas e carcaças.	28
Figura 3.11 Programa padrão para retirar o centro do furo. [18]	29
Figura 3.12 Subprograma para retirar o centro do furo.	29
Figura 3.13 Facejamento da flange de aspiração por contorno circular.	30
Figura 3.14 Tipos de contorno: a) Contorno incremental; b) Contorno em rampa (helicoidal) [21].	31
Figura 3.15 Contorno incremental aplicado à caixa de terminais.	32
Figura 3.16 Ferramentas de fresagem: a) Fresa 50 mm; b) Roca 80 mm; c) Fresa de topo 16 mm.	33
Figura 3.17 a) Ferramenta de chanfrar com diâmetro máximo de 10 mm; b) Ferramenta de escarear com diâmetro máximo de 23 mm.	34
Figura 4.1 Componentes do tempo total de fixação (corpo – 00:16:33; carcaça -00:18:50).	37
Figura 4.2 Mesa para o centro de maquinagem.	38
Figura 4.3 Mesa de referência no centro de maquinagem.	39
Figura 4.4 Mesa de fixação no centro de maquinagem <i>Akira-Seiki</i>	39
Figura 4.5 Furações de diâmetro 18 mm na flange de aspiração - Primeira fase de maquinagem.	40

Figura 4.6 Prato para as flanges de aspiração dos corpos das bombas aplicado na mesa.	41
Figura 4.7 Aplicação do prato na bomba TGCL 100L.....	41
Figura 4.8 Esquadro de referência montada sobre a mesa proposta para o centro de maquinagem.	42
Figura 4.9 Terceira fixação da bomba no centro de maquinagem.	42
Figura 4.10 Furações dos drenos da bomba no novo esquadro.	43
Figura 4.11 Prato de apoio para carcaça TGCL 100L.....	43
Figura 4.12 Fixações da carcaça através do prato: a) Primeira fase de maquinagem; b) Segunda fase de maquinagem.	44
Figura 4.13 Placa sobreposta ao prato para carcaça TGCL112.	44
Figura 4.14 Implementação do prato de apoio às carcaças.	45
Figura 4.15 Batente aplicado a bombas e carcaça.	46
Figura 4.16 Valor do “engagement angle” [22].	48
Figura 4.17 Valores de kc_x e m_c para os diferentes ferros fundidos [22].	48
Figura 4.18 Código automático “furo de sonda” [18].	54
Figura 4.19 Exemplo de código para programar automaticamente a sonda.	55
Figura 4.20 Inclusão do <i>Stock Setup</i> no <i>Mastercam</i> (bomba TGCL100L).	56
Figura 4.21 Criação de lista de ferramentas.	57
Figura 4.22 Operações realizadas no <i>Mastercam</i>	58
Figura 4.23 Simulação da maquinagem da bomba TGCL 100.	58
Figura 4.24 Percursos de facejamento no <i>Mastercam</i>	60
Figura 4.25 Trajeto percorrido pela fresa no ciclo “Dynamic Contour”.	61
Figura 4.26 Estratégias de maquinagem <i>Mastercam</i> aplicadas à caixa de terminais: a) Zig Zag; b) Constant Overlap Spiral.	63
Figura 4.27 Contorno dinâmico aplicado à flange de aspiração – Bomba TGCL 100-200 100L.	64
Figura 4.28 Contorno dinâmico na tampa do motor	65
Figura 4.29 Contorno dinâmico aplicado à caixa de terminais – Carcaça TGCL100L.	66
Figura 4.30 Simulação do quarto eixo em bombas e carcaças com recurso ao <i>Mastercam</i>	67
Figura 4.31 Contorno incremental XY aplicado à flange de descarga.	70
Figura 4.32 Fresa de topo de pastilhas intercambiáveis.	73
Figura 4.33 Importação do modelo <i>step</i> da ferramenta para <i>Mastercam</i>	76
Figura 4.34 Torneamento interior da carcaça TGCL 100L.	76
Figura 4.35 Ficha de maquinagem criada no <i>Mastercam</i>	78
Figura 4.36 Capa genérica para ficha de maquinagem.	80
Figura 4.37 Ficha de maquinagem EFAFLU – Ferramentas e parâmetros de corte.	81
Figura 4.38 Ficha de maquinagem EFAFLU – Etapas de <i>Setup</i>	82

Figura A. 1 Partes a maquinar do corpo da bomba TGCL100L.....	91
Figura A. 2 Fixações na primeira fase de maquinagem.	91
Figura A. 3 Operações de maquinagem na primeira fase.....	92
Figura A. 4 Elementos de fixação segunda fase de maquinagem: a) bomba fixa por grampos; b) bloco de apoio à flange de descarga.	92
Figura A. 5 Operações de maquinagem na segunda fase - corpo da bomba TGCL100L.....	93
Figura A. 6 Elementos de fixação na terceira fase de maquinagem.....	93
Figura A. 7 Operações de maquinagem na terceira fase - corpo da bomba TGCL100L.....	94
Figura A. 8 Operações de maquinagem na segunda fase - corpo da bomba TGCL100L.....	94
Figura A. 9 Desenho técnico do corpo da bomba TGCL100L.....	95
Figura A. 10 Partes a maquinar da carcaça da bomba TGCL100L.....	97
Figura A. 11 Operações de maquinagem na carcaça TGCL 100L no torno vertical.	97
Figura A. 12 Dispositivos de fixação na segunda fase de maquinagem – CM Akira-Seiki.....	98
Figura A. 13 Operações de maquinagem na segunda fase no CM Akira-Seiki.....	98
Figura A. 14 Terceira fase de maquinagem: a) fixação por plana no interior da carcaça; b) furações realizadas na flange da carcaça.	99
Figura A. 15 Elementos de fixações na quarta fase de maquinagem - carcaça TGCL100L.	100
Figura A. 16 Operações de maquinagem na caixa de terminais da carcaça TGCL100L.	100
Figura A. 17 Elementos de fixação na quinta fase de maquinagem - carcaça TGCL100L.....	101
Figura A. 18 Desenho técnico da carcaça da bomba TGCL100L.	102
 Figura B. 1 Etapas de criação de um programa no controlador.	 104
Figura B. 2 Lista de códigos G para o controlador Mitsubishi M70V [29].	105
Figura B. 3 Orçamento do 4º eixo divisor.	106
Figura B. 4 Dimensões do 4º eixo divisor.....	107
 Figura C. 1 Comparação entre o corpo da bomba fundido e maquinado.	 108
Figura C. 2 Comparação entre o corpo da carcaça fundido e maquinado.	108
Figura C. 3 Operações de maquinagem do <i>Mastercam</i> aplicada à carcaça TGCL100L.....	109
Figura C. 4 Simulação das operações de maquinagem na carcaça TGCL100L.....	109
Figura C. 5 Percursos de facejamento otimizados no corpo da bomba através do percurso dinâmico do <i>Mastercam</i> : a) Flange de aspiração; b) flange de descarga; c) zona de encaixa da tampa da bomba.....	110
Figura C. 6 Ciclo dinâmico aplicado à zona de encaixe da tampa do motor - Carcaça TGCL100L.	111
Figura C. 7 Ciclos de facejamento aplicado à zona da caixa de terminais da carcaça: a) Dinamic Mill; b) Zig-Zag; c) True Spiral; d) Morph Spiral.....	111

Figura D. 1 Desenho da mesa de fixação.	112
Figura D. 2 Desenho do esquadro de suporte.....	113
Figura D. 3 Desenho do prato de apoio para bombas.	114
Figura D. 4 Desenho do Prato de apoio para carcaça TGCL 112M.....	115
Figura D. 5 Placa para prato da carcaça TGCL 100L.	116
Figura E. 1 Parâmetros de corte e orçamento da fresa de topo [31].....	117
Figura E. 2 Seleção da fresa de topo de diâmetro 20 mm [22].	117
Figura E. 3 Parâmetros de corte na fresa de topo para ferro fundido [22].	118
Figura E. 4 Seleção de brocas de pastilhas intercambiais para a flange do corpo da bomba [22].	118
Figura E. 5 Parâmetros de corte para broca de pastilhas [22].	119
Figura E. 6 Dimensões do escareador.	119
Figura E. 7 Criação do escareador da Inova Tools no <i>Mastercam</i>	120
Figura E. 8 Parâmetros de corte utilizados no escareador - Inova Tools.	120

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Características gerais do centro de maquinagem <i>Akira Seiki-Performa Classic V6 XP</i>	13
Tabela 3.1 Parâmetros de corte usados nas principais ferramentas/operações de maquinagem da empresa.	35
Tabela 4.1 Parâmetros de corte usados no facejamento em desbaste, fresa 50 mm.	46
Tabela 4.2 Parâmetros de corte utilizados no contorno em desbaste da flange de aspiração do corpo da bomba.	50
Tabela 4.3 Ferramentas utilizadas nos testes <i>Mastercam</i>	59
Tabela 4.4 Tempo [min:seg] de facejamento usando percursos <i>Mastercam</i> – Bombas TGCL (* solução atual).	60
Tabela 4.5 Tempo [min:seg] de facejamento usando percursos <i>Mastercam</i> – Carcaças TGCL (* solução atual).	62
Tabela 4.6 Tempo dos diferentes contornos aplicados à bomba TGCL 100-200 100L.	64
Tabela 4.7 Tempo dos contornos em <i>Mastercam</i> aplicados à carcaça TGCL100L (*solução atual).	65
Tabela 4.8 Orçamentos de sistemas CAM.	69
Tabela 4.9 Contorno incremental aplicado à bomba TGCL 100-200 100L.	70
Tabela 4.10 Ganhos temporais na aplicação de duas voltas circulares ao facejamento.	71
Tabela 4.11 Tempo ganho na furação das flanges da bomba.	71
Tabela 4.12 Tempos otimizados na flange pela exclusão da operação de alargamento.	72
Tabela 4.13 Tempos com fresa de topo de Diâmetro 18 mm.	73
Tabela 4.14 Tempos de furação na flange da bomba com broca de pastilhas de 18 mm.	74
Tabela 4.15 Testes com ferramenta de escarear na Bomba TGCL100-200 100L.	75
Tabela 4.16 Testes com ferramenta de escarear na carcaça TGCL 100L.	75
Tabela A.1 Tempos de <i>setup</i> e maquinagem do corpo da bomba TGCL100-200 100L para lotes de 10 unidades.	96
Tabela A. 2 Tempos de <i>setup</i> e maquinagem da carcaça da bomba TGCL100L.	103

Siglas

ATC	<i>Automatic Tool Changer</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CM	Centro de Maquinagem
CN	Comando Numérico (<i>Numerical Control</i>)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
MMI	<i>Man Machine Interface</i>
NCK	<i>Numerical Control Kernel</i>
PLC	<i>Programmable Logic Control</i>

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A crescente competitividade entre empresas leva a uma necessidade constante de adotar estratégias que permitam potenciar a sua economia e produtividade. Neste sentido, a importância de tempos de maquinagem reduzidos, aliados ao aumento da qualidade dos produtos finais, impulsionou o desenvolvimento de métodos de produção mais sofisticados. O desenvolvimento na área da maquinagem tornou possível o aparecimento de máquinas CNC sendo estas indispensáveis à maioria dos processos atuais. A maquinagem CNC conjuntamente com a evolução das tecnologias de CAD/CAM permitiu aliar a alta produtividade à qualidade final das peças. Destacam-se inúmeras vantagens aliadas à rapidez de produção, no entanto, é indispensável uma correta utilização por parte do operador e a disponibilidade de elementos auxiliares de maquinagem para que seja possível rentabilizar todo o equipamento. Neste sentido, a necessidade de otimizar todo o processo de maquinagem torna-se cada vez mais relevante nas indústrias como forma de reduzir os custos associados à produção.

A empresa EFAFLU – Bombas e Ventiladores, S.A. produz uma vasta gama de bombas industriais desde as etapas iniciais de conceção, passando pela maquinagem dos componentes até à montagem final e ensaios. Com vista a melhorar o fabrico de bombas, a empresa adquiriu um centro de maquinagem CNC da marca *Akira-Seiki*. A motivação de todo o trabalho passa, assim, pelo interesse em explorar as potencialidades do equipamento CNC, não só a nível de programação como também no que respeita a todos os meios incluídos no processo de maquinagem das bombas.

1.2 Desenvolvimento do projeto na EFAFLU

A EFAFLU - Bombas e Ventiladores, S.A. é uma empresa portuguesa destinada à concessão, produção e comercialização de sistemas de bombagem e ventilação. Fundada em 1946, destaca-se por ser um dos fabricantes mais antigos de bombas hidráulicas e ventiladores a nível nacional. A sua sede social, plataforma logística, centro de I&D e os serviços pós-venda encontram-se localizados em Beiriz, na Póvoa de Varzim, integrando no total 115 assalariados. O seu grupo, no qual se inclui a Universal Motors, possui ainda uma delegação em Lisboa e sucursais em Espanha e no Reino Unido que garantem a distribuição nacional e internacional.

De modo a garantir a produção em série, a EFAFLU tem acordos com diversos fornecedores de componentes mecânicos e empresas de fundição que asseguram a entrega dos produtos para as fases de maquinagem. Os restantes processos desde a maquinagem até à montagem final dos produtos são realizadas nas instalações da EFAFLU, permitindo um maior controlo de qualidade dos equipamentos.

A vasta gama de produtos de bombagem inclui áreas diversas desde centrais de combate a incêndios, sistemas de drenagem, centrais hidropneumáticas ou bombas para transformadores entre as quais se destacam para o presente trabalho as bombas radiais centrífugas da gama TGCL [1]. Para além dos produtos standard, o principal foco da empresa é a criação de produtos em função das exigências do cliente, aumentando a flexibilidade na escolha do produto. Desta forma, o processo de maquinagem ganha especial importância na margem de lucro empresarial.

Assim, o trabalho realizado centra-se no estudo dos diversos processos de maquinagem e dos seus parâmetros e no desenvolvimento de novos equipamentos, com o intuito de otimizar a produção e aumentar a qualidade das peças obtidas.

1.3 Objetivos do projeto

Esta dissertação tem como principal objetivo o estudo da utilização do centro de maquinagem (CM), da marca *Akira-Seiki*, recentemente adquirido pela empresa EFAFLU, com vista a identificar possibilidades de melhoria na realização das operações de maquinagem de componentes de bombas centrífugas.

A utilização do CM envolve necessariamente múltiplos aspetos a analisar desde a gama de peças a maquinar aos sistemas envolvidos na preparação da máquina para realizar as operações de maquinagem, incluindo tarefas de “*setup*” (ex. montagem das peças e elaboração dos programas CN).

Desta forma, com base no objetivo global deste trabalho estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as operações de maquinagem e procedimentos de *setup* dos principais componentes maquinados na máquina CNC com vista a: caraterizar a gama de produtos da empresa, o tipo de operações de maquinagem, as ferramentas utilizadas, os sistemas de fixação, os tempos de maquinagem e de *setup* (incluindo a elaboração dos programas de maquinagem);
- Identificar as capacidades e funcionalidades atualmente disponíveis da máquina CNC;
- Identificar e propor novos meios e procedimentos para fixação dos componentes na máquina;
- Análise crítica dos parâmetros de corte e ferramentas atualmente utilizadas e identificar possíveis alternativas;
- Analisar a elaboração dos programas CN e avaliar métodos alternativos aos atualmente utilizados;
- Avaliar a incorporação de um quarto eixo na máquina;
- Analisar e propor um modelo para a informação a incluir nas fichas de maquinagem.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação divide-se em 5 capítulos, nos quais se inclui este capítulo de introdução, enumerados e sumariados em seguida.

O segundo capítulo faz uma análise geral das fases de produção de bombas centrífugas, centrada nas operações de maquinagem e nas caraterísticas dos centros de maquinagem CNC atuais.

O terceiro capítulo é dedicado à revisão dos processos atuais incluindo a descrição do modo de operação atual da máquina utilizada na empresa. Assim, são descritos todos os processos observados, bem como os principais produtos fabricados no centro de maquinagem. O objetivo é analisar os procedimentos, meios e equipamentos utilizados com vista a identificar problemas e possíveis oportunidades de melhoria.

Relativamente ao quarto capítulo, desenvolvem-se propostas de melhoria para a utilização do centro de maquinagem, nas três principais áreas de incidência desta dissertação: as

ferramentas utilizadas e respectivos parâmetros de corte, os modos de fixação das peças e a programação da máquina. Neste capítulo é ainda feita referência à utilização de um *software* CAM, particularmente ao *Mastercam*, de modo a ser possível comparar melhorias nos tempos de produção e simulação do quarto eixo da máquina. É também proposta a criação de uma ficha de maquinagem com o intuito de facilitar o trabalho dos operadores do centro de maquinagem e aumentar a produtividade do mesmo.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido ao longo da realização da dissertação, assim como os principais valores e conhecimentos adquiridos, e apresentadas propostas de trabalhos futuros.

2 Maquinagem de bombas centrífugas

De modo a uma melhor compreensão do processo atual de maquinagem é importante realizar uma análise sobre as etapas e intervenientes no fabrico de bombas. Neste sentido, será feita uma contextualização e identificação das diferentes fases de maquinagem de bombas centrífugas, analisando as potencialidades dos centros de maquinagem CNC face a máquinas-ferramenta convencionais.

2.1 Produção de bombas centrífugas

Entre os principais produtos fabricados na EFAFLU, podemos destacar os corpos das bombas e os corpos do motor (carcaças), que servem de alojamento e acoplamento do motor elétrico à bomba. A vasta gama de sistemas de bombagem permite uma enorme flexibilidade na escolha do cliente. Para além das gamas standard disponíveis em stock, existem produtos configuráveis pelo que os processos de produção, em constante mudança, tornam-se cada vez mais relevantes.

No âmbito deste projeto, destaca-se uma gama de produtos, as bombas radiais centrífugas da série TGCL. As bombas centrífugas são turbomáquinas usadas no transporte de líquidos, fornecendo um caudal a partir da energia cinética transferida para o fluido através do movimento de rotação do impulsor e sujeito às condições de pressão existentes na saída da bomba [2]. O impulsor (ou rotor) conectado ao veio da bomba é acionado por um motor, geralmente elétrico. Neste sentido destacam-se quatro componentes principais numa bomba radial centrífuga (Figura 2.1): o corpo da bomba, o veio de acionamento, o rotor ou impulsor e o motor elétrico.

A gama de bombas em estudo, bombas TGCL, são bombas radiais centrífugas desenvolvidas para a circulação de óleo. Estas bombas monobloco contêm o motor elétrico acoplado diretamente à bomba. A gama atualmente existente é composta por modelos com diâmetros nominais de 65 a 150 mm, projetados para níveis de caudal e pressão distintos. Existem assim diferentes tamanhos e dimensões consoante o tipo de aplicação e requisitos de funcionamento. As bombas TGCL incorporam motores de 4 e 6 polos com potências compreendidas entre os 0.75kW e os 7.5kW [1]. Estas bombas são utilizadas nos sistemas de refrigeração dos transformadores de potência e em permutadores de calor.

É importante referir que, apesar de se destacar neste estudo o modelo específico de bombas TGCL, o modo de fabrico é transversal à gama completa de bombas TGCL e, no caso dos corpos das bombas, também se aplicam aos modelos de bombas NNJ e CJG (bombas de água e bombas químicas da gama EFAFLU). Assim, apesar das dimensões serem diferentes entre as diversas bombas, a complexidade entre cada peça é semelhante e por esse motivo o processo de fabrico é semelhante entre bombas. Também as peças principais como o impulsor e veio de acionamento, são fabricados de uma forma semelhante para as restantes gamas de produtos.

A bomba TGCL encontra-se representada na Figura 2.1 com os componentes principais para o presente trabalho assinalados.

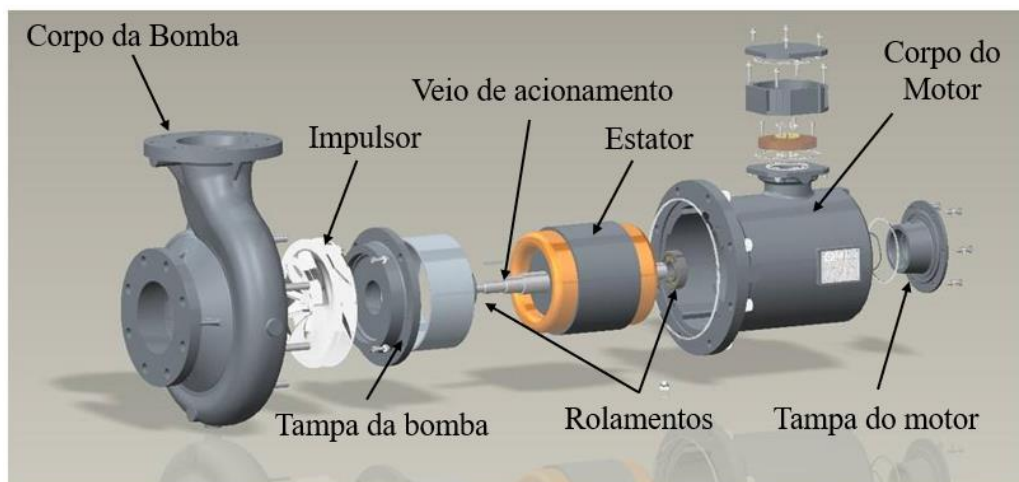


Figura 2.1 Bomba Radial Centrífuga TGCL.

As fases iniciais na conceção de uma bomba são realizadas por engenheiros qualificados que desenvolvem, com a ajuda de *softwares* CAD, o projeto da peça final e o molde usado na fundição. O fabrico do molde é realizado na EFAFLU e posteriormente enviado para empresas de fundição. Os restantes processos nos quais se incluem a maquinagem, controlo dimensional, rebarbagem, pintura, montagem final e ensaios da bomba também são realizados na EFAFLU, que garante que todos os produtos estão de acordo com as especificações do cliente. A Figura 2.2 destaca as diferentes operações de fabrico de uma bomba.

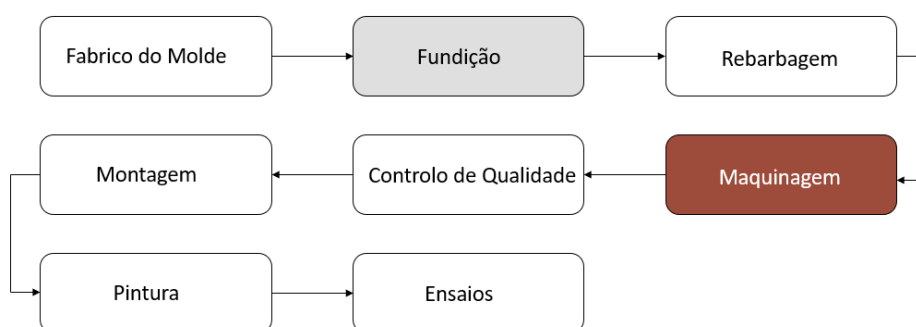


Figura 2.2 Etapas de produção de uma bomba.

Entre as diversas etapas de fabrico destacam-se para esta dissertação as operações de maquinagem. Através do Anexo A.1, verifica-se que no corpo da bomba é realizada a maquinagem em três faces principais, como é o caso da flange de aspiração, onde o fluido entra na bomba, o interior da bomba, onde se vai alojar o impulsor que transmite energia ao fluido por rotação, e por último a flange de descarga, local por onde o fluido é expulso da bomba. Para além destas operações é ainda necessário realizar duas furações na parte lateral do corpo da bomba, responsáveis pela drenagem do fluido. A posição dos drenos pode variar em função da posição de montagem da bomba, sendo este parâmetro definido pelo cliente em cada encomenda. Existem, assim, três possibilidades de locais definidos para os drenos: na parte inferior do corpo da bomba ou nas suas laterais.

Relativamente ao corpo do motor, ou carcaça, também se destacam três faces principais a maquinar, entre elas, o encaixe para a tampa do motor, o encaixe para a tampa da bomba e a caixa de terminais do motor (Anexo A.2). As operações de maquinagem deste tipo de peças são distribuídas por duas máquinas que operam de modo diferente.

Como se verifica, a geometria associada às duas peças é complexa. No entanto, a maquinagem associada a cada uma delas pode considerar-se essencialmente 2D, seguindo uma sequência de maquinagem na qual se realçam operações de facejamento, fresagem de contornos, furações e acabamento. Esta sequência é executada em todos os corpos de bombas radiais, sejam estas bombas de água, químicas ou industriais, devido à semelhança de geometria dos modelos. A grande dificuldade na maquinagem destes componentes passa por encontrar um método expedito de fixação devido à sua geometria particular.

Relativamente ao tempo de maquinagem de cada produto, a EFAFLU não apresenta dados concisos sobre a realização completa de uma bomba. Para além do tempo associado ao trabalho da máquina CNC, estes valores dependem das operações de *setup* executadas pelo operador da máquina. Assim, uma percentagem relevante do tempo de fabrico irá depender da complexidade da fixação bem como das qualidades técnicas do operador. Uma série de 10 bombas pode demorar até 3 dias a ser concluída.

O material mais comum para as peças fundidas maquinadas na EFAFLU, é o ferro fundido. Tanto o corpo do motor como o corpo da bomba e impulsor são fabricados neste material, podendo alternar entre o ferro fundido cinzento EN-GJL-250 e o ferro fundido nodular EN-GJS-400-15. Porém, em situações específicas, em função do líquido com que vão trabalhar e do meio em que se inserem, podem ser produzidas bombas em bronze. Para cada um destes materiais, os parâmetros de maquinagem podem variar, pelo que é necessário um ajuste adequado de acordo com a ferramenta utilizada e acabamento pretendido.

2.2 Maquinabilidade dos materiais

O tipo de material utilizado tem uma enorme influência sobre o sucesso das operações de maquinagem uma vez que determina a facilidade em ser maquinado, maquinabilidade, utilizando ferramentas e parâmetros de corte apropriados[3]. Existem diversos critérios para avaliar a maquinabilidade de um material sendo os mais importantes o tempo de vida da ferramenta, os esforços de corte, o acabamento da superfície e a facilidade de remoção da apara (controlo da apara). Estes fatores de maquinabilidade não dependem apenas do material a maquinar, mas também da ferramenta utilizada, o tipo de operação de maquinagem, sistema de fixação, entre outros. Todos estes fatores contribuem para uma dificuldade na avaliação da maquinabilidade dos diferentes materiais.

A maquinabilidade pode ser expressa por meio de um valor numérico comparativo, designado por índice de maquinabilidade (IM), que compara o parâmetro de maquinabilidade do material em análise com o de um material de referência. Este ajuda a avaliar a facilidade de trabalho dos materiais para uma determinada operação de maquinagem [4]. A cada material corresponde um IM em relação a um valor padrão (boa maquinabilidade), ao qual se atribui um índice de 100%. Para melhor quantificar a maquinabilidade dos materiais existem tabelas de maquinabilidade nas quais são apresentados os valores dos índices de maquinabilidade para os diferentes materiais e os respetivos parâmetros de corte. Um exemplo destas tabelas encontra-se na Figura 2.3, referindo para os diferentes materiais, o índice de maquinabilidade em função da sua dureza.

Relativamente aos materiais utilizados para as bombas (ferros fundidos e bronze), tem especial influência na maquinagem a sua dureza, composição química e tratamento térmico a que poderá ter sido sujeito. É geralmente aceite que os materiais com valores de dureza entre 170 e 250 HB, nos quais se incluem o ferro fundido, têm uma boa maquinabilidade. Como é evidente, quanto maior for a dureza do material, maior será o desgaste abrasivo associado à ferramenta de corte e mais difícil se tornará a maquinagem [5]. A composição química, na qual se inclui a diversidade de elementos de liga disponíveis, ou o tratamento térmico associado, pode melhorar a maquinabilidade dos materiais.

Work Material	Brinell Hardness	Machinability Rating ^a
Tool steel (unhardened)	200–250	0.30
Cast iron		
Soft	60	0.70
Medium hardness	200	0.55
Hard	230	0.40
Super alloys		
Inconel	240–260	0.30
Inconel X	350–370	0.15
Waspalloy	250–280	0.12
Titanium		
Plain	160	0.30
Alloys	220–280	0.20
Aluminum		
2-S, 11-S, 17-S	Soft	5.00 ^c
Aluminum alloys (soft)	Soft	2.00 ^d
Aluminum alloys (hard)	Hard	1.25 ^d
Copper	Soft	0.60
Brass	Soft	2.00 ^d
Bronze	Soft	0.65 ^d

Figura 2.3 Índices de maquinabilidade em função de grupos de materiais e respectivas durezas [3].

O ferro fundido é uma liga de ferro e carbono (%C entre 2% e 4%) utilizado no processo de fundição. O silício também está presente nesta liga (em quantidades que variam entre 0.5 e 3%) tal como outros elementos de liga que podem ser adicionados por forma a obter as propriedades desejadas para o material [3]. Em função dos elementos de liga utilizados, podem existir diversas variantes de ferro fundido, dos quais se destacam para esta dissertação o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular. O ferro fundido cinzento é o mais utilizado atualmente e é especialmente selecionado para operações industriais devido ao seu baixo preço (menos 20-40% do preço do aço), boas características para fundição e excelente maquinabilidade [6].

O ferro fundido nodular, ou ferro fundido dúctil, é uma derivação do ferro fundido cinzento ao qual se adicionam, durante a fundição, pequenas quantidades de magnésio. As partículas de carbono (grafite) contêm uma geometria esferoidal o que faz com que este ferro fundido tenha características diferentes dos restantes. Comparativamente com o ferro fundido cinzento, este apresenta maior resistência mecânica e ductilidade, possuindo características mecânicas que o assemelham ao aço [7]. No entanto, não é tão utilizado devido ao seu preço superior. A maquinabilidade destes materiais comparativamente com o ferro fundido cinzento diminui ligeiramente, o que faz com que as velocidades e restantes parâmetros de maquinagem sejam inferiores. O ferro fundido nodular apenas é utilizado nas bombas da EFAFLU quando se pretende uma maior resistência mecânica, comparativamente com as bombas em ferro fundido cinzento.

Em condições ambientais específicas, também se utilizam produtos fabricados em bronze, liga de cobre e estanho (90% Cu e 10% Sn). Existem outras ligas adicionais de bronze com base nos diferentes elementos de ligas, aos quais se incluem os bronzes de alumínio ou os bronzes de silício [3]. A sua utilização na indústria deve-se ao facto de apresentarem uma excelente combinação de resistência mecânica, resistência à abrasão e corrosão. No entanto, a sua maquinabilidade irá variar de acordo com os elementos de liga adicionados, tratamentos térmicos e processos de fabricação. No entanto, avaliando o seu desempenho relativo, o índice de maquinabilidade do bronze é superior ao dos ferros fundidos cinzento e nodular. A sua dureza, inferior, permite concluir que os parâmetros de corte utilizados na maquinagem do bronze podem ter valores superiores ao dos ferros fundidos.

2.3 Maquinagem de bombas centrífugas e equipamentos CNC

A introdução dos sistemas de comando numérico nas máquinas-ferramenta permitiu uma evolução a vários níveis no processo de maquinagem de bombas e dos seus componentes. As operações necessárias para o fabrico da bomba eram distribuídas ao longo de um conjunto de máquinas-ferramenta convencionais, desempenhando cada máquina funções específicas de maquinagem até à finalização de todo o processo. Como seria espectável, todo o processo seria mais rentável e flexível se operações como a fresagem, furação ou torneamento pudessem ser agrupadas e realizadas numa só máquina devido à diminuição do número de operações de *setup*. Os sistemas de comando numérico computadorizado (CNC) permitiram não só uma maior autonomia no funcionamento da máquina como também a possibilidade de controlar simultaneamente vários eixos de movimento, controlar parâmetros de corte e troca automática de ferramentas, tornando possível o agrupamento de várias funções de maquinagem na mesma máquina.

Atualmente estão disponíveis diferentes tipos de máquinas-ferramenta CNC que vão desde centros de maquinagem de 3, 4, e 5 eixos até centros de maquinagem/torneamento que conjugam numa máquina as mesmas capacidades de maquinagem típicas dos processos de fresagem e torneamento. Estes sistemas possibilitam superar as limitações das máquinas convencionais ao viabilizarem a criação de peças com elevada complexidade, de uma forma rápida e com maior exatidão.

Destacam-se assim as vantagens na utilização de uma máquina CNC, face às máquinas-ferramenta convencionais:

- Aumento da produtividade da máquina, pela maior capacidade (potência) instalada;
- Redução dos tempos de produção, pela maior automatização do processo;
- Aumento da flexibilidade da produção, pela sua capacidade de reprogramação e maior número de operações de maquinagem possíveis;
- Maior controlo das condições operatórias de maquinagem;
- Aumento da repetibilidade e exatidão das peças finais;
- Maior segurança do operador;
- Facilidade no fabrico de peças com formas ou geometrias mais complexas.

Todas estas vantagens podem ser associadas à produção de bombas centrífugas em máquinas CNC. A velocidade de produção obtida permite prazos de entrega mais curtos, clientes satisfeitos, e maior disponibilidade dos equipamentos para realização de novas séries, potenciando a produtividade e consequentemente os lucros associados. Desta forma, a vantagem da aplicabilidade deste tipo de equipamentos passa a ser também possível para séries de produção menos numerosas, ou até mesmo para peças unitárias, de geometria complexa ou não, devendo sempre balancear-se o custo-benefício associado, uma vez que requerem maior investimento em equipamentos e pessoal qualificado.

O aumento da flexibilidade da produção está intrinsecamente relacionado com os modos de programação da tecnologia CNC, facilidade de mudar a peça a trabalhar e ferramentas usadas. Relativamente aos modos de programação destacam-se:

- Programação *online*: também referida como *Manual Data Input* (MDI). O utilizador tem contacto direto com a máquina-ferramenta, definindo as operações de maquinagem através de códigos normalizados (linguagem ISO ou códigos G&M), ou através de funcionalidades de programação interativas, gráficas, disponibilizadas pelo controlador da própria máquina.

- Programação *offline*: as operações de maquinagem podem ser realizadas e simuladas fora da máquina com recurso a *softwares* CAD/CAM genéricos que obrigam à utilização de programas de conversão (pós-processadores) para produzirem código compatível com as máquinas utilizadas. Com recurso a um computador, podem ainda usar-se simuladores dos controladores (CNC) disponibilizados pelos fabricantes das máquinas CNC, que permitem criar um código já compatível com a máquina usada. Os *softwares* utilizados para a programação *offline* permitem analisar e simular graficamente todo o processo de maquinagem e detetar possíveis erros de colisões, qualidade de acabamento, quantidades de material retirado em excesso ou sobresspessuras, e ainda tempos de maquinagem. O código gerado na programação *offline* pode ser posteriormente descarregado diretamente para a máquina CNC.

No caso da maquinagem dos componentes de bombas centrífugas, apesar de recorrer a operações tipicamente 2D, são realizadas com vantagem em máquinas CNC. Uma vantagem destas máquinas em relação às máquinas convencionais, consiste na utilização de mais do que três eixos de movimento, ou sistemas de movimentos de reposicionamento auxiliares, para permitir num mesmo *setup* maquinar faces ou superfícies em diferentes planos de trabalho/corte. Permitem ainda tirar partido de um maior número de ferramentas disponíveis e facilmente utilizáveis através do sistema de armazenamento e troca de ferramentas automática. A utilização de sistemas de controlo adaptativo para maquinagem, em que os parâmetros de corte são automaticamente ajustados em tempo real, podem também revelar-se interessantes na maquinagem de peças resultantes de um processo de fundição, uma vez que nestas existe um menor controlo das sobresspessuras e dimensões iniciais das peças. Como exemplo refere-se a tecnologia de monitorização e controlo adaptativo da OMATIVE [8] que fornecem sistemas de otimização que resultam em tempos de ciclo reduzidos, maior vida da ferramenta, qualidade de corte consistente, conservação de energia e proteção da máquina e das suas ferramentas. As vantagens das máquinas CNC podem ainda revelar-se interessantes na construção dos moldes para fundição ou ainda na construção de protótipos de bombas, aquando de uma fase de conceção e projeto. A maior dificuldade resulta das formas dos componentes das bombas uma vez que podem limitar o desenvolvimento de soluções automatizadas para a sua transferência e fixação na mesa da máquina.

Contudo, as máquinas CNC, apresentam algumas desvantagens, nomeadamente ao nível do investimento inicial na aquisição do equipamento (máquina, sistemas auxiliares e funcionalidades opcionais), *software* para programação em *offline*, necessidade de técnicos especializados e manutenção da máquina mais exigente.

A designação de centro de maquinagem (CM) é utilizada para caracterizar a evolução das máquinas-ferramenta designadas por fresadoras, ou seja, para realizar operações de fresagem em peças tipicamente de secção prismática e em que o movimento principal de corte (árvore ou *spindle*) é atribuído à ferramenta. São máquinas no mínimo com 3 eixos lineares (avanço ou *feed axis*) para permitir o posicionamento da peça relativamente à ferramenta no espaço de trabalho. A implementação dos eixos (X, Y, Z) na estrutura da máquina pode variar em função do peso das peças a trabalhar e orientação do eixo principal (Z). Distinguem-se CM verticais e horizontais em que o eixo Z é perpendicular ou paralelo ao plano da mesa, respetivamente. Os movimentos lineares de avanço podem estar na mesa ou na coluna que suporta a árvore. Incorporando eixos de movimento adicionais é possível ter CM de 4, 5 e mais eixos, o que permite aumentar a produtividade da máquina, pelo acesso a mais faces de maquinagem no mesmo *setup* e/ou realizar múltiplos percursos de corte simultaneamente. Permite ainda manter (5 eixos) a orientação da ferramenta perpendicular ao plano de corte na maquinagem de superfícies de formas complexas. A comparação de um CM com uma fresadora CNC permite ainda identificar capacidades adicionais nomeadamente no tipo de operações de maquinagem

(ex. mandrilagem, furação, roscagem), na existência de um armazém de ferramentas com sistema automático (ATC) de mudança de ferramenta para a árvore da máquina e frequentemente na capacidade de mudança de peça a trabalhar através de mesas para montagem da peça intermutáveis, manual ou automaticamente.

A análise e caracterização dos CM, para além da especificidade de estrutura, sistemas de eixos de movimento e sistemas auxiliares, está naturalmente associada às capacidades do sistema de comando e controlo da máquina, normalmente designado por CNC e comum a outras máquinas-ferramenta ou de outro tipo. Atualmente a solução mais frequente é os fornecedores de sistemas CNC não serem os fabricantes da máquina-ferramenta, sendo comum existirem diferentes máquinas com o mesmo CNC e uma mesma máquina poder ser encomendada com controladores CNC de diferentes fabricantes. Em termos de características gerais podem identificar-se três elementos principais num CNC [9]: o elemento responsável pelo controlo dos eixos de movimento da máquina (*NCK, numerical control kernel*); um sistema responsável pelo controlo global da máquina, incluindo sistemas auxiliares, de segurança e monitorização, com as funcionalidades de controlo sequencial típicas de um autómato programável (*PLC Programmable Logic Control*); e um sistema para interação da máquina com o utilizador que permita a sua configuração, programação, monitorização, comando da máquina e integração com outros sistemas (*MMI- Man Machine Interface*). Em termos da implementação em *hardware* e *software* das funcionalidades associadas a estes três componentes, a sua evolução é contínua seguindo o progresso dos sistemas computadorizados, sendo comum, hoje em dia, a maior parte das funcionalidades ser implementada em *software* e basear-se o *hardware* numa arquitetura de PC.

Para além dos controladores CNC, são ainda importantes na implementação das máquinas os elementos de acionamento dos eixos de movimento, incluindo sistemas de transmissão, servomotores e transdutores para medição de várias grandezas em particular posição, velocidade e aceleração, direta ou indiretamente no movimento final [10]. Os servomotores, tipicamente síncronos para os eixos de movimento (*feed*) e assíncronos para a árvore (*spindle*), são controlados por *drives* que atualmente permitem não só o controlo de corrente e velocidade, mas também de posição e ainda a implementação de perfis de velocidade com limitação da variação da aceleração (*jerk*). Uma representação destes elementos associados ao controlo de um eixo de movimento encontra-se representado na Figura 2.4.

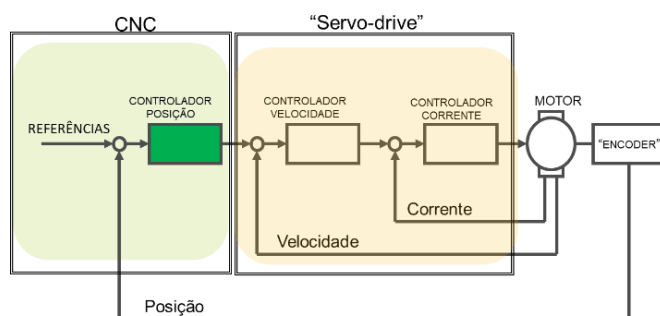


Figura 2.4 Configuração do sistema de controlo de um CM em anel fechado.

A elaboração dos programas de maquinagem é uma fase determinante na utilização da máquina sendo importante avaliar as alternativas que o CNC permite para elaborar programas CN na própria máquina (*online*) ou fora da máquina (*offline*). Em geral todas as máquinas permitem a programação numa linguagem normalizada (ISO6983), numa linguagem interativa específica de cada máquina no próprio controlador (CNC) ou através de um programa que simula o controlador CNC num PC, ou ainda através de linguagens gráficas genéricas

(CAD/CAM) com necessidade de conversão para a linguagem específica da máquina, através de programas de conversão específicos (pós-processadores).

A troca de dados entre o computador e os restantes equipamentos CNC pode ser feita de diferentes modos, seja via rede de comunicação (ex. Ethernet), USB, cartão SD, porta RS-232, ou nos casos mais recentes por redes sem fios (ex. WIFI, Bluetooth) [11].

A constante evolução associada aos centros de maquinagem permite obter soluções cada vez mais automatizadas, com uma exatidão do produto cada vez maior e no menor tempo possível. A combinação de diferentes tecnologias de maquinagem numa mesma máquina é uma das tendências que definem a produção moderna bem como um elevado grau de automatização. Deste modo, os desenvolvimentos mais recentes nos centros de maquinagem dizem respeito a soluções integradas de maquinagem e torneamento atualmente disponíveis em vários fabricantes (ex: centros de torneamento e fresagem da DMG MORI [12]). Como exemplo de sistemas auxiliares para manipulação e transferência de peças podem-se incluir soluções robotizadas que permitem reduzir os tempos de *setup* e troca entre peças, podendo ser também aplicados em processos de maquinagem. Estas soluções podem ser incorporadas ao centro de maquinagem e monitorizadas diretamente no controlador da máquina. Como referência destacam-se soluções robotizadas da DMG MORI, o Robot2go [13]. Relativamente à interface com o utilizador, os controladores CNC para além dos comandos convencionais através de botoneiras e ecrãs táteis, é de registar a possibilidade de comando de voz publicitada mais recentemente nas máquinas CNC da Makino com o sistema ATHENA [14]. No rol de melhorias aplicadas aos centros de maquinagem CNC podem ainda incluir-se sistemas de controlo adaptativo para maquinagem, que permitem um ajuste automático, em tempo real, dos parâmetros de maquinagem em função das condições de maquinagem [15].

Centro de maquinagem AKIRA-SEIKI Performa Classic V6 XP

No caso em estudo nesta dissertação, será analisado o centro de maquinagem vertical de 3 eixos da marca *Akira-Seiki*. O modelo utilizado é o *Performa Classic V6 XP*, incluído na gama de alta produtividade e boa relação preço/qualidade disponibilizada pela marca [16]. A mesa desloca-se segundo os eixos XY e o movimento Z está implementado na coluna de suporte da árvore porta-ferramenta (*spindle*). Apesar de ser um centro de maquinagem com 3 eixos de movimento, o controlador integra já a possibilidade de se adicionar um 4º eixo de movimento para permitir a rotação da peça. O quarto eixo era uma opção que não foi selecionada inicialmente, mas que se coloca como objetivo deste trabalho avaliar do seu interesse para os produtos da empresa. Na Figura 2.5 observa-se o centro de maquinagem em estudo.



Figura 2.5 Centro de maquinagem Akira-Seiki Performa Classic V6 XP.

Algumas características referentes ao centro de maquinagem encontram-se na Tabela 2.1, entre as quais se destacam as velocidades máximas dos eixos e do *spindle*, as dimensões da mesa de trabalho e a carga máxima que a mesa consegue suportar. As peças incluídas na capacidade da máquina podem ser maquinadas ao longo de toda a mesa de trabalho (1750x800 mm) com um peso máximo de 2300kg.

Tabela 2.1 Características gerais do centro de maquinagem Akira Seiki-Performa Classic V6 XP.

Características	Valor	Unidades
Curso máximo X	1630	[mm]
Curso máximo Y	850	[mm]
Curso máximo Z	815	[mm]
Carga máxima	2300	[kg]
Velocidade máxima do spindle	8000	[rpm]
Potência do spindle	26.5	[kW]
Dimensões da mesa	1750 x 800	[mm ²]
Velocidade máxima de avanço em X, Y	33	[m/min]
Velocidade máxima de avanço em Z	24	[m/min]

Relativamente aos sistemas de transmissão e guiamento de movimento dos eixos de avanço, o centro de maquinagem utiliza soluções de fuso e porca de esferas e guias lineares por patim de esferas. O acionamento é obtido por servomotores *brushless* AC com *drives* da Mitsubishi. No caso do motor de acionamento da árvore (*spindle*) é usado um motor para árvore da Mitsubishi (modelo SJ-V22-01ZT-S01) que permite uma potência máxima de 26,4 kW e uma rotação máxima de 8000 rpm, controlado por *drive* também da Mitsubishi (MDS-D2-SP-320).

Verifica-se a existência de um armazém de ferramentas do tipo “carrossel”, comuns em centros de maquinagem e permite a mudança rápida (2.2 segundos [16]) de ferramentas entre o *spindle* e o carrossel de modo a que sejam reduzidos os tempos de produção face aos tempos

de maquinagem [17]. No CM em estudo, o carrossel circular tem capacidade para 36 ferramentas. A transferência de ferramentas entre o carrossel e o *spindle* utiliza um braço rotativo que simultaneamente permite de um lado remover a ferramenta do *spindle*, e do outro lado carregar uma nova ferramenta, sem intervenção do operador, como se observa na Figura 2.6. A rotação do carrossel pode ocorrer durante a maquinagem de uma peça, de modo a que a nova ferramenta se encontre na posição de transferência no momento anterior à troca, reduzindo o tempo na seleção da ferramenta de corte.



Figura 2.6 Sistema de mudança de ferramentas Akira-Seiki.

A determinação do referencial associado à peça (zero peça) é necessária para atualizar a informação em cada programa a ser executado. A máquina Akira-Seiki está equipada com uma sonda de contacto, também chamada de apalpador que permite facilmente identificar esse ponto usando a capacidade de movimentação dos eixos da máquina e um “contacto elétrico” com uma sensibilidade elevada [18]. Este dispositivo, é montado da mesma forma que uma ferramenta no *spindle* encontrando-se armazenado no carrossel de ferramentas. O aparelho utilizado é o modelo OMP60 da marca Renishaw (Figura 2.7). Para que a medição seja realizada, a esfera localizada na extremidade da sonda precisa de tocar na superfície da peça, entre dois ou mais pontos definidos na programação. Após o contacto, a sonda envia um sinal binário para o controlador que é usado para a leitura das posições X, Y e Z da máquina [19].

A sonda é, assim, uma mais valia para os operadores de centros de maquinagem permitindo um fácil acesso e medição em áreas difíceis de atingir. Permite ainda reduzir o tempo de preparação das peças ao mesmo tempo que aumenta a exatidão e qualidade de todo o processo, reduzindo erros de maquinagem. Em séries elevadas a utilização deste instrumento consegue destacar-se pela sua capacidade de automatização, permitindo reduzir ao máximo a intervenção do operador.

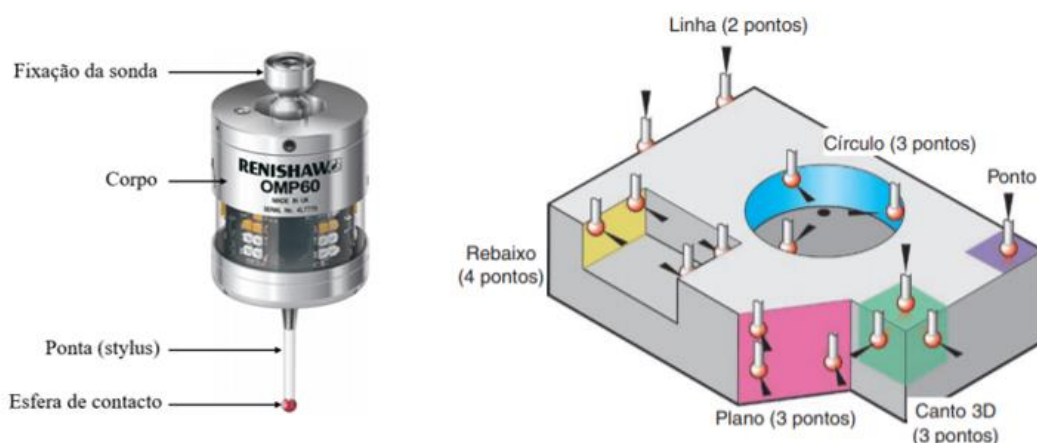


Figura 2.7 Sonda OMP60 Renishaw e as suas operações [18].

Tal como o programa precisa de conhecer a localização da peça no ambiente de trabalho, também é necessário conhecer as dimensões das ferramentas utilizadas, de modo a que se possa fazer de forma automática a compensação destas dimensões no percurso de maquinagem. Em geral, estas dimensões são estabelecidas em relação à origem de um referencial de ferramenta (“zero ferramenta”) de modo permitir a compensação automática da ferramenta identificada no programa CN. As dimensões da ferramenta a compensar (por exemplo o diâmetro e comprimento da fresa), são registadas em tabelas de parâmetros no CNC, podendo ser medidas aquando da montagem da ferramenta fora da máquina (medição externa) ou diretamente na máquina (medição interna).

A Renishaw disponibiliza também um sistema OTS (*Optical Tool Setter*) que se define como um sistema de medição de ferramentas interno, por contacto, permitindo medir tanto o diâmetro da ferramenta como o seu comprimento, conseguindo ainda detetar se a ferramenta está quebrada. A elevada rigidez deste instrumento de medição faz com que seja capaz de resistir a choques, falso toque ou interferência ótica.

Na troca de informações entre a sonda, sistemas de medição de ferramentas e o controlador é utilizada a tecnologia de transmissão ótica da Renishaw que permite enviar sinais codificados para o controlador. Com este sistema a flexibilidade é ainda maior, devido à ausência de condutores elétricos entre a sonda e o recetor, mantendo a precisão de medição a que está sujeito.

Para além dos sistemas vistos anteriormente, a máquina conta ainda com aparelhos que auxiliam a fixação e elevação das peças a maquinar. A mesa da máquina contém 6 ranhuras em T para inclusão de T's de fixação e pernos com um diâmetro máximo de 16 mm, auxiliando a fixação através de métodos tradicionais como grampos, calços, prensas, buchas ou gabaris.

Acoplado à mesa encontra-se uma bucha pneumática de três grampos que se incluiu sobre a mesa da máquina, da empresa FORKARDT [20]. Como o tipo de energia utilizado para a máquina é essencialmente mecânico e elétrico, não utilizando modos de acionamento hidráulico nem pneumático, a bucha encontra-se conectada à rede pneumática da fábrica permitindo trabalhar com pressões máximas de 8 bar.

Por outro lado, os corpos maquinados na máquina apresentam elevadas dimensões e massas, pelo que, para a sua elevação, foi instalado um guindaste ao qual se acoplou um motor elétrico capaz de suportar as peças a maquinar (Figura 2.8).

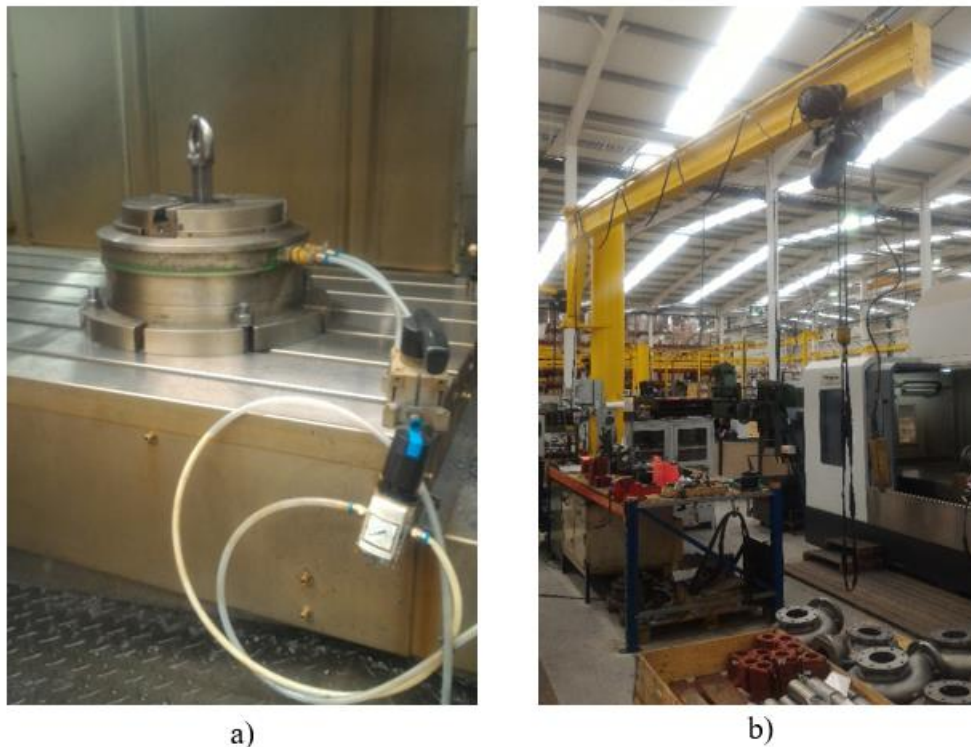


Figura 2.8 Sistemas auxiliares de maquinagem: a) Bucha pneumática; b) Guindaste.

O controlador da máquina *Akira-Seiki* é um controlador da marca Mitsubishi pertencente à série M70V também designado por “Navi Mill Mi745”. A linguagem deste controlador é específica do controlador Navi Mill permitindo criar um programa CNC na linguagem de código ISO/EIA (códigos G&M) de forma interativa com o utilizador através de informações introduzidas no monitor. Deste modo o operador define o tipo de operação de maquinagem a realizar através de ciclos disponibilizados na interface de programação do controlador. O operador apenas terá que escolher qual o tipo de operação a realizar (contorno, facejamento, furação, caixa ou códigos G&M) e inserir os dados pedidos para cada processo. O controlador gera automaticamente o código do programa no formato utilizado na máquina, procedendo ao seu armazenamento e posterior utilização. Um exemplo completo do programa e código gerado pela máquina encontra-se no Anexo B.1. Os principais códigos G utilizados pela máquina também se encontram-se no anexo B.2.

Para uma correta programação é necessário inserir todos os dados das ferramentas a utilizar, o tipo de material da peça de trabalho e os parâmetros de corte na maquinagem. Estes dados ficam gravados para as próximas operações numa tabela de dados e as velocidades de avanço e rotação do *spindle* podem ser alteradas sem que se alterem os parâmetros das ferramentas. Podem ser gravados um total de 200 ferramentas e 8 materiais diferentes na memória principal do CNC ou na memória de Macros não disponível para o utilizador. Para a partilha de dados com outras máquinas CNC ou computadores está disponível no controlador um cartão *compact flash* e uma porta USB. Existe também a possibilidade de comunicação via Ethernet, no entanto, ainda não se encontra configurada.

O controlador disponibiliza ainda, como é comum nas máquinas CNC, um conjunto de comandos através de botões que torna possível o movimento manual de cada eixo da máquina. Durante a fase de preparação de trabalho, este conjunto de botões é bastante utilizado podendo o avanço ser selecionado num modo contínuo (*Continuous JOG*), modo incremental

(*Incremental JOG*) ou pode mesmo controlar manualmente os eixos com recurso ao volante eletrónico (*HANDWHEEL*) usado em operações de maior rigor, como é o caso do uso da sonda). Durante as operações de maquinagem, o operador poderá reduzir ou aumentar a velocidade durante o processo através do interruptor rotativo disponível. Um exemplo dos comandos principais do controlador é representado na Figura 2.9.

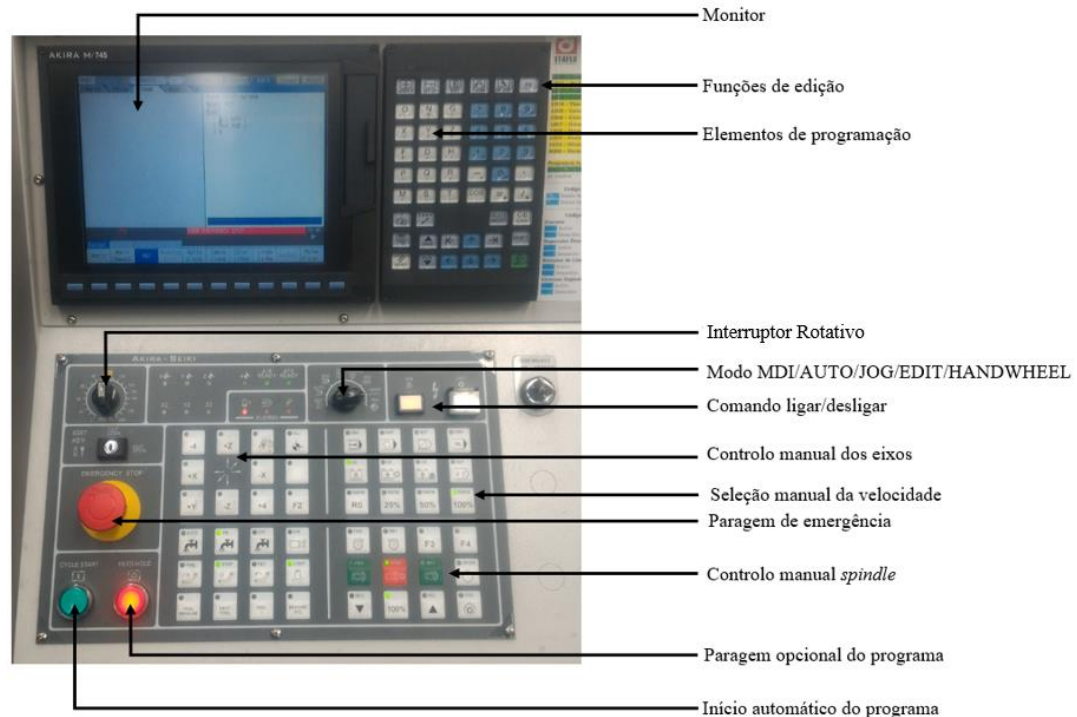


Figura 2.9 Comandos principais do controlador Mitsubishi Mi745.

Recorrendo aos elementos de programação disponíveis no controlador, o operador poderá realizar uma programação direta no controlador através das funcionalidades de programação interativas e gráficas (programação *online*). Atualmente este é o único meio de programação que está a ser utilizado na empresa. A máquina permite ainda outros métodos de programação *offline* como é o caso do uso de *softwares* CAD/CAM ou um programa de simulação para a criação do programa de CN num computador, o programa *NAVI MILL-Magicpro* da Mitsubishi. Este programa permitiria importar e modificar os ficheiros das ferramentas de corte a elas associadas, permitindo um melhor controlo sobre as condições de corte mais adequadas a cada situação. A interface de utilização deste programa é semelhante ao display do controlador, permitindo verificar o trajeto percorrido pela ferramenta para um controlo do programa utilizado. No entanto, este programa apenas permitiria simular operações para um centro de maquinagem vertical de 3 eixos não permitindo simular o quarto eixo admissível para a máquina. Os dados gerados e modificados pelo simulador poderiam ser incluídos na máquina CNC com recurso a um cartão *compact flash*, memória USB. Este simulador não está disponível gratuitamente no mercado nem foi possível obter um orçamento para a sua aquisição.

3 Análise do processo de maquinagem atual

Através da troca de informação com o operador do centro de maquinagem e de uma análise detalhada dos componentes associados ao fabrico de bombas centrífugas foi possível identificar as áreas mais relevantes na realização do trabalho e oportunidades para promover a melhoria da eficiência na utilização do centro de maquinagem. Este capítulo aborda, assim, os procedimentos utilizados no fabrico dos produtos da empresa e os problemas encontrados em cada etapa. Para isso analisou-se a maquinagem de bombas em três vertentes distintas, isto é, os métodos e dispositivos de fixação das peças a maquinar, as ferramentas de corte e a elaboração de programas (CN) de maquinagem efetuada no controlador.

Durante o estudo do centro de maquinagem foram analisados os métodos de fixação de alguns produtos considerados ilustrativos da gama de peças das bombas produzidas pela EFAFLU, aspirando ao seu melhoramento e à redução dos tempos globais do processo, nomeadamente: corpos de bombas TGCL e carcaças de motor de bombas TGCL.

3.1 Métodos de fixação e operações realizadas

Em geral as peças a maquinar conjugam vários aspetos que tornam o processo de fixação complexo e demorado: formas geométricas, dimensões e massas, difíceis de manipular e fixar em bases convencionais ou normalizadas; diferentes planos de maquinagem na mesma peça; variações das dimensões nas peças resultantes dos processos de fundição, que dificultam a identificação expedita e rigorosa da posição de cada peça na mesa de trabalho (referencial peça, ou *zero peça*). É por estes motivos que se torna difícil iniciar a maquinagem, pois não existe uma referência exata que garanta o correto posicionamento da peça de fundição na mesa de trabalho. Muitas vezes é necessário recorrer a métodos de fixação e estratégias de maquinagem complexos para fabricar a peça. Este período de fixação é um dos mais importantes no centro de maquinagem exigindo um grande dispêndio de tempo para obtenção de resultados fidedignos. Uma má fixação poderá comprometer todo o processo, podendo mesmo aumentar o risco de acidentes na máquina e resultar em peças fora das tolerâncias especificadas.

Em cada peça foram analisadas diferentes fases de maquinagem. Uma fase (ou etapa) corresponde a todo o conjunto de operações de maquinagem que ocorrem na peça para uma mesma fixação. Sempre que há uma mudança de fixação da peça ou mudança de máquinas de trabalho é considerada uma nova fase. No conjunto das duas peças, em cada fase, são verificadas diferentes operações de maquinagem que envolvem: facejamento em desbaste e acabamento; realização de contornos em desbaste e acabamento; furações incrementais em profundidade e furações diretas; escareamento e chanfragem; e roscagem. Para uma melhor compreensão das sequências de fixação das duas peças e das operações de maquinagem realizadas em cada fase disponibilizou-se no Anexo A mais detalhes.

3.1.1 Corpo da Bomba TGCL 100-200 100L

Entre todos os constituintes de uma bomba, o corpo é o elemento que apresenta maior complexidade geométrica (Figura 3.1). Por esse motivo, a maquinagem do corpo de uma bomba é feita em quatro fases, o que implica quatro modos diferentes de fixação: fase 1, maquinagem da flange de aspiração; fase 2, maquinagem do interior da bomba; fase 3, maquinagem da flange de descarga; fase 4, furações dos drenos.

Apesar de serem analisados os corpos das bombas TGCL, a geometria do corpo de uma bomba é semelhante na maioria das bombas maquinadas na empresa, isto é, as bombas de água (gama NNJ) e bombas químicas (gamas CJG), pelo que os processos de maquinagem associados são semelhantes. Considerando o total aproximado de modelos que compõem as gamas de bombas NNJ, CJG e TGCL, podem vir a ser produzidos no centro de maquinagem

um total de 88 corpos de bombas diferentes, com quatro fases de maquinagem cada um, o que corresponde à criação de 352 programas de maquinagem a serem introduzidos e guardados diretamente no controlador da máquina. Adicionalmente, é também maquinada no centro de maquinagem a gama de bombas axiais para transformadores, NTG, composta por 4 corpos distintos com 4 fases cada (+16 programas introduzidos). Os programas associados a cada fase de maquinagem podem ser extensos dependendo do número de operações de maquinagem (máximo 17 operações no interior do corpo da bomba). Um exemplo ilustrativo dos programas de maquinagem encontra-se no Anexo B para a flange de aspiração.

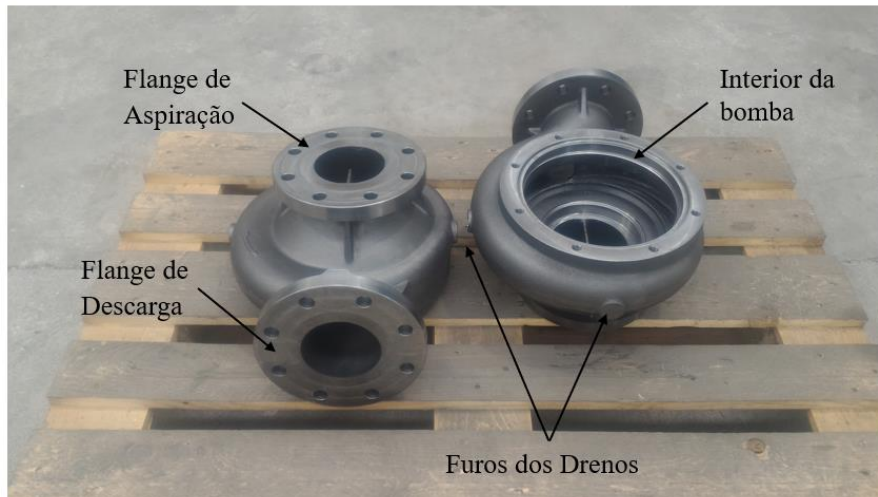


Figura 3.1 Partes a maquinar no corpo da bomba – TGCL100-200 100L.

No caso do corpo da bomba TGCL, os diâmetros nominais das flanges podem variar entre 185 a 285 mm com altura da bomba até 592 mm consoante o tipo de modelo utilizado. Também o peso do corpo da bomba poderá apresentar um máximo de 75 Kg no modelo de maiores dimensões, TGCL 150-250 132M. Nos desenhos do corpo da bomba TGCL 100-200 100L, apresentado no Anexo A, é possível verificar a perpendicularidade existente entre os eixos da flange de descarga e da flange de aspiração. Relativamente às tolerâncias de acabamento, apenas se verifica um maior rigor no interior do corpo da bomba devido ao ajustamento com o impulsor e com a tampa da bomba, apresentando tolerâncias dimensionais H7. Para as restantes faces, que não apresentam tolerâncias no desenho, consideram-se desvios de acordo com a norma de toleranciamento geral, ISO 2768mK.

1ª Fase – Corpo da Bomba TGCL- Maquinagem da flange de aspiração

O procedimento estabelecido pela empresa determina que a etapa inicial é a maquinagem da flange de aspiração da bomba, utilizando como método de fixação uma bucha pneumática de 3 grampos e aperto dos grampos pelo interior da bomba, com força suficiente para que esta fique segura durante a fresagem.

De modo a garantir o correto posicionamento da bomba na bucha pneumática, o operador irá fixar na mesa um esquadro, também feito em ferro fundido, designado na Figura 3.2 por esquadro de referência.



Figura 3.2 Componentes de fixação na 1ª fase de maquinagem do corpo da bomba.

Este esquadro de referência não tem qualquer influência na fixação direta da peça, apenas serve para auxiliar o posicionamento do corpo da bomba, garantindo com que o eixo da flange de descarga fique alinhado com o eixo horizontal (X) da mesa (Figura 3.3).

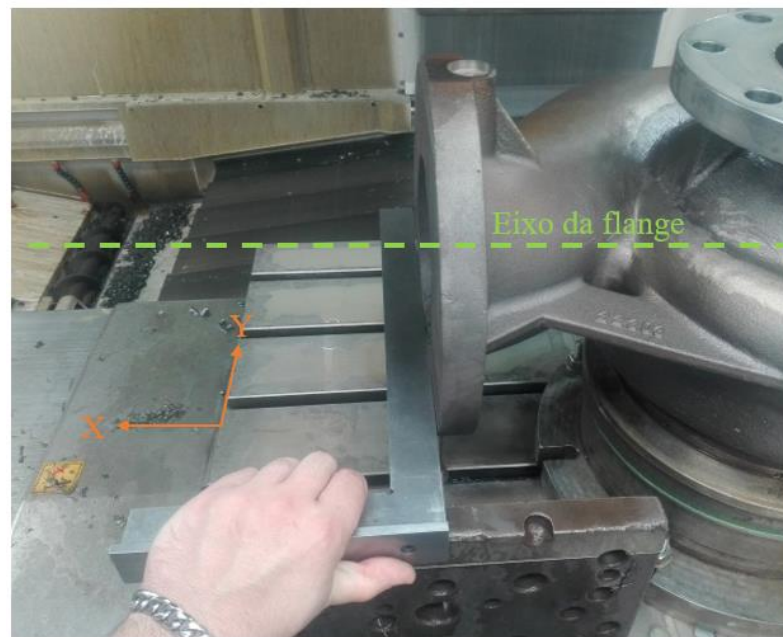


Figura 3.3 Alinhamento do eixo da flange de descarga com o eixo X da mesa.

Apesar do método de fixação utilizado garantir o fabrico correto da bomba, é de realçar que a bucha utilizada pode não ser a opção mais apropriada para o processo se pretendermos aumentar a capacidade de corte e consequente aumento das forças de fixação da peça. Este dispositivo, inicialmente aplicado a um torno convencional da empresa, foi adaptado à máquina CNC. A pressão máxima de utilização é a pressão disponibilizada pela rede da fábrica, ou seja, 8 bar. Caso a força exercida pela ferramenta seja superior à suportada pela bucha, a fixação fica comprometida e a bomba poderá ser projetada originando danos consideráveis para a máquina e ferramentas.

É de realçar que a bucha pneumática fica sempre posicionada na mesa da máquina num local definido pelo operador e apenas se remove daquele local em necessidade extrema. A posição do centro da bucha é obtida e inserida no controlador da máquina com a ajuda de uma

sonda *Renishaw OMP60* [18]. Esta posição fixa torna-se uma mais-valia na medida em que, sempre que se utiliza a bucha como método de fixação, não é necessário retirar o zero peça no início de cada maquinagem. O operador apenas tem que garantir o correto posicionamento da peça na bucha e selecionar o programa a maquinar.

O esquadro utilizado como referência, por sua vez, atrasa o processo de fixação, principalmente na montagem inicial. Como a mesa não apresenta elementos de fixação que garantam o posicionamento do esquadro, é necessário verificar o seu paralelismo relativamente ao eixo X da mesa através de um comparador e o consequente ajuste manual (Figura 3.4). A utilização do comparador permite um posicionamento exato do esquadro, mas torna o processo de fixação demorado pelo que pode acrescentar até 5 minutos ao tempo global de *setup*. Assim, apesar de ser um método eficaz para o ajuste da bomba, verifica-se que não é um método muito expedito.



Figura 3.4 Alinhamento do esquadro com um comparador.

2ª Fase – Corpo da Bomba TGCL- Maquinagem do interior da bomba

O segundo método de fixação está dependente dos percursos efetuados anteriormente. A flange de aspiração já maquinada, irá apoiar sobre a mesa e a flange de descarga é novamente utilizada como referência para garantir o paralelismo com o eixo horizontal (X) da mesa, de modo semelhante à primeira fixação. Para isto, é fixado sobre a mesa um bloco retificado onde irá encostar a flange de descarga da bomba (Figura 3.5) e posicionados 4 grampos de fixação manual que garantem a fixação da flange de aspiração à mesa (anexo A, figura A.3).

À semelhança do que acontecia com a primeira etapa de maquinagem, também neste método é necessário recorrer a um comparador para verificar o correto posicionamento do bloco no plano da mesa, aumentando o tempo de montagem inicial dos equipamentos. Por outro lado, observa-se uma demora na seleção e montagem dos grampos manuais, devido à necessidade de se incluir os T's de fixação nas ranhuras da mesa e devido a um número elevado de componentes que fazem parte do conjunto dos grampos: T's de fixação, pernos, castelos, parafusos e porcas.



Figura 3.5 Grampos manuais e bloco para encosto da flange da bomba.

3ª Fase – Corpo da Bomba TGCL – Maquinagem da flange de descarga

O terceiro método de fixação aplicado à bomba recorre novamente a um esquadro de ferro fundido, mas, com dimensões superiores ao esquadro utilizado na primeira fixação. Neste caso, o esquadro tem interferência direta na fixação e suporte da peça. Por último, é aplicada uma barra frontal que garante o encosto da bomba contra o esquadro e reduz as vibrações da peça durante a maquinagem, tal como se verifica na Figura 3.6.

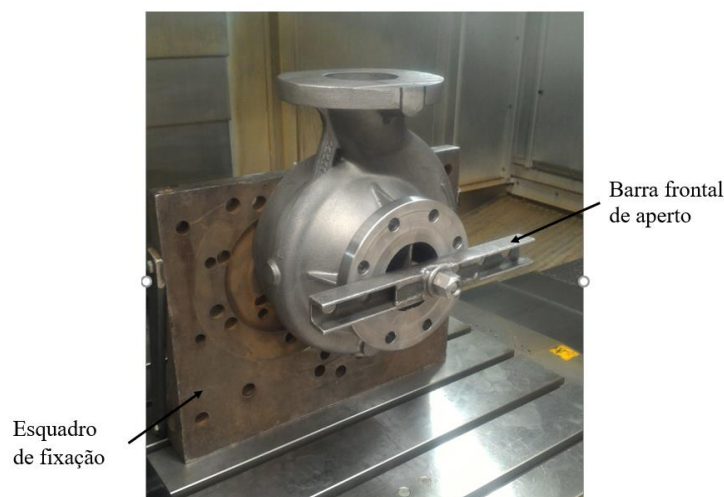


Figura 3.6 Componentes de fixação na 3ª fase de maquinagem do corpo da bomba.

Mais uma vez a verificação do alinhamento com o comparador é indispensável para o correto posicionamento do esquadro. Também é importante realçar que não existe no esquadro uma posição definida e identificada para a colocação da peça, pelo que no início de cada maquinagem, o zero peça é retirado recorrendo à sonda Renishaw, repetindo o processo para todas as peças. Isto ocorre pelo facto de o esquadro utilizado não apresentar furações de referência pelo que a peça é colocada quase aleatoriamente ao longo do esquadro.

4ª Fase – Corpo da Bomba TGCL – Maquinagem dos drenos

A última fase aplicada à bomba utiliza o mesmo modo de fixação que a fase anterior. No entanto, o operador necessita de realizar rotações na peça com ângulos de 90 graus para executar na parte lateral da bomba as furações referentes aos drenos da bomba. A rotação da peça fica assegurada pela inclusão de pinos retificados de diâmetro 18 mm nos furos da flange de aspiração (Anexo A, Figura A.8).

3.1.2 Carcaça da bomba TGCL 100L

Define-se como carcaça a peça que aloja o motor elétrico. A carcaça, também designada por corpo do motor, é conectada ao corpo da bomba no conjunto final. De acordo com a dimensão do motor existem na empresa quatro carcaças TGCL: TGCL 80M; TGCL 100L; TGCL 112M e TGCL 132M.

Comparativamente com o corpo da bomba, a carcaça apresenta profundidades muito superiores que podem ir até um máximo de 420 mm. Também os diâmetros internos da carcaça irão variar dependendo do modelo (110 a 288 mm), com um peso máximo de 80 kg na carcaça de maiores dimensões. Devido às elevadas profundidades de maquinagem e diâmetros elevados no seu interior, as operações de maquinagem deste tipo de peças são realizadas em duas máquinas disponíveis na empresa que operam de modos distintos. A primeira etapa é realizada no torno vertical convencional, sendo de seguida enviada para o centro de maquinagem em estudo. Esta divisão de tarefas entre máquinas ocorre por não existirem atualmente na empresa ferramentas de corte que permitam realizar a maquinagem do interior da carcaça, devido aos comprimentos elevados. Também o facto de a peça de trabalho ser uma peça oriunda do processo de fundição, com superfícies irregulares condiciona a sua correta fixação na máquina CNC. Deste modo, as operações de maquinagem ficam todas dependentes do processo inicial efetuado no torno vertical.

A maquinagem associada à carcaça (Figura 3.7) é feita recorrendo a 5 fases distintas (1 fase no torno vertical e 4 fases no centro de maquinagem):

- Fase 1, torneamento interior da bomba em desbaste e acabamento e facejamento do encaixe da tampa da bomba;
- Fase 2, maquinagem do encaixe para a tampa do motor;
- Fase 3, furações no encaixe da tampa da bomba;
- Fase 4, maquinagem da caixa de terminais do motor elétrico;
- Fase 5, furos dos drenos na parte lateral da bomba.

Tendo em consideração as 4 fases de maquinagem na máquina CNC e o número de carcaças diferentes existentes na empresa (apenas 4 carcaças), conclui-se que existe a necessidade de inserir no controlador da máquina 16 programas de maquinagem distintos, com extensões variadas, tendo o programa de maiores dimensões um máximo de 12 operações de maquinagem realizadas.

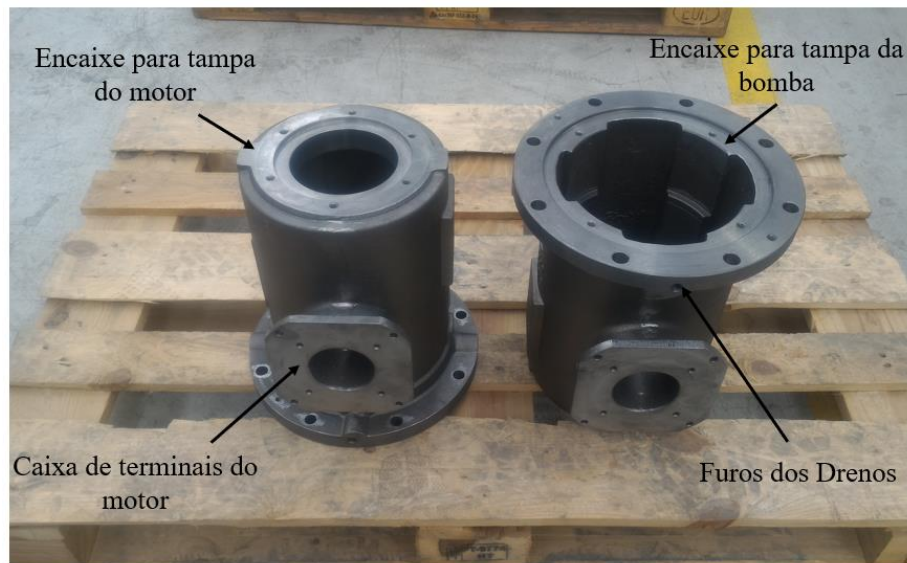


Figura 3.7 Partes a maquinar na carcaça – TGCL100L.

Através do desenho da carcaça TGCL 100L (Anexo A, Figura A.18) é observado que a parte interior da carcaça está sujeita a tolerâncias de acabamento rigorosas (tolerâncias nominais S7 e H7) devido à necessidade de incluir o motor elétrico com a mínima folga. Também se verificam tolerâncias H7 para a inclusão da tampa dos motores e tampa da bomba. A caixa de terminais não apresenta cotas toleranciadas pelo que se consideram desvios simétricos indicados pela norma ISO 2768mK. Pela análise dos desenhos (Anexo A, Figura A.18) verifica-se a perpendicularidade existente entre o eixo central da bomba e o eixo da caixa de terminais do motor.

1ª Fase – Torno Vertical – Carcaça TGCL

No torno vertical a fixação é executada através de uma bucha de 4 grampos independentes de aperto manual que seguram a carcaça pelo exterior (Figura 3.8). Através da rotação da bucha o operador tem de assegurar a centragem do eixo da carcaça com o eixo da bucha, garantindo o correto posicionamento da peça para realizar a maquinagem. Assim, todo o ajuste será manual com a associada dificuldade em garantir uma rotação centrada da bomba.

Nesta etapa é realizado o torneamento interior da carcaça e o facejamento da zona da tampa do motor, tanto o desbaste como o seu acabamento.



Figura 3.8 Maquinagem por torno vertical.

Em algumas não conformidades, verificaram-se zonas da parede interior não maquinadas, o que impede a montagem final do motor. Esta falha poderá ter origem nos desvios geométricos de fundição elevados que dificultam a centragem da peça no torno.

De modo a reduzir a ocorrência de desvios em relação às tolerâncias exigidas e a dependência de uma segunda máquina, pretende-se, tanto quanto possível, substituir as operações no torno por operações no CM. Por outro lado, a troca de peças entre as duas máquinas aumenta os tempos de *setup* global no fabrico da carcaça, pela inclusão de uma nova fase de maquinagem, que poderia ser evitada caso a maquinagem da carcaça fosse realizada apenas no centro de maquinagem CNC.

2ª Fase – Centro de Maquinagem – Carcaça TGCL

Através do Anexo A é possível constatar a utilização de alguns elementos de fixação, semelhantes aos utilizados na fixação dos corpos das bombas, que ocupam uma percentagem relevante no processo de *setup* inicial. Para além dos grampos manuais, destaca-se novamente o mesmo esquadro de referência, que necessita de ser posicionado com recurso a um comparador. Neste processo observam-se ainda dois blocos de apoio colocados na mesa de modo a que cada peça seja maquinada sempre na mesma posição (Figura 3.9). Apesar de se reduzir tempo pela exclusão do uso da sonda no início de cada maquinagem, os blocos necessitam de ser posicionados com recurso ao comparador. Desta forma, o processo de *setup* inicial torna-se complexo e demorado (cerca de 12 minutos).

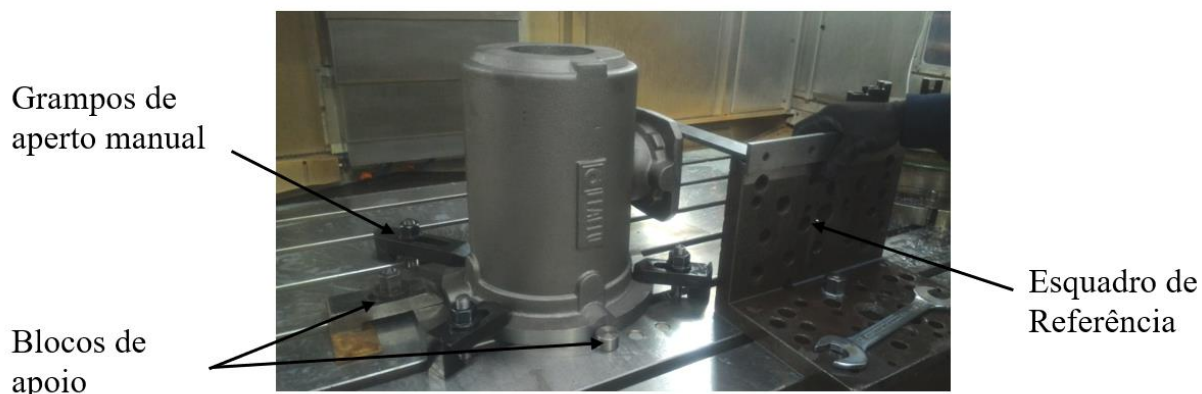


Figura 3.9 Primeira fixação da carcaça no centro de maquinagem.

3ª Fase – Centro de Maquinagem – Carcaça TGCL

Na segunda operação no centro de maquinagem realizam-se as furações na zona de encaixe da tampa da bomba, processo que se iniciou no torno vertical, mas que não é possível ser concluído recorrendo ao torno. Na sua fixação recorreu-se a uma placa que serve como elemento de ligação entre a carcaça e a mesa (Anexo A, Figura A.13). Como apenas se realizam furações nesta etapa e as forças axiais são reduzidas, o método utilizado é suficiente para garantir a correta fixação da carcaça.

Mais uma vez é importante realçar que este processo poderia ser facilitado caso a maquinagem fosse realizada totalmente pelo CM. O facto de existirem duas fixações para maquinar na mesma zona da peça mostra como é consumido tempo desnecessário devido à utilização de duas máquinas.

4ª Fase – Centro de Maquinagem – Carcaça TGCL

Esta operação efetuada na carcaça tem como foco o apoio da caixa de terminais do motor elétrico bem como os furos laterais dos olhais. Tal como ocorre nas bombas realça-se a presença de um perno que intersecta toda a peça, de modo a comprimir a peça contra o esquadro e reduzir as vibrações durante a maquinagem (Anexo A, Figura A.14). A carcaça está posicionada na parte superior do esquadro com a ajuda de duas cavilhas e dos furos realizados na etapa anterior. No entanto, não existe uma posição bem definida para posicionar as cavilhas pelo que a carcaça se poderá movimentar sempre que há substituição da peça.

Nesta fixação também se destaca o tempo de posicionar o esquadro com recurso ao comparador e a indefinição do posicionamento da peça no esquadro que obriga o operador a identificar o centro da peça antes de iniciar a sua maquinagem.

Por último, é necessário executar a rotação de 90° da peça de modo a realizar as furações dos drenos. Também neste caso a posição da carcaça no esquadro irá ser alterada pelo que a localização dos furos terá de ser verificada com recurso à sonda.

Desta análise das fases de maquinagem das duas peças destacam-se algumas lacunas referentes ao processo de fixação que poderão ser melhoradas:

- Fixação demorada dos grampos manuais;
- Orientação das peças demorada feita através de um esquadro;
- Fixação dos esquadros através de um comparador;

- Indefinição da posição da peça na mesa;
- Tempo de *setup* elevado associado à utilização da sonda;

3.2 Elaboração dos programas de maquinagem (CN)

O facto de a empresa não possuir um *software* CAM ou uma aplicação de simulação para programação do controlador CNC, faz com que todos os programas sejam realizados pelo operador diretamente no controlador da máquina. Este tem a responsabilidade de analisar a peça fundida, compará-la com a peça final, elaborar, testar e validar os programas de CN para realizar a maquinagem. Finalizada esta etapa, o técnico pode gravar o programa no controlador da máquina para posterior utilização. O tempo de programação pode ser extenso em função da complexidade da peça pelo que muitas vezes são despendidas várias horas de produção para realizar a programação de uma peça completa. Para além dos programas realizados através dos ciclos pré-definidos disponíveis no controlador (Anexo B), em alguns casos existe a necessidade de realizar programação manual com recurso a códigos G&M. Todos estes fatores contribuem para um aumento do tempo global de *setup* que poderia ser diminuído caso o programa fosse previamente gerado em *software* CAM e simulado.

Geralmente na programação das operações de produção de uma peça, o operador segue as etapas de programação observadas no esquema da Figura 3.10. Cada uma delas será analisada em detalhe de modo a identificar possíveis erros de programação.

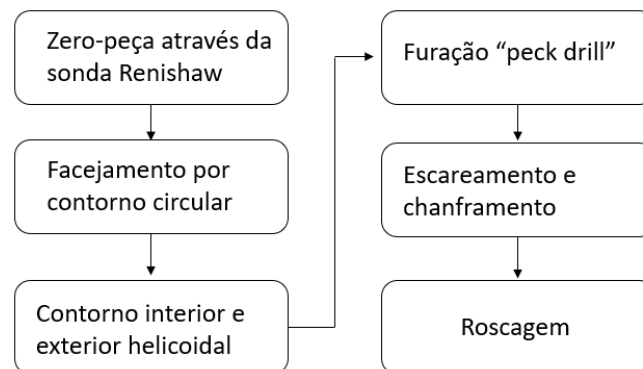


Figura 3.10 Etapas gerais de programação nas bombas e carcaças.

Em qualquer série de maquinagem realizada na empresa, a primeira operação executada através do controlador será a definição do zero da peça através da sonda Renishaw. Como a maioria das superfícies a maquinar apresenta ocos em forma circular de diâmetro interior elevado, o ponto de referência da maquinagem irá ser o centro desses furos. Através da escolha correta do subprograma da Renishaw, a sonda realiza o movimento contra as paredes do furo, determina o seu centro e insere o valor no controlador.

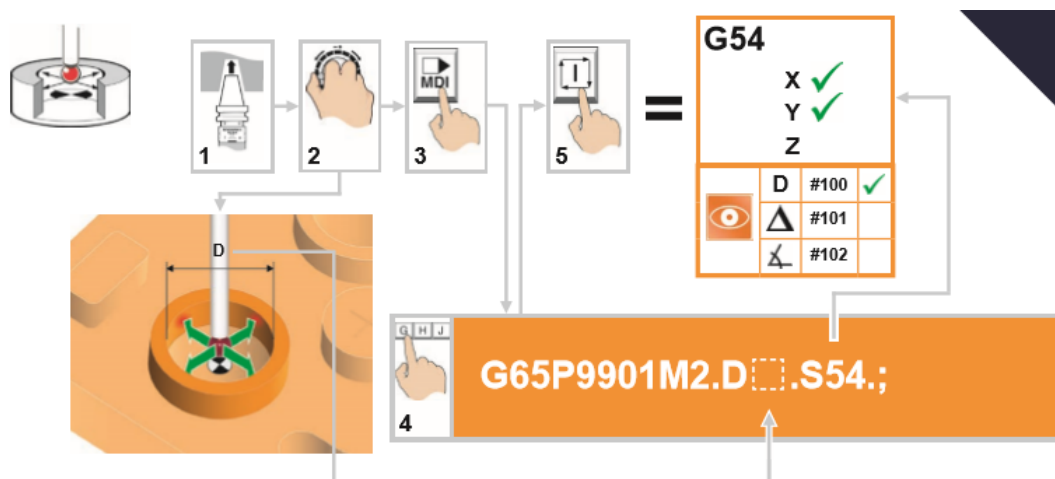


Figura 3.11 Programa padrão para retirar o centro do furo. [18]

Este método apresenta inúmeras vantagens, mas ainda não se encontra totalmente otimizado. O operador é obrigado a utilizar o volante manual para posicionar a sonda no local onde se deseja realizar a medição. Posteriormente tem que inserir no programa um código semelhante ao da Figura 3.11 indicando qual o diâmetro aproximado do furo que se pretende medir. Posto isto, a sonda realiza automaticamente a medição e atualiza os novos valores de X e Y referentes ao zero da peça no controlador da máquina. Este processo de medição por sonda por demorar até 2 minutos a ser concluído.

As restantes programações utilizadas com o apalpador Renishaw encontram-se definidas em subprogramas no controlador da máquina. Uma lista de subprogramas está disponível na máquina *Akira-Seiki* por forma a auxiliar o operador na sua decisão. Neste caso, o subprograma selecionado está definido no controlador através do código 1008, como se observa na Figura 3.12.

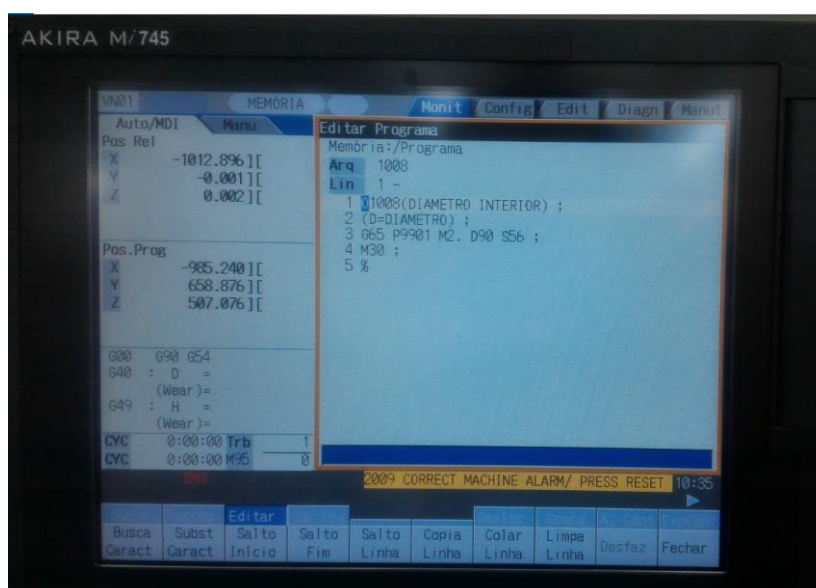


Figura 3.12 Subprograma para retirar o centro do furo.

Com a peça corretamente fixada e posição inicial de maquinagem definida, o operador apenas necessita de iniciar a execução do programa. Uma das operações mais frequentes nas peças analisadas é o facejamento. Avaliando a geometria tanto da bomba como da carcaça concluímos que grande parte dos locais a facejar apresentam formas circulares. Em função dos

ciclos disponibilizados pela linguagem conversacional do controlador, o técnico especifica contornos circulares de diferentes diâmetros até concluir o facejamento da peça (Figura 3.13). Seja no corpo da bomba ou na carcaça, o ciclo de facejamento utilizado é semelhante, podendo variar o número de contornos circulares em função da largura da peça e do diâmetro da ferramenta. Nas peças em estudo, dependendo da zona a maquinar e dos parâmetros de corte utilizados, este processo de facejamento pode variar entre 5 a 13 minutos.

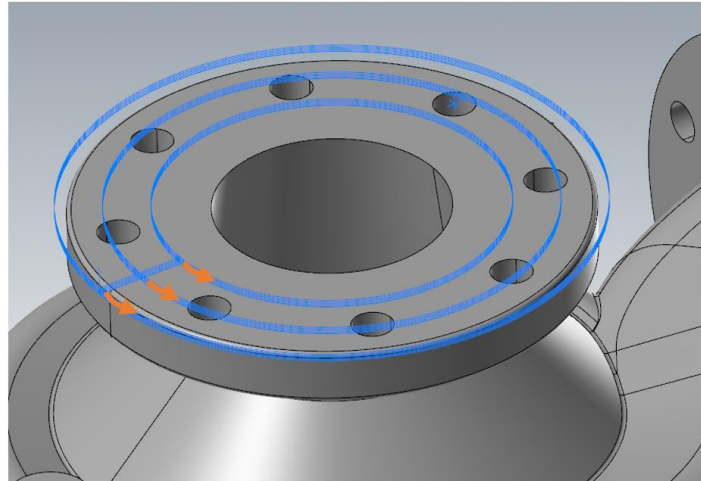


Figura 3.13 Facejamento da flange de aspiração por contorno circular.

Em função do diâmetro da ferramenta, o seu diâmetro de corte máximo e do diâmetro da superfície a maquinar, o controlador da máquina calcula automaticamente qual o número de contornos circulares necessários para realizar o facejamento completo da peça. Através da análise do manual de programação do controlador, verificou-se que este continua a ser o método mais indicado para realizar o facejamento das peças da EFAFLU comparativamente com os restantes ciclos disponibilizados na linguagem conversacional do controlador.

Atualmente, existem métodos que podem ser mais vantajosos para realizar o facejamento de uma peça com formas circulares, reduzindo o tempo de maquinagem, como por exemplo o facejamento em espiral. No entanto, estes percursos da ferramenta não estão disponíveis na linguagem conversacional do controlador da máquina e uma programação manual seria complexa.

Relativamente aos contornos realizados numa peça, sejam interiores ou exteriores, são sempre executados segundo um trajeto helicoidal também designado por contorno em rampa. O contorno helicoidal está disponível no controlador através do ciclo “Navi Hole-Helix” e o tempo de programação pode ser controlado pela variação do ângulo da hélice ou pela profundidade de cada contorno.

As peças em estudo (resultantes do processo de fundição) apresentam valores de contorno que podem variar até um máximo de 30 mm de altura, pelo que os tempos de contorno helicoidal variam entre 3 a 10 minutos segundo os valores de tempo retirados do Anexo A. Com isto, ainda que seja vantajoso o método de programação helicoidal, comparativamente com o método incremental em Z (Figura 3.14 a)), com uma ferramenta apropriada poderia ser realizado o desbaste completo dos contornos. Também como este método é utilizado em todos contornos é necessário testar e avaliar as diferentes situações de maquinagem através dos ciclos disponibilizados pelo controlador.

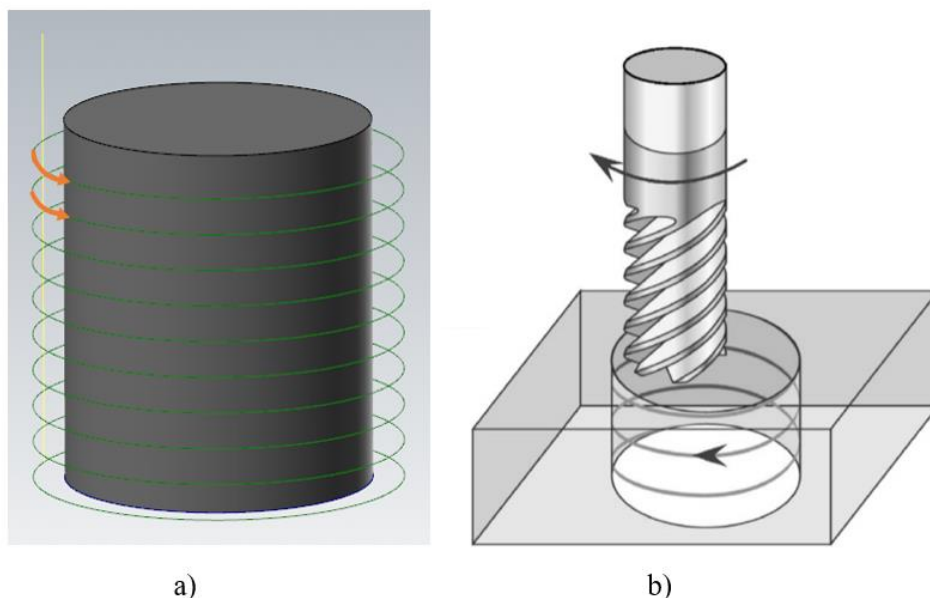


Figura 3.14 Tipos de contorno: a) Contorno incremental; b) Contorno em rampa (helicoidal) [21].

O controlador disponibiliza ciclos de furação para furos dispostos ao longo de uma linha reta, circunferência ou arcos de circunferência. Os mesmos ciclos são aplicados às operações de escareamento ou roscagem dos furos. Para cada um destes ciclos, a trajetória da ferramenta entre furos será a mais curta possível de modo a reduzir o tempo total de maquinagem.

Sempre que se inicia um processo de furação é utilizada a estratégia “Peck drill” em que o objetivo passa por realizar furos de forma incremental ao longo da profundidade definida (com a mesma broca para diferentes profundidades), com recuo da broca à posição inicial entre cada furação para realizar a limpeza da apara. Na máquina este ciclo é aplicado com o código G83 (Anexo B.4) e a aproximação à profundidade do furo previamente executado realiza-se em velocidade rápida, começando a sua velocidade de trabalho alguns milímetros antes da nova furação. Este método é executado em brocas que não possibilitam elevadas profundidade de corte, como é o caso das brocas de aço rápido (HSS) utilizadas pela empresa. Este ciclo é utilizado devido às profundidades elevadas (máximo 35 mm) a que podem estar sujeitos os furos das peças da EFAFLU e a sua velocidade de execução permite tempos de furação rápidos, não ultrapassando os 3 minutos.

Após a primeira furação “Peck Drill” geralmente é necessário recorrer-se a um alargamento do furo pelo que se realiza uma furação simples - ciclo “Navi-Drill”. Este ciclo trata-se de uma furação básica no qual a broca irá perfurar o material sempre com a mesma velocidade de avanço e de forma contínua até à profundidade definida. Este ciclo é o mesmo utilizado para escarear furos. Comparativamente com o ciclo de furação peck drill este ciclo de alargamento é demorado de modo a aumentar a precisão do furo, pelo que uma operação de alargamento do furo nas flanges das bombas pode demorar até 7 minutos a ser concluída.

Analisando os processos de furação verificou-se que esta sequência é utilizada para todas as ferramentas de furação, quer sejam ferramentas de aço rápido (HSS) ou de metal duro, não tendo em consideração nem o tipo de material nem as profundidades admitidas para furação de acordo com os catálogos das ferramentas. É assim necessário realizar uma análise das ferramentas utilizadas, do ciclo de furação que melhor se aplica à ferramenta e estudar a necessidade de realizar ou não o furo com dois diâmetros de broca.

Por último, é importante referir que em alguns casos específicos não existem ciclos disponíveis no controlador da máquina que possam ser usados para elaborar o programa CNC de uma forma expedita e realizar de um modo rápido a maquinagem pretendida. Nesse caso o operador fica incumbido de otimizar o programa diretamente, através de códigos G&M

introduzidos no próprio controlador. Um exemplo disso é a caixa de terminais para as ligações elétricas ao motor, que se encontra nas carcaças das bombas, nas quais, o contorno, necessita de ser programado manualmente (Figura 3.15).

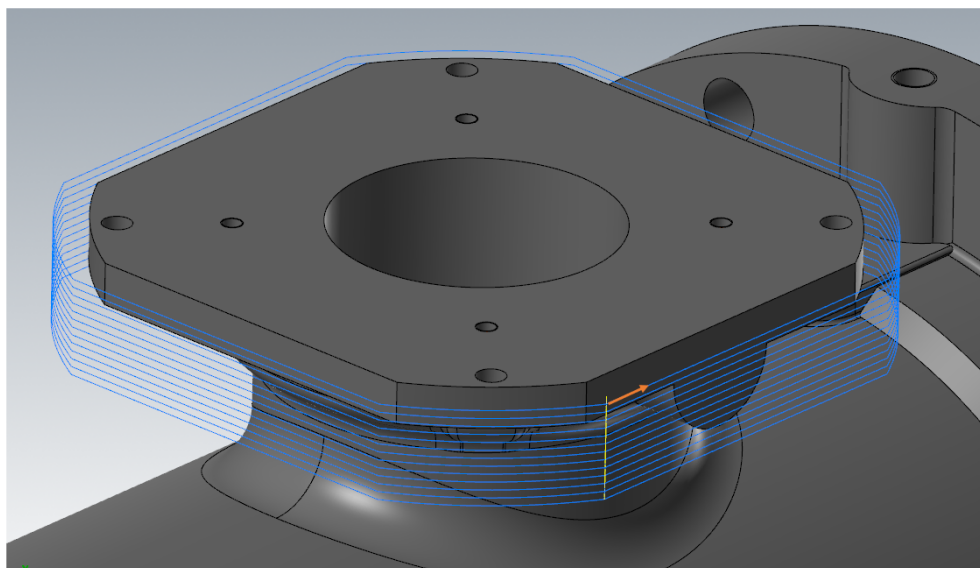


Figura 3.15 Contorno incremental aplicado à caixa de terminais.

Na programação manual é utilizado um modo incremental (Ciclo G99 - Anexo B), sendo especificado 1mm para o incremento de descida da ferramenta a cada volta. Isto faz com que uma geometria simples como a caixa de terminais possa demorar até 6 minutos a realizar o contorno. Todos os contornos similares são realizados segundo este método fazendo com que o tempo de programação seja elevado. Pelo tempo demorado associado a este tipo de programação parece pertinente considerar outras alternativas à programação manual que permitam testar e simular diferentes estratégias de uma forma expedita e sem necessitar de utilizar a máquina, como é o caso dos *softwares* CAM.

Considerando os métodos de programação utilizados, existem alguns tópicos que se destacam para o desenvolvimento deste trabalho:

- Analisar possibilidades mais expeditas de utilização da sonda;
- Avaliar alternativas de programação e utilização de novos ciclos de facejamento, de execução de contornos (ex. *software* CAD/CAM, helicoidal vs. incremental);
- Avaliar as ferramentas utilizadas e os parâmetros dos ciclos de furação;
- Avaliar alternativas para a elaboração dos programas de maquinagem realizados pelo operador para as peças de maior complexidade, em particular os que não utilizam ciclos de maquinagem pré-definidos existentes no controlador;

3.3 Ferramentas

Do mesmo modo que foi realizado para os temas anteriores, foi também efetuado o estudo das ferramentas de corte disponíveis na empresa bem como os parâmetros de corte utilizados para cada material. Diferenciam-se as ferramentas utilizadas em função da sua operação, isto é, as operações de fresagem e de furação.

3.3.1 Ferramentas de Fresagem

Apesar de poderem ser utilizadas diversas ferramentas para realizar a mesma operação de fresagem, no caso da empresa geralmente é seguida uma estratégia de utilizar as mesmas ferramentas para facejamento e contorno.

Destacam-se três ferramentas principais evidenciadas na Figura 3.16. O facejamento em desbaste e o seu acabamento geralmente são realizados pela fresa de diâmetro 50mm. Os contornos são realizados por trajeto helicoidal também com recurso à fresa de diâmetro 50mm. No entanto, quando se pretende facejar a maiores profundidades, como é o caso do interior da bomba, utiliza-se a roca de diâmetro 80mm. Esta é a única ferramenta de maiores dimensões aplicada no centro de maquinagem, mas, continua a não ser suficiente para a realização dos contornos interiores da carcaça. A máquina inclui ainda no seu carrossel uma fresa de topo com diâmetro 16 mm, sendo atualmente utilizada apenas no acabamento dos contornos.

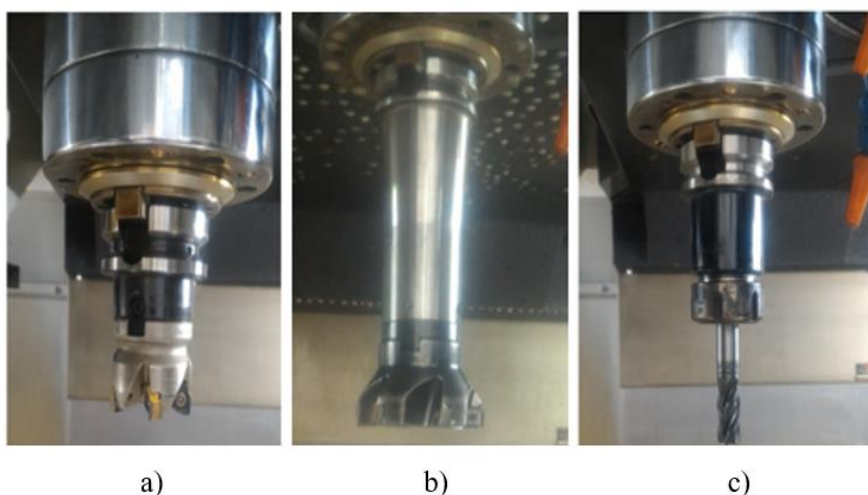


Figura 3.16 Ferramentas de fresagem: a) Fresa 50 mm; b) Roca 80 mm; c) Fresa de topo 16 mm.

Relativamente às ferramentas de fresagem é necessário avaliar a vantagem em substituir-se a ferramenta utilizada para o contorno helicoidal (fresa 50 mm) por uma fresa de topo que realize o contorno com maior eficácia. Para isso, poder-se-á utilizar a fresa de topo de diâmetro 16 mm ou então optar por uma nova solução com maior benefício para a empresa.

Por outro lado, parece fundamental estudar a possibilidade de redução do número de voltas circulares associados ao facejamento, através da utilização de uma fresa de maior diâmetro.

3.3.2 Ferramentas de Furação

Devido à enorme diversidade de produtos da empresa com furações variadas, esta tem à sua disposição uma abundante gama de brocas. O material mais comum para as brocas da empresa é o aço rápido (HSS) existindo apenas 3 brocas de pastilhas intercambiáveis em metal duro de diâmetro 14, 17 e 23 milímetros. Comparativamente com as brocas HSS estas brocas permitem atingir maiores profundidades a uma maior velocidade e avanços. O seu elevado custo é a principal razão pelo qual a empresa não investe em novas ferramentas de furação, aspirando num futuro próximo à alteração de todas as brocas de aço rápido.

Incluído nos processos de furação, podemos distinguir as operações de escareamento e o chanfragem. As duas ferramentas representadas na Figura 3.17 são as únicas ferramentas disponíveis na empresa para realizar estes dois processos.

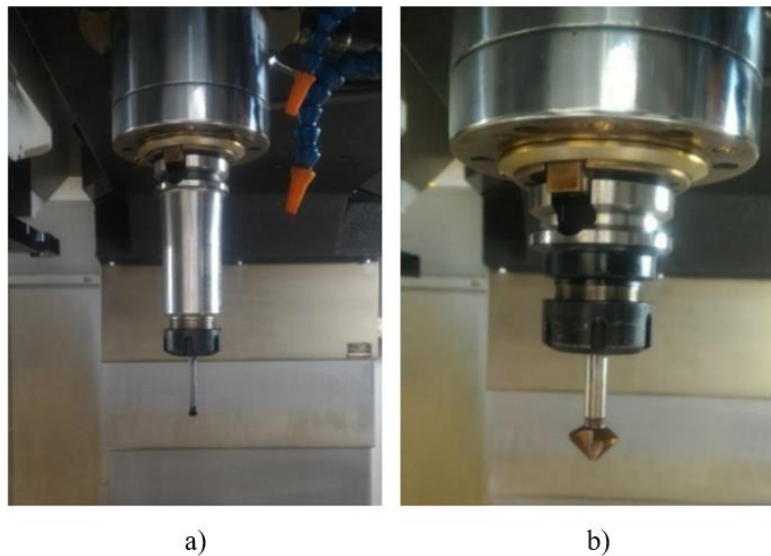


Figura 3.17 a) Ferramenta de chanfrar com diâmetro máximo de 10 mm; b) Ferramenta de escarear com diâmetro máximo de 23 mm.

Através da análise do processo de maquinagem atual foi observada uma velocidade de trabalho reduzida na ferramenta de chanfrar. É possível verificar que a ferramenta utilizada não apresenta robustez elevada pelo que os parâmetros de corte utilizados são muito baixos. No entanto, devido ao preço reduzido destas ferramentas a empresa continua a optar por estas duas soluções. Aspirando à redução do número de ferramentas no carrossel e otimizando as velocidades e tempos de maquinagem foi levantada a possibilidade destas duas etapas serem realizadas por uma única ferramenta que pudesse suportar velocidades de corte e avanços superiores e, consequentemente, tempos de maquinagem inferiores.

As velocidades das principais ferramentas da empresa e as respetivas operações de maquinagem, encontram-se resumidas na Tabela 3.1. As velocidades de corte utilizadas foram comparadas com as velocidades recomendadas pelos catálogos dos fornecedores para o grupo dos ferros fundidos, grupo K, de modo a compreender se poderiam ser utilizados outros valores.

Tabela 3.1 Parâmetros de corte usados nas principais ferramentas/operações de maquinagem da empresa.

<i>Ferramentas</i>	<i>Operação</i>	<i>Diâmetro [mm]</i>	<i>Frequência de rotação (RPM)</i>	<i>Velocidade de avanço (mm/min)</i>	<i>Velocidade de corte utilizada (m/min)</i>	<i>Velocidade de corte (catálogo) (m/min)</i>
<i>Fresa</i>	Facejamento Desbaste e Acabamento	50	1600	2000	251	220-320
<i>Fresa</i>	Contornos Desbaste	50	1600	2000	108	110
<i>Fresa de topo</i>	Contorno Acabamento	16	5000	1500	251	250
<i>Broca de pastilhas</i>	Chanfragem	17	1900	500	101,5	90-160
<i>Fresa</i>	Facejamento desbaste e acabamento	80	950	1000	239	160-195
<i>Chanfrar</i>	Chanfragem	10	2500	700	78,5	36
<i>Escareador</i>	Escareamento	23	600	120	43,3	25

A análise da tabela permite concluir que algumas velocidades estão além do recomendado pelo fabricante pelo que poderá comprometer o acabamento das superfícies e causar um desgaste excessivo na ferramenta ou, se for o caso, das suas pastilhas.

Por outro lado, também foi verificado que para a maquinagem das peças em bronze, o operador reduzia a velocidade de maquinagem em 40% para todas as ferramentas de corte. Tal como foi verificado no capítulo anterior, o bronze possui um índice de maquinabilidade superior ao dos ferros fundidos, pelo que é possível utilizar velocidades de corte superiores.

Após este estudo das ferramentas utilizadas, serão considerados os seguintes temas de melhoria a abordar no próximo capítulo:

- Estudo de novas ferramentas para realizar contornos e facejamento;
- Avaliação das vantagens na utilização de brocas de metal duro integral ou pastilhas intercambiáveis;
- Sugestão de novas ferramentas para realizar chanfros;
- Avaliação da possibilidade de utilização de ferramentas longas para o interior da carcaça;

Como resultado do acompanhamento de maquinagens na fresadora CNC, foi possível recolher informação relativa aos tempos de *setup* e maquinagem envolvidos no fabrico do corpo de bomba TGCL 100L e da respetiva carcaça, em ferro fundido. Os tempos foram medidos e encontram-se em detalhe no anexo A, contabilizados por unidade e por lote. Os tempos considerados não têm em conta a fase 4 de furação de drenos dado esta furação poder variar de corpo para corpo, no mesmo lote, estando o tempo da operação dependente da furação estabelecida.

4 Análise e proposta de soluções para a maquinagem CNC

Como resultado do estudo realizado sobre o centro de maquinagem, que incluiu a análise da situação atual e identificação de oportunidades de melhoria, apresentam-se neste capítulo as alterações estudadas e sugeridas para superar os problemas verificados. Tal como no capítulo anterior, incide-se nos três tópicos principais da utilização do centro de maquinagem, ou seja, meios de fixação da peça, ferramentas utilizadas e elaboração de programas de maquinagem. As soluções têm com base a análise das operações das bombas TGCL, mas podem considerar-se de aplicação mais genérica incluindo as várias peças produzidas na empresa, cujo processo de fabrico passa pelo centro de maquinagem.

4.1 Métodos e dispositivos de fixação

Para o estudo dos novos métodos de fixação é essencial determinar quais os tempos despendidos no processo atual, seja em tempos de *setup* inicial de todos os acessórios de fixação ou no tempo gasto entre troca de peças. Através do acompanhamento dos diferentes processos realizados no centro de maquinagem foi possível medir os tempos de *setup* inicial para uma série de 10 corpos de bombas e 10 carcaças, pelo que os seus valores médios absolutos se encontram representados no Anexo A. Tendo em conta os valores absolutos de *setup*, a Figura 4.1 representa os valores percentuais de cada componente de modo a comparar os tempos relativos a cada etapa de fixação inicial para bombas e carcaças TGCL 100-200 100L.

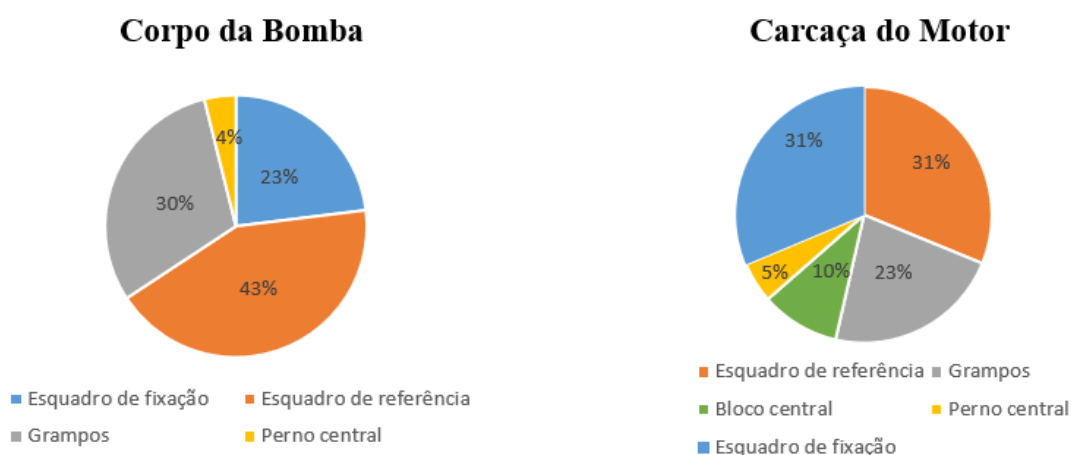


Figura 4.1 Componentes do tempo total de fixação (corpo – 00:16:33; carcaça -00:18:50).

A análise dos gráficos permite concluir que a colocação dos esquadros de referência e de fixação ocupam a maior percentagem de tempo entre os vários componentes de fixação. Tal facto deve-se à necessidade de garantir o seu correto posicionamento na mesa com recurso a um comparador. Também a colocação e aperto dos grampos manuais são dos métodos mais demorados. Tanto no caso dos grampos como nos esquadros obriga a colocação de “T’s de fixação” de modo a que seja possível a ligação à mesa da máquina.

Os dispositivos analisados e respetivas soluções são apresentados de seguida incluindo: uma mesa de fixação; batente ou novo esquadro de referência; um prato de apoio para o corpo das bombas; um esquadro de suporte; um prato de apoio para a carcaça dos motores; utilização de grampos de aperto automático.

4.1.1 Mesa de fixação

Com o intuito de diminuir o tempo de preparação da maquinagem o primeiro método de fixação projetado, foi uma mesa de referência que será sobreposta à mesa da máquina. Esta foi construída para reduzir a complexidade de montagem dos grampos de fixação manual através da eliminação dos “T’s de fixação”. A mesa poderá ainda contribuir para a rápida montagem e alinhamento usando os métodos de fixação atuais ou os novos métodos em desenvolvimento. A mesa criada encontra-se representada na Figura 4.2 e para melhor compreensão das suas dimensões, o seu desenho encontra-se no Anexo D.1.

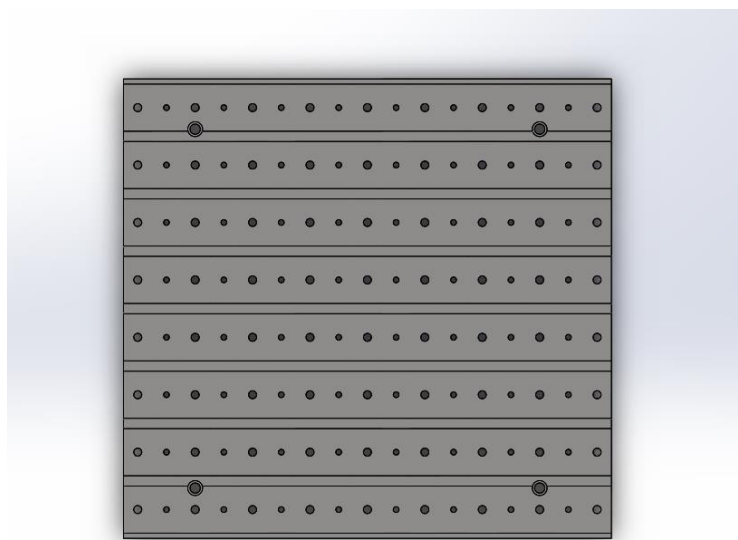


Figura 4.2 Mesa para o centro de maquinagem.

Para a criação deste dispositivo foi analisada a mesa da máquina e verificou-se que esta poderia incluir, nos seus rasgos, parafusos ou pernos até 18 mm de diâmetro nominal. Assim, a fixação da mesa na máquina é feita com recurso a 4 parafusos M18 presos aos rasgos da mesa com recurso a “T’s de fixação”. De modo a auxiliar a fixação dos grampos de fixação manual e eliminar os “T’s de fixação” definiu-se furos roscados (M16) dispostos em linhas paralelas e espaçados entre si de 100 milímetros. Esta disposição permite grande liberdade na colocação dos grampos ao longo de toda a mesa facilitando o trabalho do operador. Os furos M16 encontram-se intercalados com furos passantes de diâmetro 10 mm e tolerância H7, também distanciados entre si de 100 milímetros. Estes servem para a inclusão de pinos retificados Ø10h7 tendo a função de permitir orientar rapidamente os dispositivos de fixação existentes como, por exemplo, o esquadro de apoio, ou outros que possam ser desenvolvidos. As tolerâncias reduzidas associadas aos pinos permitem eliminar o uso do comparador e reduzir o tempo de *setup* inicial.

Para uma melhor percepção do plano de trabalho apresenta-se, na Figura 4.3, a mesa do centro de maquinagem com a bucha pneumática e a nova mesa de referência.

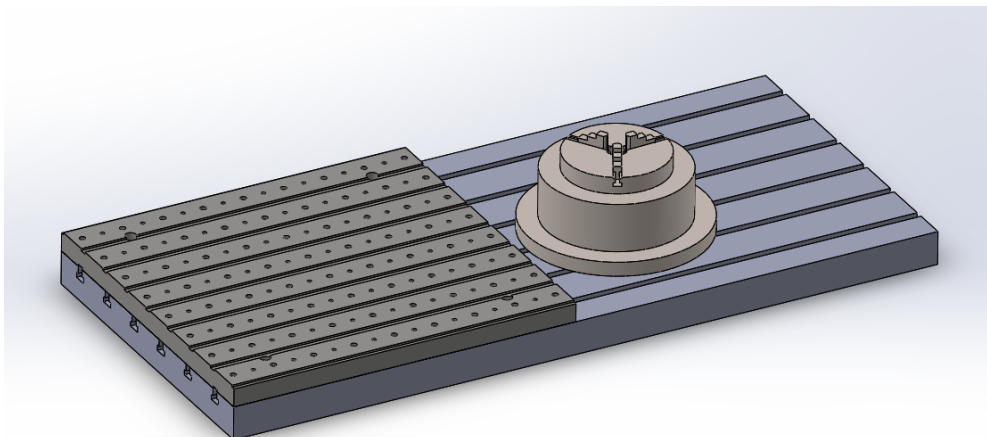


Figura 4.3 Mesa de referência no centro de maquinagem.

A mesa foi construída com uma altura de 50 mm, comprimento total de 850 mm e com a mesma largura da mesa da máquina (800 mm). Estas dimensões são suficientes para suportar as peças fabricadas no centro de maquinagem e permitir montar ou retirar facilmente a nova mesa na máquina com recurso ao guindaste disponível para transferência das peças.

Na Figura 4.4 ilustra-se a mesa de fixação fabricada em ferro fundido cinzento EN-GJL-250, aplicada no centro de maquinagem *Akira-Seiki*. Apesar da mesa ter sido projetada, o seu fabrico não foi concluído a tempo de serem realizados testes nos produtos da empresa.



Figura 4.4 Mesa de fixação no centro de maquinagem *Akira-Seiki*.

4.1.2 Prato de apoio para bombas

O método de fixação criado tem como objetivo otimizar a fixação da peça na segunda fase de maquinagem do corpo da bomba. Como foi observado, nesta fase de fixação o operador recorre a um bloco retificado onde será apoiada a flange de descarga da bomba orientando a peça segundo o eixo X do plano da mesa (Capítulo 3, Figura 3.3). Para substituir o bloco retificado (devido aos seus elevados tempos de posicionamento com recurso ao comparador)

equacionou-se a possibilidade de utilizar as furações realizadas na primeira fase de maquinagem do corpo da bomba de modo a ser possível orientar a peça segundo uma direção favorável à maquinagem. Procedeu-se então ao estudo das furações realizadas na primeira fase de maquinagem, na flange de aspiração da bomba. Para a maioria dos modelos TGCL a flange de aspiração apresenta 8 furos Ø18 ou Ø22 mm e a sua distância ao centro da flange pode variar dependendo do diâmetro nominal das flanges. A Figura 4.5 apresenta as furações realizadas na flange de aspiração do corpo de uma bomba TGCL 100-200 100L (com furações com Ø18 mm), na primeira fase de maquinagem.



Figura 4.5 Furações de diâmetro 18 mm na flange de aspiração - Primeira fase de maquinagem.

A solução proposta foi um prato de apoio para a flange de aspiração das bombas. O prato representado na Figura 4.6 a) cujo respetivo desenho técnico se encontra no Anexo D.3, permite acomodar a maioria das bombas maquinadas na EFAFLU. Neste prato encontram-se diferentes combinações de furos Ø18 e Ø22 milímetros, de acordo com a gama de bombas a utilizar, isto é, gamas TGCL, NNJ e CJG. A orientação da bomba é feita com recurso a pinos de guiamento retificados Ø18 ou Ø22 dependendo do tipo de bomba. Como o alinhamento da peça, nesta fase, não necessita de um rigor elevado, a inclusão dos pinos com o mesmo diâmetro e tolerância h7, é suficiente para garantir o alinhamento da peça segundo o eixo X da mesa da máquina. Com este método exclui-se a necessidade de colocar o bloco para orientar a bomba e eliminam-se erros associados a deficiente orientação da peça.

Distribuídos em losango, estão 4 furos M16 que permitem a sua rápida fixação sob a nova mesa criada, assim como 4 furos Ø10H7 para garantir o posicionamento do prato na mesa com uma elevada exatidão. Assim, o prato para além de garantir o correto posicionamento da peça, permite uma fixação muito mais rápida do que o método atual através do bloco.

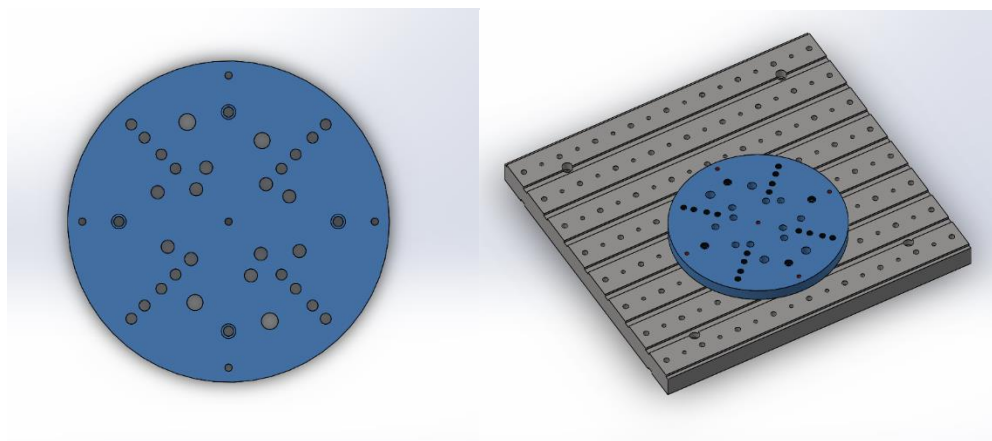


Figura 4.6 Prato para as flanges de aspiração dos corpos das bombas aplicado na mesa.

Distribuídos na diagonal do prato encontram-se os furos M16 para a rápida fixação dos grampos manuais. Como existem diferentes tamanhos da flange de aspiração da bomba distribuíram-se os grampos ao longo do prato pelo que o operador poderá colocar os grampos de fixação manual onde for mais vantajoso para o processo.

Um exemplo da aplicação deste prato nas bombas TGCL encontra-se na Figura 4.7. Para orientar a bomba, seriam colocados dois pinos de guiamento nos dois furos mais afastados da flange. Como a combinação de soluções para os furos pode ser variada, de modo a que o operador consiga perceber quais as furações da flange compatíveis com as do prato, pode, numa fase inicial, realizar-se marcações no prato identificando os furos correspondentes a cada bomba.

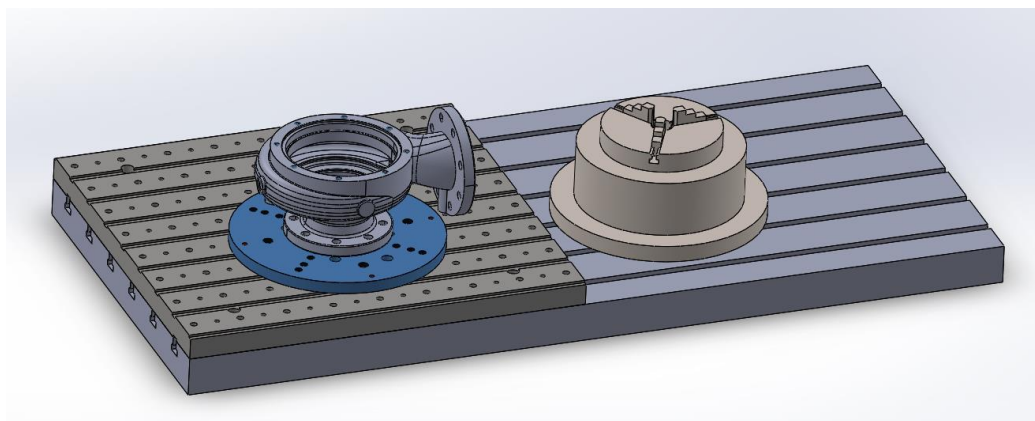


Figura 4.7 Aplicação do prato na bomba TGCL 100L.

4.1.3 Esquadro de suporte

Em relação à terceira fase de fixação do corpo da bomba (Anexo A, Figura A.6), é verificado que o tempo de *setup* aumenta devido à colocação e alinhamento, segundo o eixo Y da máquina, do esquadro de fixação através do comparador (7 minutos no alinhamento e fixação do esquadro). Por outro lado, pretende-se garantir que a bomba é colocada e maquinada sempre no mesmo local do esquadro, o que não acontece atualmente.

Para contornar estas adversidades foi criado um dispositivo de fixação que auxilia a maquinagem de bombas na terceira fase de maquinagem, pela redução dos tempos de *setup* inicial. Este é designado por esquadro de suporte e apresenta furações coincidentes com as da

mesa de fixação, de forma a facilitar a montagem de todo o conjunto. Também no caso das carcaças este novo dispositivo pode auxiliar a maquinagem da caixa de terminais ou dos furos dos drenos (Anexo A, Figura A.15).

Apesar de já existir um esquadro de fixação, este não pode ser adaptado pois já apresenta furações de diferentes diâmetros que não são compatíveis com as furações da mesa criada. A grande vantagem na utilização deste novo esquadro assenta na sua fácil conexão com a mesa de fixação, através de furos Ø10H7 e furos roscados M16 distribuídos de uma forma compatível com a mesa, pelo que se exclui o processo de verificação e posicionamento do esquadro através do comparador. Este equipamento, representado com detalhe no Anexo D.2, apresenta duas faces com dimensões distintas: uma face maior de 400 mm de comprimento e outra mais pequena de 300 mm de comprimento. A face a utilizar está relacionada com a dimensão da peça a maquinar. Na Figura 4.8 está um exemplo do esquadro na mesa do centro de maquinagem.

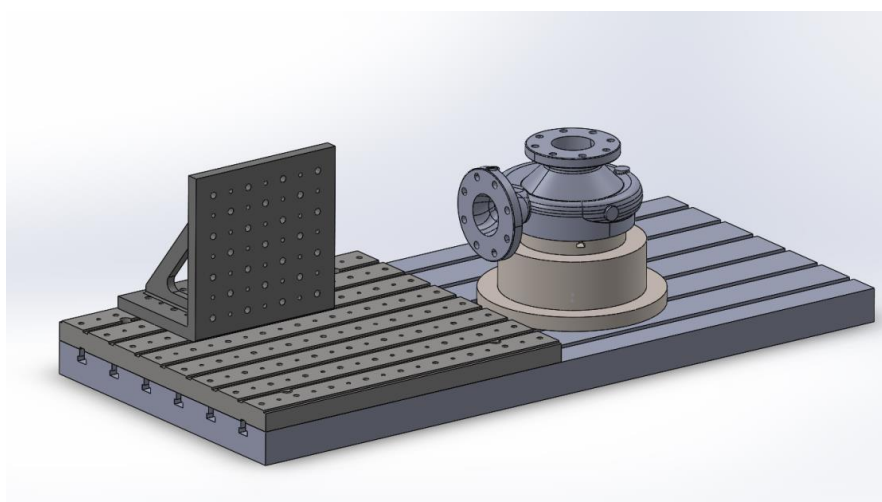


Figura 4.8 Esquadro de referência montado sobre a mesa proposta para o centro de maquinagem.

Esta distribuição de furos permite ainda colocar o prato de apoio à flange na posição vertical, auxiliando no terceiro método de fixação das bombas, tal como representado na Figura 4.9.

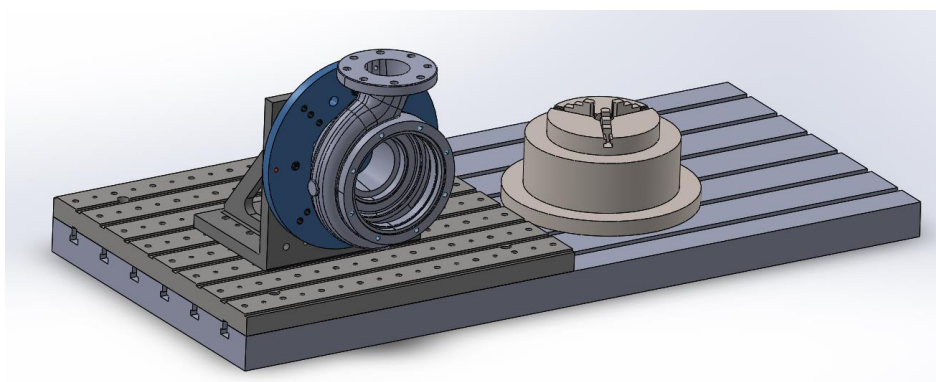


Figura 4.9 Terceira fixação da bomba no centro de maquinagem.

A orientação do corpo da bomba fica dependente dos pinos retificados Ø18 ou Ø22 consoante o tipo de flange. A flange de aspiração poderia ficar presa com recurso a grampos manuais ou então continuar a utilizar-se o perno que comprime a peça contra o esquadro.

Para realizar as furações dos drenos da bomba, a rotação da bomba continuaria a ser auxiliada através do guindaste que auxiliaria a elevação da peça. No entanto, a vantagem deste

novo método reside em não existir necessidade em identificar com a sonda o zero peça após rodar a bomba, pois a inclusão dos pinos de guiamento nos furos da flange garante que a peça rode 90°, com uma tolerância máxima de 0.5 mm, mantendo a mesma posição do eixo da flange como se observa na Figura 4.10.

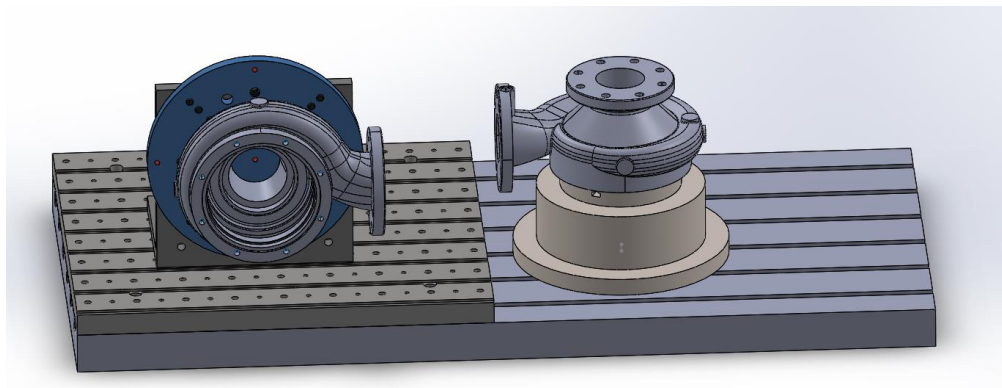


Figura 4.10 Furações dos drenos da bomba no novo esquadro.

4.1.4 Prato de apoio para carcaças do motor

O quarto método de fixação desenvolvido destina-se apenas à carcaça do motor. Como já foi referido no Capítulo 3, existem 4 modelos diferentes para as carcaças TGCL e, apesar de possuírem tamanhos diferentes, existem algumas dimensões semelhantes entre si. Através da análise das várias carcaças verificou-se que ambas as extremidades das carcaças apresentam rebaixos de 5 milímetros com tolerâncias H7. Estas cotas levaram à criação de um prato de apoio, para cada modelo, que pudesse servir de referência para a primeira e segunda fase de maquinagem das carcaças, evitando a alteração do método de fixação entre etapas. Consequentemente os tempos de *setup* global podem ser reduzidos significativamente. O prato de apoio encontra-se representado na Figura 4.11 e o respetivo desenho técnico no Anexo D.4.

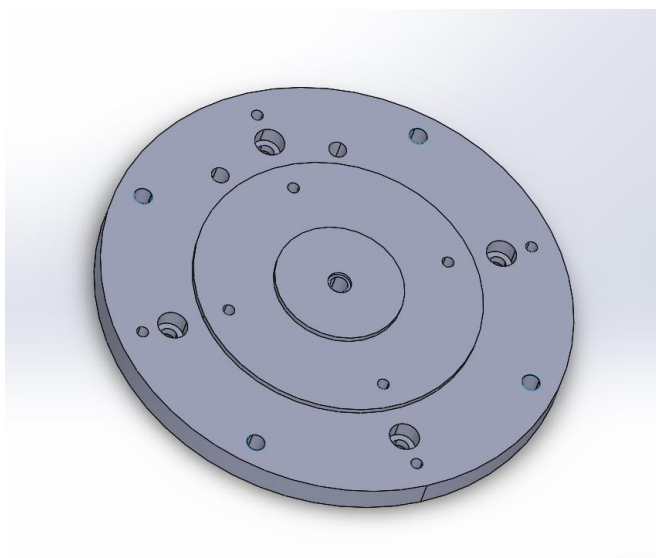


Figura 4.11 Prato de apoio para carcaça TGCL 100L.

A distribuição das furações no prato permite a rápida fixação e orientação na mesa de referência novamente através de pinos Ø10h7 e parafusos roscados M16, permanecendo no mesmo local na primeira e na segunda fase de maquinagem. Distribuídos na diagonal

encontram-se 4 furações roscadas (M16) para fácil fixação dos grampos manuais ao prato. As duas fixações da carcaça no centro de maquinagem estão representadas na Figura 4.12.

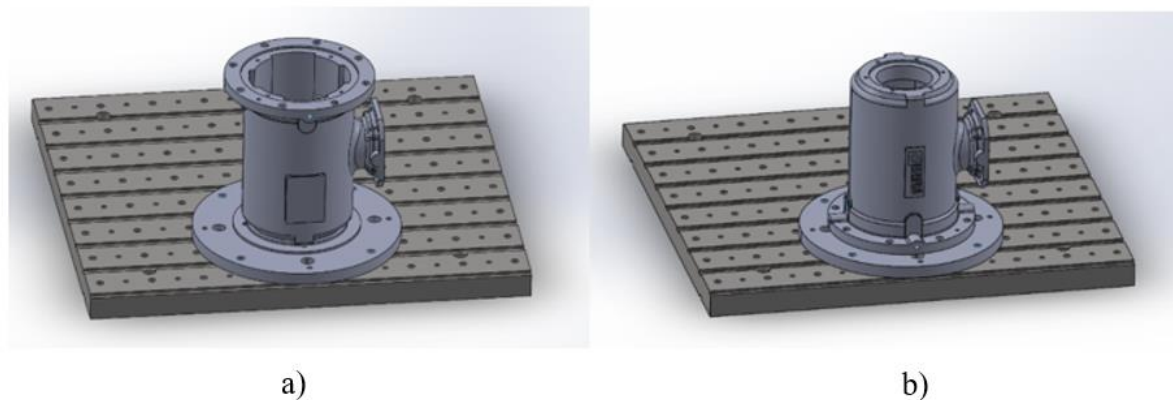


Figura 4.12 Fixações da carcaça através do prato: a) Primeira fase de maquinagem; b) Segunda fase de maquinagem.

Foi ainda estudada a possibilidade de um único prato servir de apoio a mais do que uma carcaça, pelo facto de algumas dimensões serem semelhantes entre modelos. No entanto verificou-se que tal não seria possível pois existiriam conflitos entre cotas. De modo a não criar um prato para cada carcaça, optou-se por criar placas que pudessem ser sobrepostas ao prato (orientadas através de pinos $\varnothing 10h7$) com as dimensões necessárias a cada modelo. Um exemplo da placa criada para a carcaça TGCL 112M, e aplicada sobre o prato da carcaça TGCL 100L, é representada na Figura 4.13 (Anexo D.5).

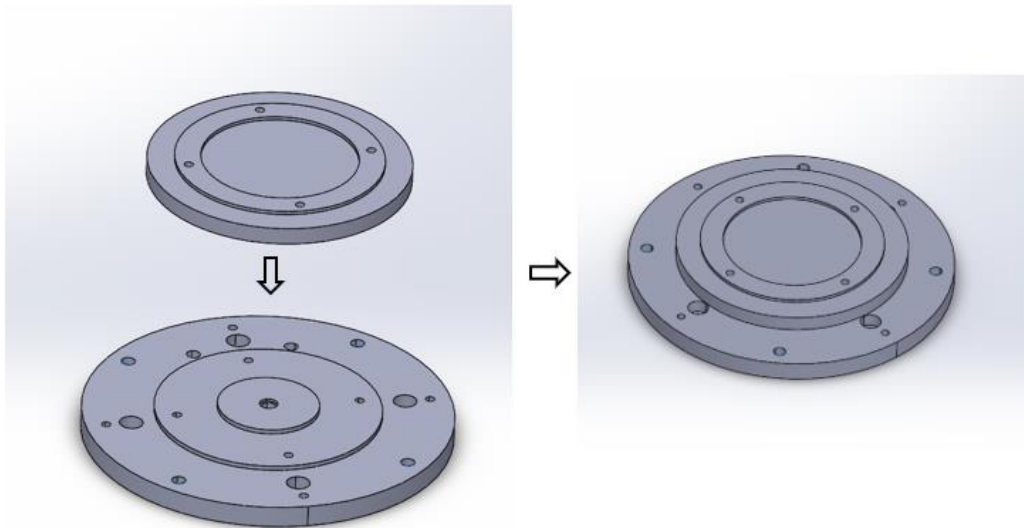


Figura 4.13 Placa sobreposta ao prato para carcaça TGCL112.

Com este método antevêm-se as seguintes melhorias:

- Redução de tempo pela montagem rápida do prato;
- Redução do tempo entre troca de peças pelo fácil ajuste ao prato;
- Exclusão do uso da sonda para cada peça;
- Utilização da sonda apenas uma vez para retirar o zero peça da carcaça;
- Utilização de uma única fixação para as duas etapas iniciais;

Realça-se que este prato apenas permite o encaixe das carcaças nos locais definidos pelos rebaixos H7. No entanto, a carcaça pode rodar o que torna necessário usar o esquadro de referência de modo a que a carcaça seja orientada segundo o eixo X da mesa para realizar a maquinagem. A criação do prato já foi aplicada às peças em estudo e encontra-se representado na Figura 4.14.



Figura 4.14 Implementação do prato de apoio às carcaças.

4.1.5 Batente

Tal como foi visto na fixação anterior através do prato da bomba, continua a ser necessário implementar o esquadro de referência para orientar a carcaça da direção do eixo X da mesa da máquina (Figura 4.14). O mesmo acontece na primeira fase de maquinagem do corpo da bomba (Anexo A, Figura A.2), na qual a maior desvantagem é o tempo despendido a colocar o esquadro e o seu alinhamento no plano da mesa com recurso a um comparador. Como o esquadro de referência não atua diretamente na fixação da peça, não se justifica o tempo gasto na colocação do esquadro.

Assim, foi sugerido um novo sistema de fixação que visa a substituição do esquadro de referência utilizado. Inicialmente equacionou-se um novo esquadro com dimensões idênticas ao esquadro de referência, no entanto, o seu posicionamento seria feito com recurso às furações Ø10H7 e furos roscados M16 de modo a que a colocação do esquadro na mesa seja feita de uma forma rápida e precisa, excluindo o uso do comparador. Este novo esquadro seria exatamente idêntico ao esquadro de suporte (sugerido na Secção 4.1.3) mas as dimensões deste seriam inferiores (altura 200 mm; comprimento 250 mm; largura 250 mm).

No entanto, como este método de orientação da peça não é o mais prático e fidedigno, é sugerida a criação de um sistema que tem a função de batente podendo servir para definir o alinhamento da peça no sentido desejado de uma forma rápida. A sua colocação na mesa de fixação através de parafusos M16 e pinos de guiamento incluídos nos furos Ø10H7 permitem um ajuste preciso do batente, sem a necessidade de um comparador e com uma rapidez superior. Poderia ser adaptado um sistema de aperto por contraporca para adaptar o batente no caso dos diferentes tipos de corpos de bombas (primeira fase de maquinagem do corpo da bomba) ou no caso das carcaças (primeira e segunda fase de maquinagem da carcaça). Na Figura 4.15 observa-se o sistema de batente aplicado às bombas e carcaças TGCL. Poderiam existir ainda 3 posições diferentes onde pode ser aplicado o sistema de batente dependendo das dimensões das bombas e das carcaças. Este método de fixação requer ainda análise e projeto detalhado pelo que fica como sugestão para futuros desenvolvimentos.

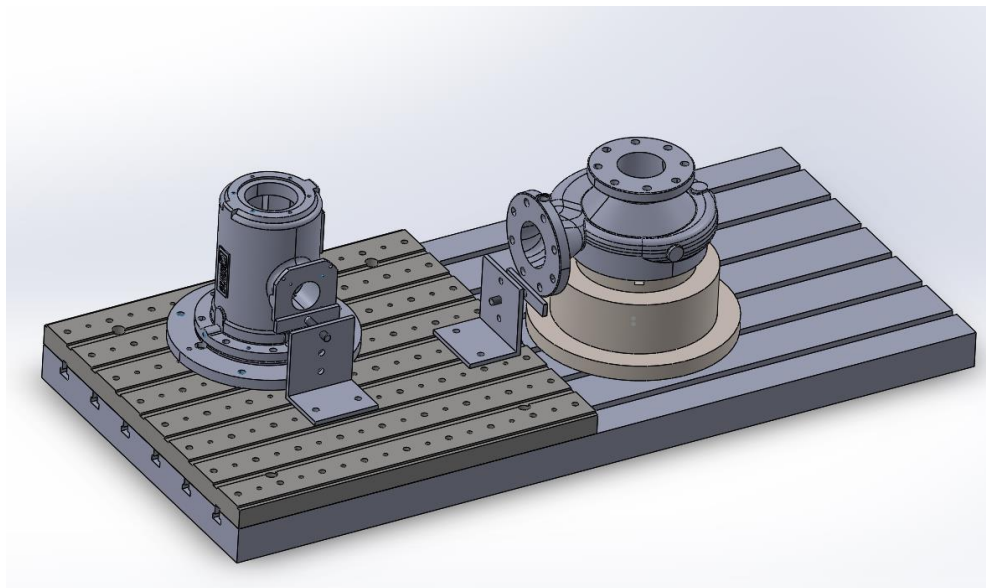


Figura 4.15 Batente aplicado a bombas e carcaça.

4.1.6 Grampos de aperto automático

A análise das fixações no centro de maquinagem permitiu concluir que cerca de 1/3 do tempo de *setup* inicial se destina à seleção e fixação dos grampos manuais na mesa. Apesar da mesa de fixação ter em consideração a fácil montagem dos grampos manuais, estes vão ser sempre um obstáculo ao operador que os terá que apertar manualmente e por vezes em locais de difícil acesso.

Desta forma, foi feito um estudo de forma a substituir os grampos de fixação, de aperto manual, por soluções automatizadas que não requerem o uso excessivo de forças ao operador nem um elevado tempo de montagem. A solução tem por base a fixação por grampos com atuação hidráulica, pneumática, elétrica ou magnética e consequentemente com possibilidade de maior nível de automatização do seu comando. Como ponto de partida é necessário determinar qual a força requerida para estes grampos, no caso mais extremo da maquinagem das peças em estudo. Este caso é verificado no facejamento em desbaste da peça, ou seja, através da fresa de diâmetro 50 mm, por apresentar valores dos parâmetros de corte mais elevados (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Parâmetros de corte usados no facejamento em desbaste, fresa 50 mm.

<i>Parâmetros de corte</i>	<i>Valores utilizados</i>	<i>Dimensões</i>
<i>Profundidade de corte axial, a_p</i>	1	[mm]
<i>Penetramento de trabalho, a_e</i>	35	[mm]
<i>Número de dentes, Z</i>	5	
<i>Velocidade de avanço, V_f</i>	2000	[mm/min]
<i>Frequência de rotação, n</i>	1600	[rot/min]
<i>Velocidade de corte, V_c</i>	251,33	[m/min]
<i>Avanço por dente, f_z</i>	0,25	[mm/dente]

Para avaliar a força de corte que determina a força necessária que os grampos têm que realizar, podemos fazer uma aproximação através da potência de corte na operação de facejamento. Durante a operação de maquinagem de uma superfície, a força de corte pode ser obtida determinando primeiro a potência de corte. Segundo o catálogo geral da Palbit [22] a potência de corte será obtida pela equação (4.1):

$$P_c = \frac{a_e * a_p * V_f}{60 * 10^6 * \eta} * K_c \quad (4.1)$$

Onde:

P_c , é a potência de corte, [kW],
 a_e , é o penetramento de trabalho, [mm],
 a_p , é a profundidade do corte, [mm],
 V_f , é a velocidade de avanço, [mm/min],
 η , é o rendimento da máquina, [%], e
 K_c , é a pressão específica de corte, [N/mm²].

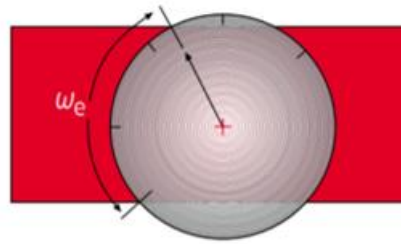
A potência de corte obtém-se em função da pressão específica de corte. Este valor é uma constante influenciada pelo tipo de material da peça, da geometria das ferramentas e da secção da apara, que no caso da fresagem não é constante. Neste caso iremos relacionar a pressão específica de corte em função da espessura média da apara (h_m) na equação (4.2) [22]:

$$h_m = \frac{360 * f_z * a_e}{\pi * D_c * \omega_e} * \sin kr \quad (4.2)$$

Onde:

h_m , é a espessura média da apara, [mm],
 f_z , é o avanço por dente, [mm/dente],
 D_c , é o diâmetro de corte, [mm],
 a_e , é o penetramento de trabalho, [mm],
 ω_e , é o “engagement angle”, [°], e
 K_r , é o “Lead angle” ou ângulo de posição, [°].

O “lead angle” ou ângulo de posição é o ângulo entre a aresta de corte principal da pastilha e a superfície da peça [23], que no caso da fresa de 50 mm são 90°. O “engagement angle” pode ser determinado em função da razão entre o penetramento de trabalho e o diâmetro de corte (a_e/D_c). Através da referência [22] conclui-se que no caso da fresa utilizada resulta um “engagement angle” de 89°, pelo facto do valor a_e/D_c ser 70%, tal como se verifica na Figura 4.16.



Engagement a_e / D_c	Engagement angle ω_e
5%	26°
10%	37°
70%	89°
100%	180°

Figura 4.16 Valor do “engagement angle” [22].

Neste sentido, a espessura média da apara será:

$$hm = \frac{360 \cdot 0,25 \cdot 35}{\pi \cdot 50 \cdot 89} \cdot \sin 90 = 0,23 \text{ [mm]}$$

Então o valor da pressão específica de corte é dado pela espessura média da apara através da equação (4.3) [22]:

$$Kc = \frac{1}{hm^{m_c}} \cdot kc_x \quad (4.3)$$

Onde:

kc_x , é a pressão específica de corte para apara de 1mm de espessura, [N/mm²], e
 m_c , é constante.

Os valores de m_c e kc_x são constantes em função do tipo de material utilizado. Com base em [22] podemos verificar diferentes valores para diferentes tipos de ferro fundido (Figura 4.17). Como nos casos em estudo, o ferro fundido pode ser cinzento ou nodular, os valores utilizados serão os mais elevados.

Cast Iron

ISO	PSM	Material Example	Description	R_m (N/mm ²)	kc_x (N/mm ²)	m_c
K	7	GJL-150	Medium / hard cast iron; Grey cast iron.		1150	0.22
	8	GJL-250	Low-alloy cast iron; Malleable cast iron; Nodular cast iron.		1225	0.25
	9	GJL-350	Difficult high-alloy cast iron; Difficult malleable cast iron; Nodular cast iron		1470	0.30

Figura 4.17 Valores de kc_x e m_c para os diferentes ferros fundidos [22].

Assim, o valor final da força específica de corte será:

$$Kc = \frac{1}{0,23^{0,3}} * 1470 = 2000,56 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

O valor da potência de corte pode então ser determinado pela equação (4.1):

$$Pc = \frac{35*1*2000}{60*10^6*0,9} * 2000,56 = 2,78 \text{ kW}$$

Através da potência de corte e da velocidade de corte consegue-se determinar a força de corte pela equação (4.4):

$$Fc = \frac{Pc}{Vc} * 60000 \quad (4.4)$$

Onde:

Fc, é a força de corte, [N],
Pc, é a potência de corte, [kW], e
Vc, é a velocidade de corte, [m/min].

O valor da força de corte é estimado em 661,3 N. No entanto, decidiu-se incluir um fator de segurança de 1,5 para contemplar possíveis desvios visto os cálculos serem aproximados. Também é necessário ter em consideração o coeficiente de atrito entre a peça e os grampos, pelo que este irá variar consoante o material do fornecedor. A ENERPAC [24] sugere um coeficiente de atrito baixo de 0,12.

A fórmula para o cálculo da força nos grampos será dada pela equação (4.5):

$$F_{grampos} = \frac{Fc * 1,5}{\mu} \quad (4.5)$$

Onde:

F_{grampos}, é a força necessária para os grampos, [N],
Fc, é a força de corte, [N], e
 μ , é o coeficiente de atrito.

Assim a força de fecho do grampo deverá ser 8266,02 [N].

Segundo alguns fabricantes de grampos automáticos, por exemplo a ENERPAC [24], é importante considerar que os sistemas de acionamento (ex. hidráulicos) geralmente operam entre 50 e 75% da sua pressão máxima [25]. Podemos considerar que o sistema de grampos selecionado necessita de uma capacidade total entre 1,33 a 2 vezes mais força do que é necessário. Desta forma, o valor final requerido, em termos de capacidade de força, para o sistema de atuadores hidráulicos deverá apresentar valores entre 10,9 kN e 16,5kN.

O valor final do sistema hidráulico terá de ser dividido pelo número de grampos adequado ao dispositivo a fixar. Vários exemplos de sistemas hidráulicos, incluindo a central hidráulica, para este tipo de aplicações e com capacidade de força necessária, existem disponíveis em várias empresas (i.e. JERGENS [26] ou ENERPAC [24]). No caso particular dos sistemas de fixação em estudo na EFAFLU, poderiam ser incluídos 3 grampos giratórios

(*swing clamps*) com forças de 6 kN por grampo, e uma altura mínima de aplicação para as flanges do corpo da bomba ou da carcaça de 45 mm.

4.1.7 Bucha de aperto automático

Durante a primeira fase de maquinagem foi realizada uma operação de contorno aplicada na flange de aspiração do corpo da bomba, o que permitiu concluir que a força executada pela bucha pneumática pode não ser suficiente para assegurar a correta fixação da peça em condições de maquinagem extremas. Durante a operação de contorno exterior da flange de aspiração, com o objetivo de realizar o desbaste completo da flange com uma única volta circular, verificou-se que a bomba se deslocou da sua fixação inicial. Assim, a otimização das operações de maquinagem e a sugestão de ferramentas que permitam parâmetros de corte superior ficam limitadas, pelo facto da força máxima disponibilizada pela bucha não ser suficiente para garantir a correta fixação do corpo da bomba. Como não existe qualquer informação sobre a bucha aplicada ao CM e, não foi obtida nenhuma resposta após contacto com a empresa que forneceu a bucha (empresa Forkardt) é necessário sugerir um novo modelo de fixação para a máquina CNC.

Desta forma, são apresentados os cálculos para determinar qual será a força de aperto máxima a aplicar na peça de modo a garantir que em condições extremas de maquinagem esta não se movimentará. Com isto, os cálculos foram simulados para a primeira fase de maquinagem, no corpo da bomba, com uma fresa de topo com diâmetro de corte (D_c) igual a 50 mm (representada no Anexo E.1) com parâmetros de corte semelhantes para a flange de aspiração do corpo da bomba. Pela análise dos corpos oriundos do processo de fundição foi considerado que, na flange de aspiração, o valor máximo de penetramento de trabalho (a_e) a aplicar é de 5 mm. Os parâmetros utilizados por esta ferramenta no desbaste do contorno da flange encontram-se representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Parâmetros de corte utilizados no contorno em desbaste da flange de aspiração do corpo da bomba.

<i>Parâmetros de corte</i>	<i>Valores utilizados</i>	<i>Dimensões</i>
<i>Profundidade de corte axial, a_p</i>	25	[mm]
<i>Penetramento de trabalho, a_e</i>	5	[mm]
<i>Número de dentes, Z</i>	5	
<i>Velocidade de avanço, V_f</i>	540	[mm/min]
<i>Frequência de rotação, n</i>	1500	[rot/min]
<i>Velocidade de corte, V_c</i>	235,5	[m/min]
<i>Avanço por dente, f_z</i>	0,072	[mm/dente]

De um modo semelhante à projeção dos grampos de aperto automático, será determinada a força de corte através de uma aproximação da potência de corte na operação de contorno em desbaste. A força de corte pode ser obtida determinando primeiro a potência de corte, dada pela expressão (4.6) [22].

$$P_c = \frac{ae \cdot ap \cdot V_f}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta} * K_c \quad (4.6)$$

Onde:

P_c , é a potência de corte, [kW],
 ae , é o penetramento de trabalho, [mm],
 ap , é a profundidade de corte axial, [mm],
 V_f , é a velocidade de avanço, [mm/min],
 η , é o rendimento da máquina, [%], e
 K_c , é a pressão específica de corte, [N/mm²].

Também neste caso a potência de corte pode ser determinada em função do fator de proporcionalidade designado por força específica de corte, relacionada em função da espessura média da apara (hm). Segundo o catálogo da Palbit S.A. a espessura média da apara é dada pela expressão (4.7).

$$hm = \frac{360 \cdot fz \cdot ae}{\pi \cdot D_c \cdot \omega_e} * \sin kr \quad (4.7)$$

Onde:

hm , é a espessura média da apara, [mm],
 fz , é o avanço por dente, [mm/dente],
 D_c , é o diâmetro de corte, [mm],
 ae , é o penetramento de trabalho, [mm],
 ω_e , é o “Engagement angle”, [°], e
 K_r , é o “Lead angle” ou ângulo de posição [°].

Segundo a empresa de ferramentas [23], “lead angle” ou ângulo de posição é o ângulo entre a aresta de corte principal da pastilha e a superfície da peça. No caso da fresa de topo utilizada, as pastilhas irão realizar um ângulo de 90° com a superfície lateral do contorno. O ângulo de corte pode ser determinado em função do valor entre a profundidade radial de corte e o diâmetro de corte (ae/D_c). Recorrendo novamente ao catálogo de ferramentas da empresa Palbit é possível descobrir que no caso da fresa utilizada este será 26°, pelo facto do valor ae/D_c ser 5%, tal como se verifica na Figura 4.16.

Neste sentido o cálculo da espessura média da apara será:

$$hm = \frac{360 \cdot 0,072 \cdot 5}{\pi \cdot 50 \cdot 26} * \sin 90 = 0,032 [mm]$$

O valor da força específica de corte é dado pela espessura média da apara através da fórmula (4.8) [22]:

$$K_c = \frac{1}{hm^{m_c}} * kc_x \quad (4.8)$$

Onde:

kc_x , é a pressão específica de corte para apara de 1mm de espessura, [N/mm²], e
 m_c , é constante.

Os valores de mc e kc_x são constantes em função do tipo de material utilizado. Na figura 4.17 podemos verificar os valores dados em função do ferro fundido. Como nos casos em estudo o ferro fundido pode ser cinzento ou nodular, serão considerados os valores que garantem uma força específica de corte mais elevada, e consequentemente forças de corte maiores.

Assim, o valor final da força específica de corte será:

$$Kc = \frac{1}{0,0317^{0,3}} * 1470 = 4139,99 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

O valor da potência de corte pode então ser determinado pela equação (4.6):

$$Pc = \frac{5*25*540}{60*10^6*0,9} * 4139,99 = 5,175 \text{ kW}$$

Através da potência de corte e da velocidade de corte na ferramenta consegue-se determinar a força de corte executada tal como demonstra a equação (4.9) [22]:

$$Fc = \frac{Pc}{Vc} * 60000 \quad (4.9)$$

Onde:

F_c , é a força de corte, [N],
 P_c , é a potência de corte, [kW], e
 V_c , é a velocidade de corte, [m/min].

O valor da força de corte é estimado para 1318,47 N. No entanto, decidiu-se incluir um fator de segurança de 1.5 para contemplar possíveis desvios visto os cálculos se basearem numa aproximação do valor real. Também é necessário ter em consideração o coeficiente de atrito entre a peça e os grampos pelo que este irá variar consoante o material do fornecedor. A Enerpack [25] sugere coeficiente de atrito de 0,12 pelo que a fórmula será:

$$F_{aperto} = \frac{Fc * 1,5}{\mu} \quad (4.10)$$

Onde:

F_{aperto} , é a força necessária para o sistema de fixação, [N],
 F_c , é a força de corte, [N], e
 μ , é o coeficiente de atrito.

A força total a suportar pelo conjunto será 16,5 [KN]

Existem diversos modelos de buchas, dos mais variados tamanhos, que permitem realizar forças superiores à calculada, sejam estas buchas pneumáticas, hidráulicas, elétricas ou magnéticas. No entanto, para selecionar o melhor método de fixação teremos que considerar a força disponível na empresa para a sua atuação, evitando a compra de sistemas auxiliares para fornecimento de energia. O único tipo de energia disponível na empresa para acionamento automático é a energia pneumática de rede da fábrica que disponibiliza uma pressão máxima de 8 bar. Em função desta pressão é possível sugerir uma nova bucha pneumática que visa a

substituição da bucha antiga adaptada na máquina, garantindo a correta fixação da peça. Como exemplo referem-se buchas da empresa SMW AUTOBLOK do modelo SP inerente à marca [30]. Segundo o catálogo do fabricante, o modelo SP caracteriza uma gama de bucha pneumáticas de 3 grampos, de diâmetros entre 125 e 350 mm e a uma pressão de 6 bar estes modelos podem apresentar forças de aperto máximas (sem velocidade de rotação associada à bucha) que variam desde 20KN até 88KN. Desta forma, este poderia ser um modelo aplicável ao centro de maquinagem da EFAFLU pelo que será necessário avaliar posteriormente a sua vantagem caso haja interesse por parte da empresa.

4.2 Elaboração dos programas de maquinagem

Para além dos sistemas de fixação também os procedimentos e métodos usados para elaborar os programas de maquinagem para as várias operações, de cada uma das peças analisadas, foi alvo de estudo. O objetivo passa por propor soluções que possam diminuir o tempo de elaboração, simulação, teste e validação dos programas CN. Incluem-se neste estudo os programas para utilização da sonda para medição. É utilizada como alternativa à programação *online* um sistema de CAM (*Mastercam*) que permite o desenvolvimento dos programas em *offline* e ainda a simulação de um 4º eixo para rotação da peça, com vista a avaliar essa possibilidade do centro de maquinagem.

Programação automática da sonda

O primeiro exemplo de programação analisado será a sonda Renishaw. Tal como referido, este instrumento ajuda o operador pela facilidade com que se podem identificar as coordenadas do zero peça e inseri-las automaticamente no controlador da máquina. No processo atual, para a sua utilização é indispensável que no início de cada operação de maquinagem, quando há alteração da fixação da peça, o operador desloque a ponta da sonda até ao local pretendido utilizando o volante eletrónico de comando manual e selecione o subprograma associado à medição.

Pela análise dos manuais fornecidos pela Renishaw, foi possível verificar que este procedimento pode ser automatizado. Esta automatização como é definida, consiste no movimento da sonda para o local onde se pretende realizar a medição, sem a ajuda do operador. Com o processo automatizado, a sonda deslocar-se-ia desde o ponto zero da máquina, ou outro qualquer valor de referência definido no controlador, até ao local da peça onde se pretende realizar a medição. Nesse local o sensor da sonda iria contactar com as paredes da peça e realizar a medição da origem do referencial para iniciar a maquinagem (zero peça). O valor da origem do referencial seria guardado no controlador para a realização do programa de maquinagem seguinte. Após realizar a medição, a sonda desloca-se até à posição de mudança de ferramenta para realizar a troca no *ATC* como se fosse uma ferramenta. Nesse momento iria iniciar o programa de maquinagem para a peça escolhida. Todas estas etapas seriam realizadas automaticamente, sem qualquer ajuda do operador.

Nos casos em que apenas é necessário identificar uma vez, em cada fixação, o zero peça, este método não é muito vantajoso. No entanto, foi verificado que na maioria dos casos o operador retira o zero peça antes de iniciar um programa completo de maquinagem, devido à posição das peças variarem ligeiramente quando ocorre a troca entre peças e também devido a estas serem oriundas do processo de fundição ou seja o zero peça pode variar ligeiramente de peça para peça. Nestes casos, em que há a utilização da sonda em todas as peças do lote de peças, a automatização da utilização da sonda seria um processo vantajoso.

Destacam-se alguns pontos a ter em consideração para a programação automática da sonda.

- A programação da sonda consiste apenas numa linha de programação usando códigos e instruções específicas (ex. Figura 4.18);
- Essa linha de código pode ser incorporada num programa de maquinagem ou num subprograma que pode ser utilizado num programa principal;
- A definição da origem do sistema de coordenadas associada à peça (zero peça), relativamente ao sistema de coordenadas da máquina, é um pré-requisito para automatizar a execução do programa de maquinagem de cada peça, uma vez que todas as coordenadas de um programa CN são normalmente referidas ao zero peça;
- A sonda movimenta-se automaticamente para a posição desejada de acordo com os valores introduzidos nas instruções de movimentação (códigos X, Y e Z). Estes valores são relativos à origem do sistema de coordenadas definido anteriormente;
- O valor do zero peça é atualizado em cada medição pela sonda;
- No final do ciclo, em função do valor associado à instrução C, a sonda retorna à posição de segurança pré-definida (C1), mantendo-se preparada para efetuar uma nova medição, ou à posição zero da máquina (C0) concluindo o ciclo de medição; se a instrução C não for utilizada, fica definido por defeito o modo manual, situação atual.

Apesar da variedade de códigos ou instruções associadas às funções da sonda (Anexo B), no caso dos produtos da EFAFLU utiliza-se geralmente, o ciclo “furo de sonda”. Através da inclusão de uma linha de código semelhante à da Figura 4.18 no código de maquinagem, a identificação do zero peça fica automatizada e pode ser feito sempre que haja necessidade.

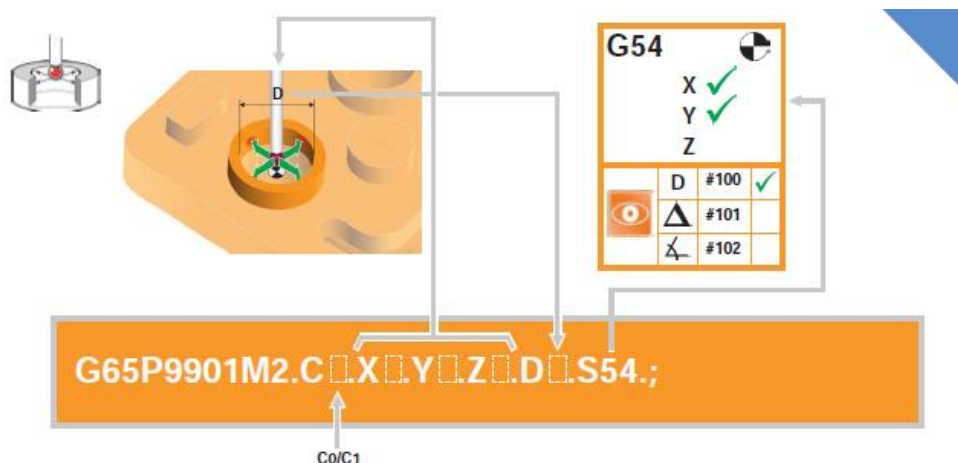


Figura 4.18 Código automático “furo de sonda” [18].

No código da figura, os valores de X, Y e Z representam o ponto de destino da sonda, e é nesta posição onde se inicia o ciclo de medição da peça. A sonda parte da posição do zero máquina ou desde o ponto definido pela última medição, para os valores definidos em X, Y e Z, em movimento rápido (código G00) realizando, posteriormente, a medição da peça em velocidade de trabalho (código de interpolação linear G01).

No caso da EFAFLU, de modo a evitar erros no deslocamento da sonda para o local de medição, é preferível que o operador continue a retirar o zero da primeira peça em modo manual e as restantes peças em modo automático, evitando possíveis colisões durante a deslocação para

o local de medição. Para isso, tal como no método manual, o operador define uma posição de segurança acima do local de medição, geralmente $Z=10\text{mm}$. Os valores de X e Y seriam atualizados a cada medição pela sonda pela instrução S54 (Figura 4.18) e correspondem ao ponto zero da peça. Assim, numa mesma série de peças, os valores de X e Y seriam constantemente atualizados no início de cada programa de maquinagem, e o valor da cota em Z do ponto de retorno, seria o mesmo para todas as peças, tal como está a ser realizado atualmente.

Como exemplo, iremos analisar a flange de aspiração de uma bomba TGCL que apresenta um diâmetro interno de 50mm . O código incluído no programa de maquinagem seria o seguinte:

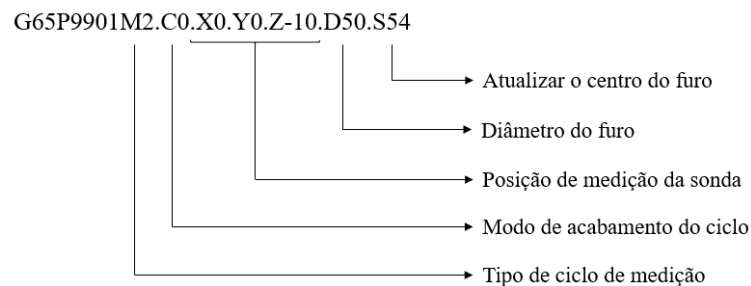


Figura 4.19 Exemplo de código para programar automaticamente a sonda.

Com a inclusão deste código no início da maquinagem, numa série de 10 peças o operador realiza apenas uma medição manual com a sonda ao contrário do método utilizado atualmente em que necessita de efetuar a medição manual para cada peça, ou seja, 10 vezes. Com isto se conclui que, no caso de um grande lote de peças, é preferível utilizar a configuração automática da sonda.

Devido à ocupação quase permanente, não foi possível testar este método diretamente no centro de maquinagem. Esta possibilidade de programar a utilização da sonda pode ser vantajosa apesar de, com os novos métodos de fixação criados, se ter procurado reduzir a necessidade de identificar o zero peça. Por um lado, pode ser explorada para fazer a verificação de variações de posicionamento devidas às alterações de forma nas peças de fundição. Pode ainda ser utilizada para verificação do desgaste de ferramentas entre utilizações na máquina. Por outro lado, a EFAFLU não produz apenas bombas e carcaças no centro de maquinagem pelo que a automatização da sonda poderá ser uma enorme vantagem nos restantes produtos da empresa.

4.2.1 Utilização do Software CAM para otimizar os programas de maquinagem

A consideração de alternativas à programação *online* justifica-se por vários motivos. Por um lado, permite o desenvolvimento de programas com um mínimo de interferência na utilização da máquina para produção. Por outro lado, permite também comparar de forma expedita diferentes estratégias para cada uma das operações de maquinagem. Não tendo sido adquirido o simulador para PC da Mitsubishi nem tendo sido possível dispor de uma versão temporária para avaliação, optou-se pela alternativa dos *softwares* CAM genéricos existentes no mercado e avaliar as possíveis vantagens da sua utilização, tendo em conta o centro de maquinagem e os produtos fabricados na empresa, nomeadamente as bombas centrífugas.

Para ser possível realizar os testes no *software* CAM é necessário um modelo das peças em formato digital CAD 2D ou 3D, tanto da peça final, após maquinagem, como da peça inicial, vinda da fundição. Os ficheiros da peça final já se encontram disponibilizados pela empresa no formato do sistema de CAD 3D usado na fase de projeto (PTC CREO 3.0). Para obter o modelo da peça fundida foi necessário recriar o bruto de fundição em ficheiro CAD 3D. Para tal, foram realizadas medições numa série de 10 peças para a bomba TGCL 100-200 100L e para a respetiva carcaça a partir das quais se geraram os respetivos modelos (Anexo C.1) utilizando o *software* PTC CREO 3.0. Concluiu-se que os valores de material a retirar por maquinagem variam de 2 a 4 milímetros. Tendo os modelos das peças neste formato torna-se conveniente garantir que o *software* CAM a analisar como alternativa para a empresa consiga incorporar os ficheiros criados no *software* PTC CREO.

Após uma pesquisa de soluções CAM, a escolha recaiu no *Mastercam* que é um dos *softwares* mais utilizados a nível mundial, tendo sido possível obter uma licença temporária da versão mais recente (*Mastercam* 2019), para avaliação e realização de testes com as peças escolhidas. Nas opções de importação de ficheiros de peças está prevista uma enorme variedade de formatos, inclusive ficheiros Part Creo, o que possibilitou a importação direta dos modelos das peças criadas anteriormente para o *software Mastercam*.

No *Mastercam*, para além da necessidade dos modelos geométricos que definem as peças é necessário selecionar em primeiro lugar a máquina para se poder escolher as estratégias de maquinagem. Esta seleção é feita a partir dos modelos de máquinas (“Machine”) disponíveis no *software* e que incluem não só uma especificação associada à estrutura da máquina (i.e. nº de eixos) mas também o pós-processador necessário para converter o programa de CN no formato específico da máquina utilizada, a partir de um formato genérico (ex. CLDATA file). A versão do *Mastercam* disponibilizada incluía um pós-processador para o controlador Mitsubishi da série M70 utilizado para o CM Akira-Seiki Performa Classic V6 XP.

A importação do modelo da peça inicial (formato *.stl) vai definir no *Mastercam* o “Stock Setup” (Figura 4.20), isto é o material de partida. O modelo da peça final vai definir os limites para a remoção de material através das operações de maquinagem escolhidas. Os elementos geométricos dos modelos servirão para escolher, orientar e limitar os movimentos associados a cada estratégia, de uma forma interativa, gráfica, a partir das opções disponíveis no *Mastercam* para as estratégias de maquinagem. Na Figura 4.20 é possível verificar a inclusão do modelo da peça fundida no *Mastercam* para o caso do corpo da bomba TGCL100L.

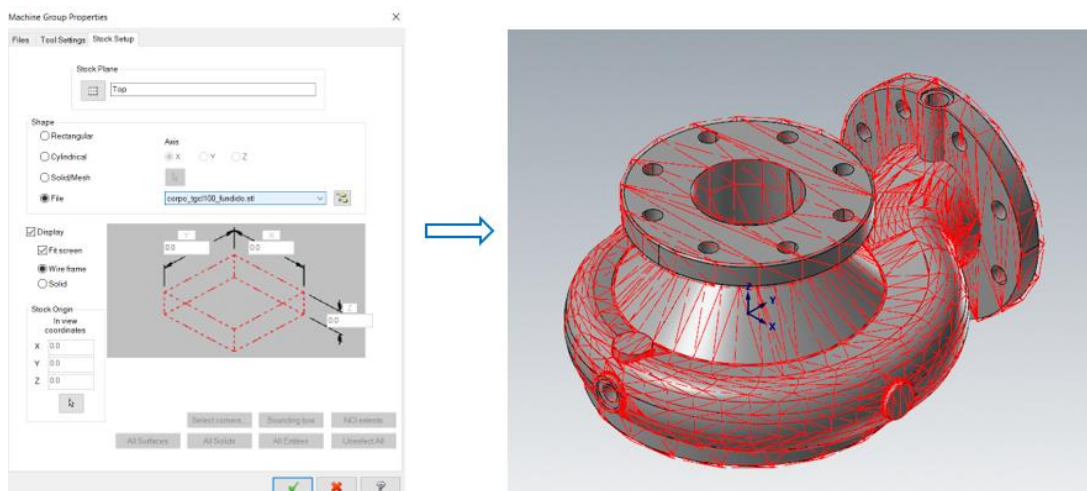


Figura 4.20 Inclusão do Stock Setup no *Mastercam* (bomba TGCL100L).

A figura identifica a bomba no seu formato final enquanto o *stock setup*, restringido pelas dimensões do fundido, é identificado a vermelho. Como ambos os ficheiros foram criados a partir do mesmo plano, estes valores de stock serão ajustados automaticamente à peça inicial.

Neste caso o zero peça está posicionado no interior da bomba, mas este valor pode ser alterado no *Mastercam* de acordo com a etapa de maquinagem a realizar.

Numa primeira fase do trabalho simulou-se todas as operações realizadas atualmente pelo centro de maquinagem da empresa, no fabrico de corpos de bombas e carcaças. Para que seja possível testar os percursos efetuados pelas ferramentas é necessário importar para o *software* todas as ferramentas usadas nos processos de maquinagem, bem como os parâmetros de corte que estão definidos no controlador da máquina. Foi, então, criada uma biblioteca de ferramentas (Figura 4.21) onde se incluíram todas as ferramentas, com os respetivos parâmetros e dimensões, utilizadas no centro de maquinagem para o fabrico das duas peças. Todas as dimensões foram retiradas dos catálogos das próprias ferramentas, adicionando-se também as velocidades utilizadas no centro de maquinagem, criando um total de 23 ferramentas de corte.

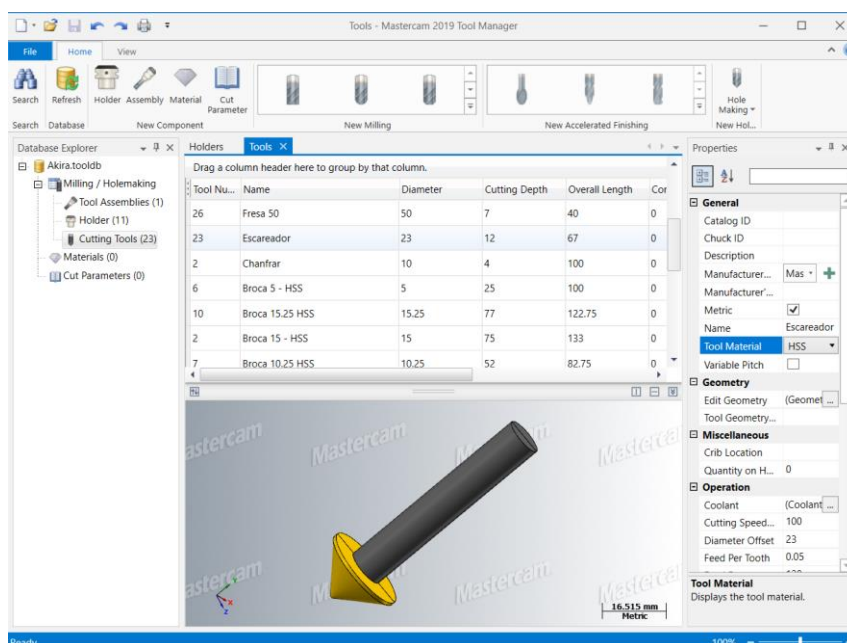


Figura 4.21 Criação de lista de ferramentas.

Assim, através dos ficheiros CAD e com as ferramentas corretamente estruturadas é possível reproduzir de uma forma equivalente todos os processos de maquinagem executados na máquina *Akira-Seiki* para as duas peças em estudo. O objetivo era verificar a compatibilidade entre os tempos retirados virtualmente pelo *software* CAM e os tempos reais analisados na máquina. Por outro lado, também se decidiu refazer os percursos de maquinagem com o intuito de realizar uma análise crítica aos métodos utilizados, verificar as vantagens deste *software* face ao controlador e, por último, realizar testes de novas ferramentas. Os tempos retirados de cada operação do *Mastercam* foram registados e comparados com os tempos reais do corpo da bomba e da carcaça (tempos reais disponíveis no Anexo A). Para as mesmas condições, os tempos verificados no *Mastercam* são semelhantes aos tempos reais pelo que se conclui que os programas utilizados no controlador têm em consideração o trajeto mais curto possível para a ferramenta.

Na Figura 4.22, verifica-se que para realizar a maquinagem completa do corpo de uma bomba é necessário realizar 35 operações de maquinagem. Os ciclos executados organizam-se em 3 grupos dos quais se destacam:

- contornos, incremental no plano XY ou em profundidade (ciclo *contour 2D*); em rampa (ciclo *ramp contour*); para chanfros (ciclo *contour 2D chanfer*);
- furações, direta e incremental em profundidade (ciclo *simple drill* e *peck drill*);

- roscagem (ciclo *tap*).

Todos os ciclos utilizados enquadram-se na categoria de maquinagem 2D disponível no *Mastercam*.

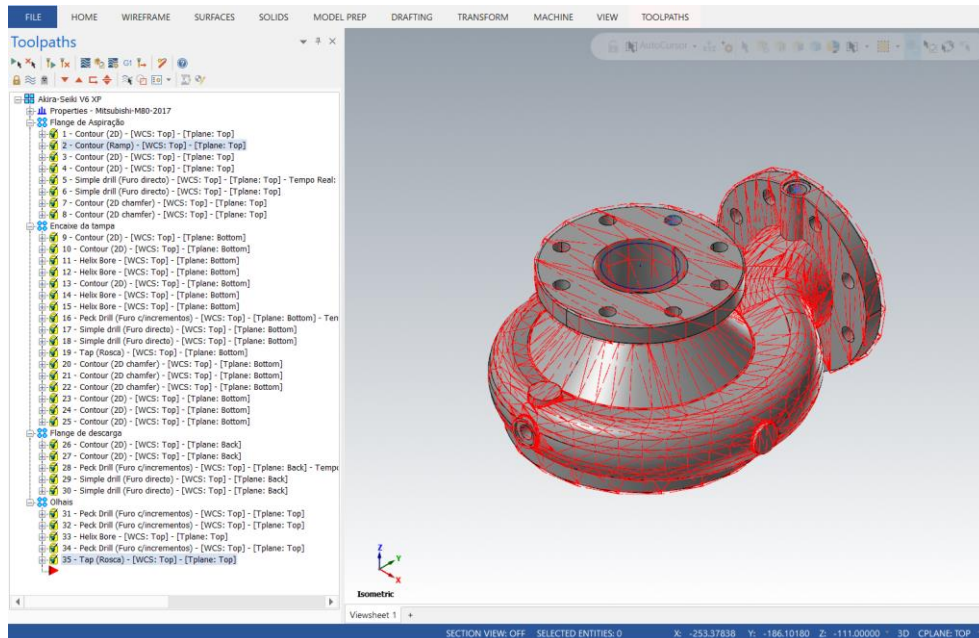


Figura 4.22 Operações realizadas no *Mastercam*.

O número de operações aplicadas no fabrico global de uma bomba é considerável o que leva a reconhecer o tempo demorado na programação completa de uma peça através do controlador. Durante o estudo do centro de maquinagem verificou-se que na criação de um novo programa para o corpo de uma bomba é despendido no mínimo 1h de produção para realizar a programação completa da peça. Este tempo elevado de programação realça o interesse em dispor de um modo de programação *offline* na empresa.

Os resultados finais da maquinagem são simulados e apresentados na Figura 4.23.

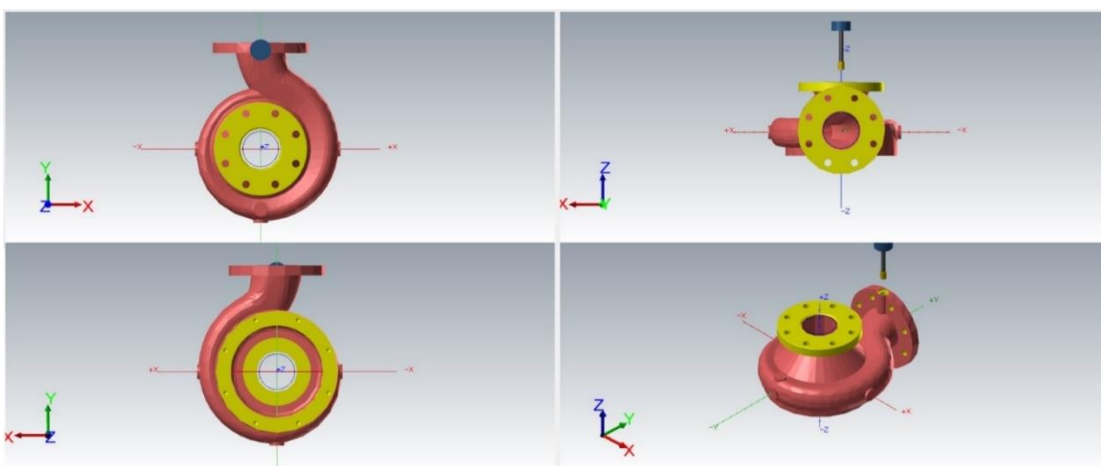


Figura 4.23 Simulação da maquinagem da bomba TGCL 100.

No Anexo C observa-se o mesmo conjunto de operações realizado para a carcaça da bomba pelo que se conclui da existência de 37 operações para a carcaça. Como se pretendia demonstrar

as operações de maquinagem do CM, optou-se por não contabilizar as operações realizadas pelo torno vertical pelo que não se encontra representada a maquinagem da parte interna da carcaça.

Através dos valores obtidos para cada maquinagem e verificados na tabela de tempos no Anexo A (Tabela A.1 e Tabela A.2) conclui-se que as operações de maquinagem mais demoradas são o facejamento e os contornos. Recorrendo às funcionalidades do *Mastercam* iremos verificar as vantagens de cada uma destas operações face ao controlador da máquina.

A variedade de estratégias para os percursos de ferramentas disponibilizados pelo *Mastercam*, em particular para maquinagem 2D, permite tirar proveitos nas operações de facejamento e contornos. As restantes operações de furação, escareamento, chanfragem, e roscagem também apresentam vantagens devido ao trajeto percorrido pela ferramenta ser realizado da forma mais rápida.

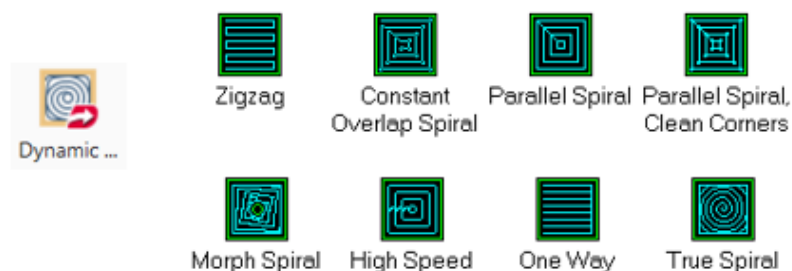
Por forma a avaliar os diversos ciclos de trabalho disponibilizados pelo *software* a nível do facejamento e contornos, recorreu-se a duas ferramentas existentes na empresa. Na Tabela 4.3 encontram-se os dados das duas ferramentas disponíveis na empresa para realizar as operações de facejamento e contornos bem como os parâmetros de corte utilizados.

Tabela 4.3 Ferramentas utilizadas nos testes *Mastercam*.

<i>Ferramenta</i>	<i>Diâmetro Ferramenta</i>	<i>Vel. Avanço [mm/min]</i>	<i>Vel. Rotação [rpm]</i>	<i>Vel. Corte do catálogo [m/min]</i>	<i>Material</i>
<i>Fresa de pastilhas</i>	50	2000	1600	251	EN-GJL-250
<i>Fresa de topo</i>	16	1500	5000	251	EN-GJL-250

Facejamento *Mastercam*

No primeiro caso decidiu-se avaliar as vantagens do processo de facejamento em função dos diferentes percursos disponibilizados pelo *Mastercam*. Para tal utilizou-se a mesma ferramenta de facejar tanto em desbaste como acabamento, a fresa de diâmetro 50 mm. A percentagem máxima de penetramento de trabalho que se encontra inserida no controlador, para este tipo de ferramenta, é 70% do diâmetro total, o que equivale a valores máximos de 35 mm. Tendo em consideração estes parâmetros, foram simulados 9 percursos disponibilizados pelo *software* CAM para o facejamento em desbaste, destacados na Figura 4.24, e comparados com o processo atual de múltiplos contornos descrito na Figura 22 do Capítulo 3.

Figura 4.24 Percursos de facejamento no *Mastercam*.

Para todos os percursos considerou-se uma profundidade de corte de 0,8mm e com excesso de material máximo de 4mm a retirar ao fundido. Os tempos observados apenas incluem o facejamento em desbaste, reservando 0,1mm para a operação de acabamento. As condições de corte (“*feed rate*”, “*spindle speed*”, “*plunge rate*” e “*retract rate*”) são constantes em todos os percursos de modo a que o tempo indicado em cada caso permita determinar qual o tipo de percurso de maquinagem mais indicado para a operação de desbaste. Através da Tabela 4.4 analisam-se os tempos de cada operação comparativamente com o tempo de contorno 2D executado atualmente pela empresa. De realçar que apenas se considerou o facejamento em desbaste de modo a comparar de uma forma clara os resultados para os diferentes percursos realizados com a mesma ferramenta.

Tabela 4.4 Tempo [min:seg] de facejamento usando percursos *Mastercam* – Bombas TGCL (* solução atual).

Nº	Operação de maquinagem	Flange de aspiração	Interior da bomba	Flange de descarga
1	Contorno 2D*	05:45	05:08	05:46
2	ZigZag	03:37	05:10	03:28
3	Constant Overlap Spiral	03:50	05:42	03:20
4	Parallel Spiral	03:22	05:18	03:23
5	Parallel Spiral Clean Corners	03:24	05:24	03:24
6	Morph Spiral	05:15	05:22	05:03
7	High Speed	03:26	05:13	03:26
8	One Way	05:37	07:14	04:32
9	True Spiral	03:24	05:10	03:22
10	Dynamic mill	03:18	05:02	03:16
Variação máxima		02:27	00:06	02:30

Verifica-se que, utilizando os mesmos parâmetros de corte, a maioria dos ciclos disponibilizados pelo *Mastercam* é realizado em tempo inferior ao contorno 2D utilizado na empresa. Como as faces da bomba a maquinar apresentam uma geometria circular, verifica-se que a maior vantagem do facejamento são os ciclos em espiral designados no *Mastercam* por “True Spiral” e o “Dynamic Contour” que permitem reduções até 2 minutos e 30 segundos

aplicados nas flanges. Um exemplo da aplicação dos ciclos em espiral na flange de aspiração encontra-se na Figura 4.25.

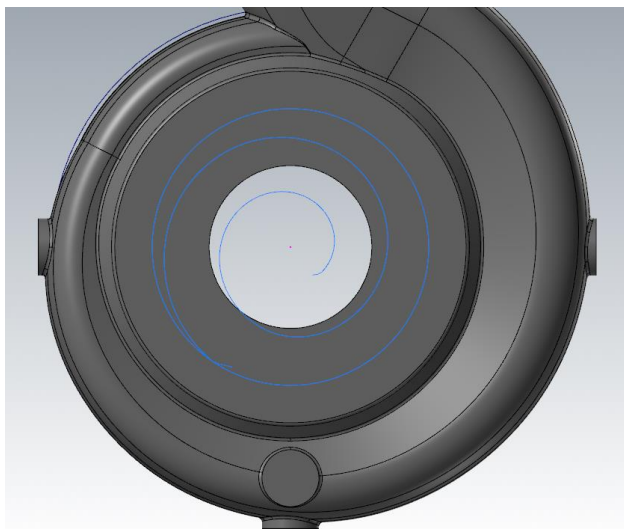


Figura 4.25 Trajeto percorrido pela fresa no ciclo “Dynamic Contour”.

No caso do interior da bomba como a largura da superfície a facejar é muito reduzida, os tempos de contorno em espiral não são tão vantajosos como no caso das flanges. No entanto, apesar da redução de tempo ser menor, continua a existir vantagem na aplicação de percursos em espiral. Todos os percursos de facejamento aplicados à bomba estão disponíveis no anexo C.

Os mesmos percursos foram testados na maquinagem da carcaça do motor. Foram analisadas as vantagens das 9 trajetórias do *Mastercam* em relação à superfície de conexão com a tampa do motor e a caixa de terminais. Não se realizou o facejamento na parte interna da carcaça devido a ser uma operação executada no torno vertical e ainda não existirem ferramentas disponíveis no centro de maquinagem para comparar os ganhos do *Mastercam*. No entanto, este tema será abordado nas próximas secções, na sugestão de ferramentas para o centro de maquinagem (Secção 4.4).

Para melhor compreensão das vantagens do *Mastercam* face ao processo atual no controlador, continuaram-se a utilizar os mesmos parâmetros de corte para o facejamento em desbaste, com uma profundidade de corte de 0,8 mm e com 4 mm de sobresspessura a retirar. Os valores encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Tempo [min:seg] de facejamento usando percursos *Mastercam* – Carcaças TGCL (* solução atual).

<i>Nº</i>	<i>Operação de maquinagem</i>	<i>Tampa do motor</i>	<i>Caixa de terminais</i>
1	Contorno 2D*	05:28	06:36
2	ZigZag	04:42	03:54
3	Constant Overlap Spiral	05:20	04:02
4	Parallel Spiral	05:20	04:48
5	Parallel Spiral Clean Corners	05:14	04:56
6	Morph Spiral	07:15	05:17
7	High Speed	05:14	04:08
8	One Way	06:43	04:45
9	True Spiral	04:12	03:20
10	Dynamic mill	03:25	03:05
<i>Variação Máxima</i>		02:03	03:31

Novamente se conclui que, através da utilização dos mesmos parâmetros de corte e com uma percentagem de diâmetro de corte da ferramenta de 70%, é possível encontrar vários ciclos disponibilizados pelo *Mastercam* cujas vantagens são superiores ao contorno 2D utilizado atualmente. Em destaque encontra-se novamente o ciclo dinâmico em espiral para as geometrias circulares como é o caso da tampa do motor.

Nos casos em que a geometria a maquinar não é circular, como acontece na caixa de terminais, os restantes ciclos de facejamento têm vantagens mais notórias do que nas geometrias circulares. Na caixa de terminais destaca-se o ciclo em “Zig-Zag” e o ciclo “Constant Overlap Spiral”, representados na Figura 4.26.

Apesar do tempo dado no *Mastercam* ser uma aproximação ao valor real, é necessário realizar testes para cada ciclo de forma a prever qual o tipo de ciclo mais conveniente. Também é necessário ter em atenção as vibrações geradas na peça bem como o desgaste da ferramenta utilizada.

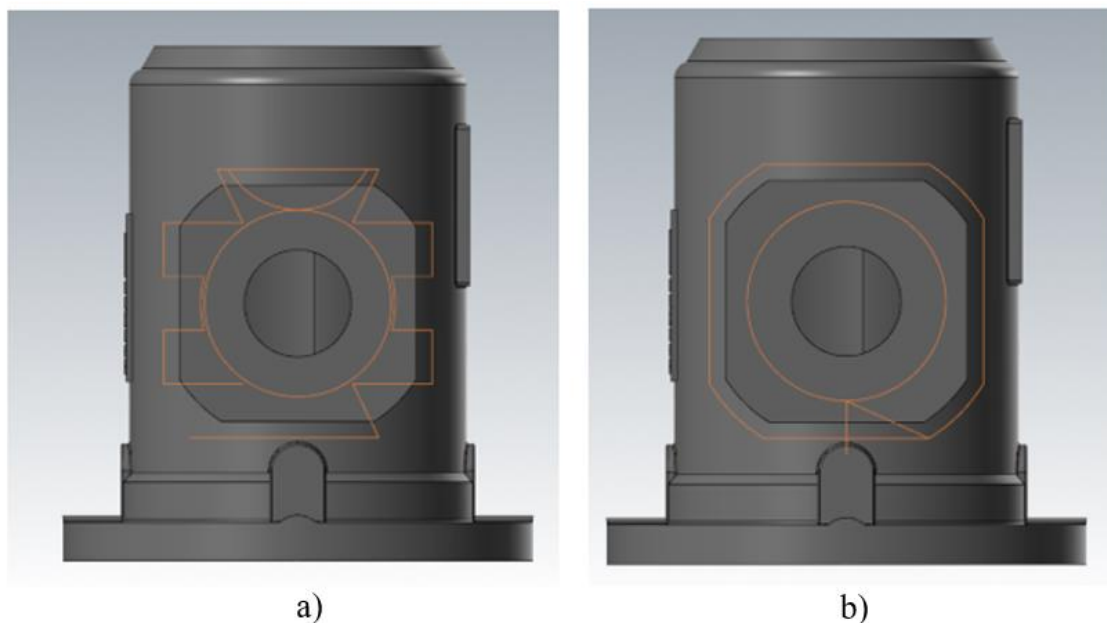


Figura 4.26 Estratégias de maquinagem *Mastercam* aplicadas à caixa de terminais: a) Zig Zag; b) Constant Overlap Spiral.

Apesar dos valores observados apenas terem em consideração as bombas e as carcaças, existem diversos produtos de menores dimensões, com geometrias complexas na empresa. Assim, estes percursos de maquinagem também poderiam ser estudados para aplicação aos restantes produtos fabricados no centro de maquinagem.

Contornos *Mastercam*

Em relação aos contornos nas peças em estudo estes podem ser simulados em *Mastercam* através de 4 modos distintos. O contorno 2D incremental em Z e o contorno em rampa que são os dois tipos de contornos disponíveis no controlador da máquina. Neste caso iremos utilizar a mesma ferramenta utilizada nos facejamentos, ou seja, a fresa de 50 mm. O contorno em rampa é realizado com uma profundidade de rampa de 1mm, assim como o contorno incremental que realiza passagens sucessivas de 1mm na direção do eixo Z.

Para o tipo de operações realizadas nas bombas, o *Mastercam* contém ainda dois novos ciclos que não se encontram disponíveis no controlador da máquina, sendo estes o contorno oscilante e o contorno dinâmico. No contorno oscilante, a ferramenta realiza o contorno selecionado, mas simultaneamente irá oscilar no eixo Z de forma a remover facilmente a apara.

No caso do contorno dinâmico existe a particularidade de se utilizar todo o comprimento de corte da ferramenta para realizar o contorno. Desta forma, este será o ciclo com maior eficiência do *Mastercam* mas obriga a utilização de uma ferramenta com uma largura de corte (ap) elevada. Para isso, iremos utilizar a fresa de topo de metal duro, disponível na empresa, com um diâmetro 16 mm e um comprimento de corte de 32 mm (Figura 3.15 c)). De modo a não causar demasiados esforços na ferramenta são realizadas múltiplas passagens no contorno, com um comprimento radial de corte máximo de 0.5 mm ao longo de toda a altura do contorno. Os valores para cada contorno encontram-se definidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Tempo dos diferentes contornos aplicados à bomba TGCL 100-200 100L.

<i>Nº</i>	<i>Operação</i>	<i>Diâmetro Ferramenta</i>	<i>Flange aspiração</i>	<i>Flange descarga</i>	<i>Interior da bomba</i>
1	Contorno 2D incremental	50	09:18	9:07	05:30
2	Contorno em Rampa**	50	09:11	9:02	05:28
3	Oscilante	16	05:36	05:26	-
4	Dynamic Contour	16	05:07	05:04	05:38
<i>Variação Máxima</i>			04:04	04:03	00:00

Com a utilização de duas ferramentas aplicadas em percursos de maquinagem diferentes é difícil contabilizar a vantagem dos percursos de maquinagem face ao desgaste associado à ferramenta ou às suas pastilhas. No entanto, com a ferramenta de corte adequada verifica-se que a utilização do ciclo dinâmico é uma mais valia na redução do tempo dos contornos das flanges de aspiração e descarga. O ciclo dinâmico adapta-se à geometria da peça reduzindo os tempos de trabalho em vazio e reduzindo o desgaste da ferramenta. No caso das flanges, devido à sua geometria circular, o ciclo dinâmico cria um percurso em espiral com um penetramento de trabalho máximo de 0.5 mm como se verifica na Figura 4.27.

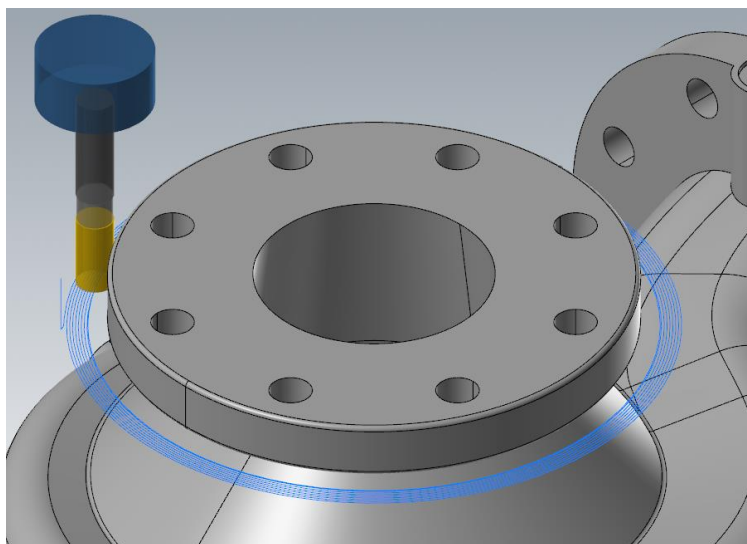


Figura 4.27 Contorno dinâmico aplicado à flange de aspiração – Bomba TGCL 100-200 100L.

Relativamente à maquinagem na parte interna da bomba, devido à elevada profundidade dos contornos no interior da bomba apenas se considerou o contorno realizado na parte superior da bomba. Neste caso verifica-se que o método em rampa continua a ser a opção favorável devido à excessiva quantidade de material a retirar no interior da bomba.

Os testes com o ciclo oscilante não foram realizados pois caso a ferramenta se movimente ao longo do eixo Z irá colidir com a peça a maquinar. Assim, o ciclo oscilante só pode ser realizado em contornos exteriores como é o caso das flanges de aspiração e descarga da bomba.

Os mesmos percursos da ferramenta foram testados na carcaça do motor e os tempos globais encontram-se representados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Tempo dos contornos em *Mastercam* aplicados à carcaça TGCL100L (*solução atual).

Nº	Operação	Diâmetro Ferramenta	Tampa do Motor	Caixa de terminais
1	Contorno 2D incremental	50	04:23	05:47*
2	Contorno em Rampa	50	04:08*	05:20
3	Oscilante	16	04:52	04:24
4	Dynamic Contour	16	04:37	04:03
Variação Máxima			00:00	01:44

Relativamente à tampa do motor o tempo obtido no contorno dinâmico é superior ao contorno em rampa devido à largura de corte da ferramenta não ser suficiente para realizar o desbaste do contorno numa só passagem. Com esse efeito é necessário realizar dois contornos para concluir o desbaste do furo interior, tal como se observa na Figura 4.28.

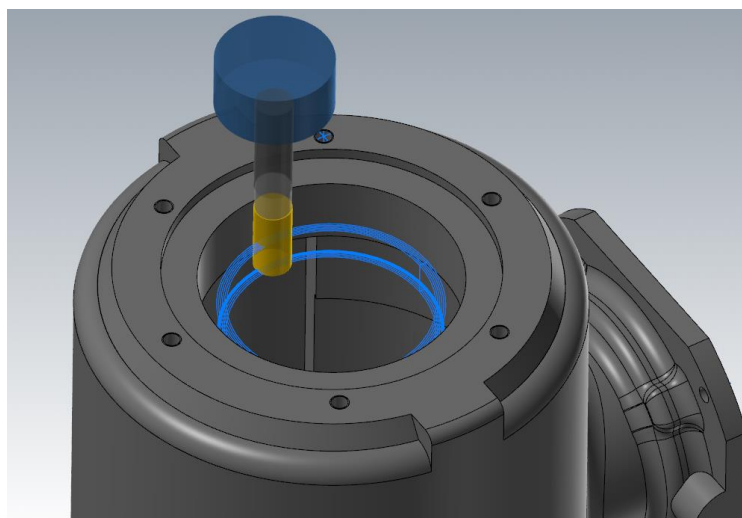


Figura 4.28 Contorno dinâmico na tampa do motor .

De modo a reduzir o tempo nesta operação poderíamos aumentar a largura de corte no contorno dinâmico, no entanto, o desgaste associado à fresa de topo seria superior. O método em rampa utilizado atualmente pode então ser uma boa alternativa para este tipo de contorno.

Relativamente à caixa de terminais novamente verifica-se uma maior vantagem na aplicação do *software* CAM. O contorno da caixa de terminais utilizado atualmente é um contorno 2D incremental realizado por programação manual, devido a não existirem ciclos no controlador que permitam realizar esta etapa de uma forma expedita. Os ciclos disponibilizados pelo *Mastercam*, como é o caso do contorno dinâmico (Figura 4.29), permitem reduzir consideravelmente a duração da operação de contorno. A ferramenta de corte irá adaptar-se à geometria da peça e realizar um número superior de passagens nas zonas onde existe mais material.

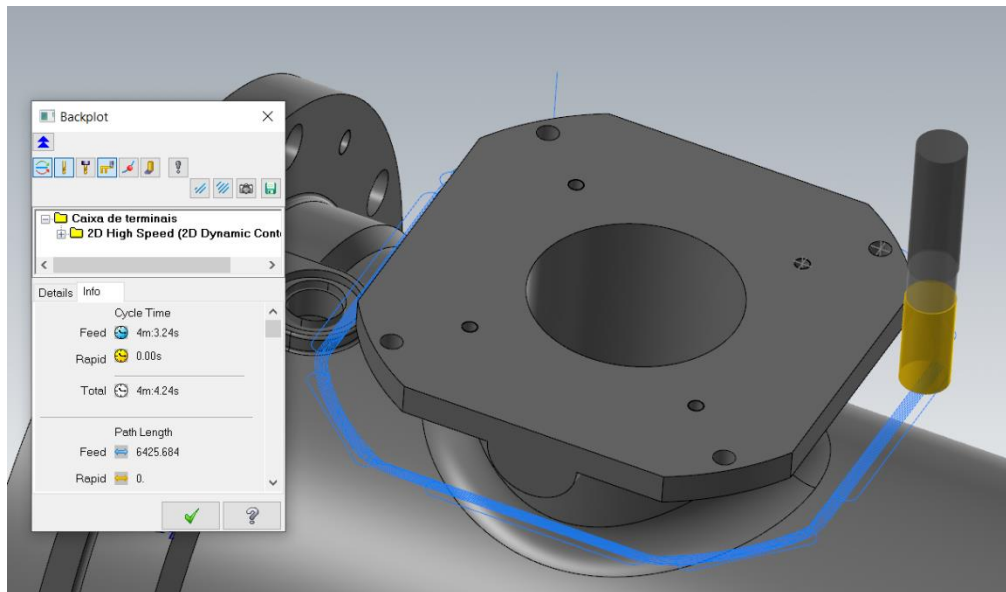


Figura 4.29 Contorno dinâmico aplicado à caixa de terminais – Carcaça TGCL100L.

4.2.2 Simulação do 4º eixo no Mastercam

Através da especificação existente para o quarto eixo (Anexo B) conseguimos verificar as dimensões do 4º eixo sugerido pelo fabricante da marca *Akira-Seiki*. Este sistema será aplicado na mesa com uma bucha hidráulica/ pneumática funcionando como um quarto eixo divisor, rodando a peça numa determinada posição favorável à maquinagem seguinte.

Analisando as principais peças inseridas no centro de maquinagem (bombas e carcaças), a única aplicação vantajosa seria na rotação da peça para realização dos furos dos drenos. Com este sistema substitui-se a fixação da peça feita através do esquadro pela utilização da bucha hidráulica ou pneumática realizando apenas uma operação de *setup*. É necessário avaliar as vantagens da utilização do quarto eixo face ao tempo gasto na rotação e fabrico dos drenos.

A simulação do quarto eixo também é possível executar com recurso ao *software* CAM. O *Mastercam* disponibiliza máquinas-ferramenta padrão, entre as quais uma máquina com 4 eixos numa configuração semelhante à sugerida para o centro de maquinagem. A máquina utilizada permite determinar os tempos de maquinagem das furações dos drenos e simular as interceções dos dois produtos em estudo, tal como se visualiza na Figura 4.30.

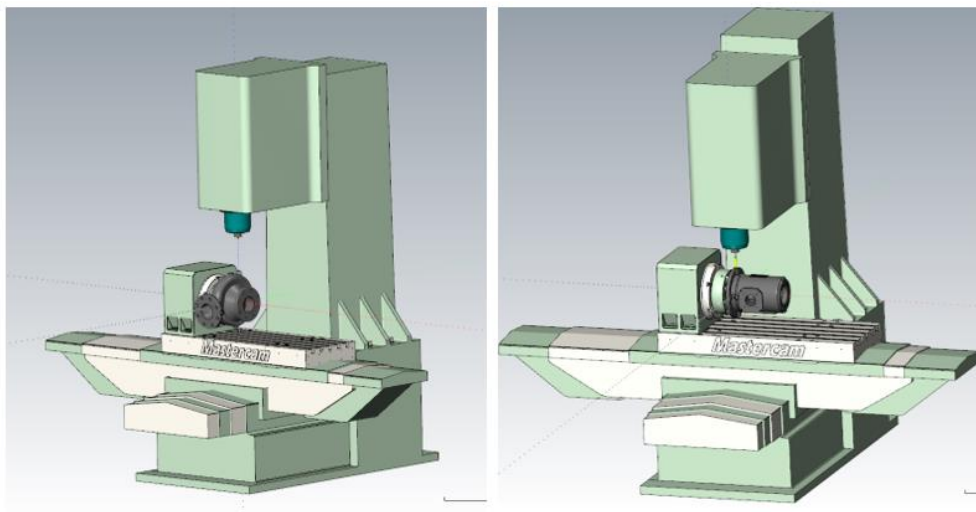


Figura 4.30 Simulação do quarto eixo em bombas e carcaças com recurso ao *Mastercam*.

Apesar da versão do *Mastercam* 2019 disponibilizada para a realização deste trabalho não permitir a edição das características da bucha nem a máquina em questão, observa-se no Anexo B.5 as dimensões do quarto eixo, onde se destaca uma altura ao centro da bucha de 210 milímetros. Tendo em consideração as dimensões deste equipamento e as dimensões do corpo da bomba TGCL 100-200 100L concluímos que a rotação de 360° do corpo da bomba não é realizável devido à sua altura ser superior a 210 milímetros. Assim, para o caso das bombas em que se necessitasse do furo dos drenos na parte inferior, a aplicação do quarto eixo não é vantajosa e obrigava a uma nova fixação para realizar o dreno.

No caso das carcaças, a sua rotação completa será viável o que permite realizar as furações dos drenos e a maquinagem da caixa de terminais do motor numa só operação de *setup*.

Torna-se necessário avaliar o tempo gasto na rotação da bomba pelo operador face à produtividade associada às furações dos drenos. Através do contacto com o operador verificou-se que o tempo de paragem da máquina para realizar a rotação da bomba é em média 40 segundos. A maquinagem completa de um dreno demora 2 minutos 55 segundos. Os tempos de rotação dos drenos pelo modo manual é demasiado pequeno pelo que não se justifica a aplicação de um sistema de rotação tão dispendioso para realizar apenas estas etapas. Para além disso, o sistema de fixação atual através do esquadro de apoio permite o alinhamento rápido da peça para a realização da maquinagem e é por esse motivo que a rotação da peça é feita rapidamente. O tempo gasto na rotação da peça pode ser compensado através do rápido posicionamento da peça no esquadro.

Paralelamente, com o sistema de fixação por bucha será difícil garantir o posicionamento correto da bomba ou carcaça o que iria aumentar os tempos de *setup* inicial comparativamente com o uso do esquadro atual.

Foi concluído que não se justificaria a implantação do quarto eixo divisor na máquina para ser aplicado na maquinagem das bombas e carcaças.

4.2.3 Vantagens Globais do Software CAM na EFAFLU

Para além das vantagens em relação à disponibilidade de múltiplas estratégias para os percursos de maquinagem do *Mastercam* observados anteriormente podem-se salientar outras vantagens da utilização de *software* CAM para a empresa EFAFLU. A primeira vantagem é a possibilidade de elaborar os programas CN em modo *offline*, reduzindo significativamente a

interferência na utilização da máquina na produção. O *software* CAM permite não só otimizar os percursos de maquinagem, através do teste e simulação de estratégias alternativas, incluindo a determinação dos tempos utilizados em cada operação. Facilita ainda a execução na máquina, adquirida recentemente, de peças novas ou que ainda não foram programadas no controlador, o que levaria a paragens da produção do centro CNC para programar o novo produto.

Outro benefício da aplicação do *software* é o controlo dos parâmetros de corte associados às peças. Como se verificou, existem 3 materiais de fundição a maquinar, no entanto, a velocidade utilizada pode não ser a mais indicada em cada material. Os valores utilizados no controlador estão a ser utilizados em função do tipo de ferramenta utilizada e não em função do material a maquinar. O uso do *software* CAM permite incorporar e testar facilmente as velocidades de cada programa em função do material utilizado e dos valores sugeridos no catálogo da ferramenta. A otimização dos percursos de maquinagem incluem não só os tempos associados aos percursos em corte, mas também aos movimentos em vazio.

Também se concluiu da enorme vantagem na simulação que permite identificar colisões da ferramenta com a peça a maquinar e na verificação do correto funcionamento do código gerado. Podem ainda incluir-se na simulação modelos dos dispositivos de fixação. Esta possibilidade permite reduzir o tempo, sempre necessário, de verificação na máquina dos programas elaborados.

Como não existe um simulador para a máquina nem uma ficha de maquinagem onde sejam incluídos os tempos de produção, a empresa não apresenta dados concretos sobre o tempo de fabrico das peças nem dos ciclos de maquinagem utilizados por parte do operador. Para além de otimizar os programas de maquinagem, a maioria dos *softwares* CAM permite criar fichas de maquinagem que incluem o tempo médio de fabrico de um produto, principais características do programa criado, ferramentas utilizadas e respetivos parâmetros de corte. Esta ficha de maquinagem permitiria ainda auxiliar o trabalho dos operadores no centro de maquinagem e reduzir dos tempos de *setup* pela facilidade na identificação de todos os elementos, incluindo ferramentas, dispositivos auxiliares e procedimentos, necessários ao programa CN.

Numa perspetiva mais global e de futuro toda a planta de produção poderia evoluir seguindo a tendência atual de digitalização e integração a vários níveis de uma empresa, visto que a produção estaria organizada via digital (i.e. CNC), complementando o uso do *software* CAD (PTC Creo 3.0) com o CAM. A comunicação de informação também ficaria facilitada para os novos operários evitando não conformidades por falta de comunicação. Seria uma enorme vantagem na escolha de um *software* CAM que permitisse esta funcionalidade, tal como acontece com o *Mastercam*. Este tópico será abordado mais à frente na Secção 4.4.

É importante referir algumas soluções extras do *software* onde se incluem as operações realizadas com a sonda ou medição de ferramentas no interior da máquina. Isto é o caso da gama “*Produtivity Plus*” disponível no *Mastercam* que permite adicionar as operações realizadas com a sonda ou a medição automática de ferramentas reduzindo ao máximo a intervenção do operador [27]. No entanto, este equipamento não está incluído na compra do *Mastercam* pelo que é necessário fazer uma análise posterior da sua vantagem.

Na eventualidade da empresa adquirir o *software* CAM e caso surjam novos produtos em que se justifique a implementação do quarto eixo na máquina, este *software* permitiria ser adaptado facilmente através de um novo pós-processador.

Existe, no entanto, um elevado custo associado a estes sistemas, o que exige a escolha do melhor *software* para as funcionalidades requeridas para a empresa. Também é necessário ter em consideração o investimento inicial e, caso se verifique, a sua manutenção anual. Os elevados custos associados ao *software* apenas podem ser compensados com um aumento da gama de produção. Durante este projeto foram disponibilizados alguns orçamentos para um

sistema CAM para o centro de maquinagem de 3 eixos com o pós-processador para a máquina em estudo, e que são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Orçamentos de sistemas CAM.

<i>Software CAM</i>	<i>Custo Inicial [€]</i>	<i>Manutenção anual [€]</i>	<i>Pós-Processador M70V</i>
<i>Mastercam</i>	7500	750	Incluído
<i>Top Solid</i>	10500	2325	Incluído
<i>PTC CREO</i>	-	3020	Não Incluído
<i>NXCAM</i>	6521	1 304	Não Incluído
<i>Fusion 360</i>	2820	415	Não Incluído
<i>Esprit CAM</i>	11000	2000	Não Incluído

Com base nas opções de manutenção anual verifica-se que o *Mastercam* e o *Fusion 360* da Autodesk são as opções com custos mais baixos. Com base na análise das funcionalidades do *Mastercam* neste trabalho, é possível a empresa avaliar os orçamentos em função das funcionalidades pretendidas para o *software CAM*.

4.2.4 Sugestão de ciclos de maquinagem no controlador

Através dos testes realizados com o *Mastercam* foi possível observar alguns percursos de maquinagem vantajosos que poderiam ser programados recorrendo diretamente ao controlador da máquina.

Como o controlador não dispõe do ciclo de contorno dinâmico disponível para o *Mastercam*, a primeira sugestão visa substituir o contorno em rampa helicoidal com a fresa de 50mm por uma operação circular de múltiplas passagens circulares. Considerando que se retira em cada passagem 0.5mm de espessura ($a_e=0.5\text{mm}$) e verificando que nos casos mais extremos o fundido apresenta 4mm de espessura a maquinar, definiu-se um contorno incremental XY de 10 voltas circulares no total. Foi sugerida novamente a fresa de topo disponível na empresa (fresa de diâmetro 16mm) com profundidade de corte de 32 milímetros. O contorno aplicado à flange de descarga é semelhante ao da Figura 4.31.

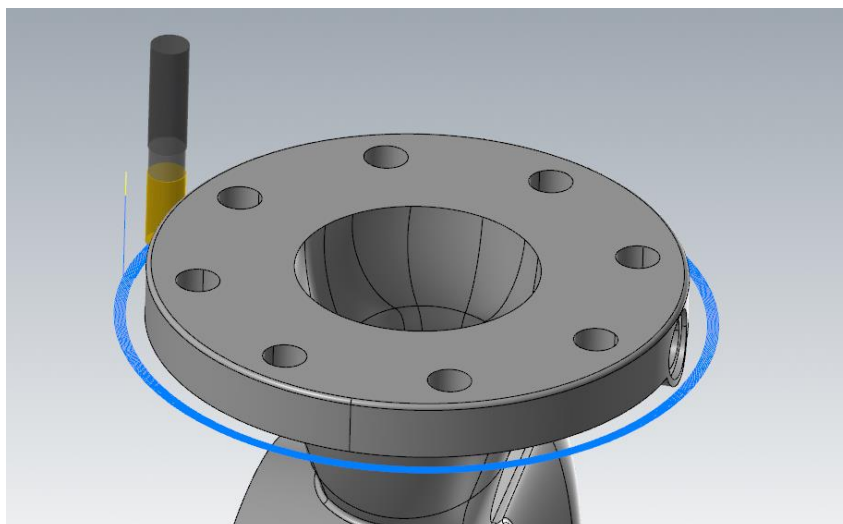


Figura 4.31 Contorno incremental XY aplicado à flange de descarga.

Verificou-se que a vantagem na aplicação deste método para as flanges de aspiração e descarga. Caso se verifique que as vibrações causadas na peça e o desgaste da ferramenta não são muito elevadas poderiam considera-se valores de corte superiores aos restantes contornos da bomba. A Tabela 4.9 permite comparar os resultados do contorno incremental para as duas flanges.

Tabela 4.9 Contorno incremental aplicado à bomba TGCL 100-200 100L.

<i>Contorno</i>	<i>Tempo [min]</i>		
	Helicoidal	Incremental XY	Tempo Ganho
<i>Flange de aspiração</i>	09:11	05:14	03:57
<i>Flange de descarga</i>	09:02	05:09	03:53
<i>Total</i>			07:50

A aplicação deste método às flanges permitiria um ganho de 7 minutos e 50 segundos no fabrico completo de uma bomba. Após a aplicação dos testes seria necessário avaliar qual o desgaste associado à ferramenta assim como a vibração que poderia causar à peça.

O segundo processo onde é despendido mais tempo de maquinagem é o facejamento por contorno circular. Através da análise do processo de facejamento verifica-se que geralmente ocorrem 3 voltas circulares para realizar esta operação. Isto é realizado como segurança para a ferramenta de corte.

No entanto, realizando a simulação da maquinagem verifica-se que em alguns casos o número de contornos associado ao facejamento de uma peça é superior ao necessário. A ferramenta utilizada é uma fresa de diâmetro 50mm e recorrendo ao catálogo da mesma, tem um total de 70% de utilização, o que equivale a 35 milímetros de corte. Assim, através da análise das dimensões das flanges verificou-se que a largura máxima a facejar não ultrapassa os 60 milímetros pelo que o facejamento poderá ser realizado recorrendo apenas a 2 voltas circulares. Esta sugestão de redução do número de contornos poderá ser aplicada tanto a bombas como a carcaças em diferentes zonas. A Tabela 4.10 resume todas as etapas que podem ser alteradas bem como o tempo ganho com a alteração.

Tabela 4.10 Ganhos temporais na aplicação de duas voltas circulares ao facejamento.

	<i>Tempo Atual</i>	<i>Tempo para 2 voltas circulares</i>	<i>Tempo Ganho</i>
<i>Flange de aspiração</i>	05:45	03:48	01:57
<i>Flange de descarga</i>	05:46	03:49	01:57
<i>Caixa de terminais</i>	13:02	06:58	06:04
<i>Tampa do Motor</i>	05:29	03:38	01:51

Este método poderá reduzir o fabrico do corpo em 3 minutos e 54 segundos, e é ainda mais vantajoso no caso da carcaça, tendo uma redução total de 7 minutos e 55 segundos. A aplicação deste método também implica verificar o desgaste associado às pastilhas da fresa e a vibração associada à peça.

Por último sugere-se uma alteração ao nível das furações das flanges da bomba. Relativamente à programação efetuada no controlador, está a ser realizada uma furação “*peck drill*” recorrendo ao ciclo G83. Este ciclo é aplicado em qualquer tipo de broca, e retorna, a cada furação realizada, à posição de origem, definida 5mm acima do primeiro furo. No entanto, em alguns casos, com brocas de metal duro não é necessário realizar uma furação incremental “*peck drill*” e opta-se por uma furação direta. Os valores máximos para a furação direta são indicados pelo fornecedor da ferramenta.

No caso das bombas TGCL 100-200 100L as primeiras furações realizadas na flange de aspiração e descarga recorrem a uma broca de pastilhas intercambiáveis de 17 milímetros. É necessário ter em consideração que esta pode incluir um segundo tipo de pastilhas, aumentando o diâmetro de corte, no máximo, para 17.9 milímetros e o comprimento de corte útil poderá ir até 5 vezes o diâmetro da ferramenta. Desta forma seria possível realizar furação direta sem múltiplas passagens. A redução do tempo encontra-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Tempo ganho na furação das flanges da bomba.

	<i>“Peck Drill”</i>	<i>Furação direta</i>
<i>Flange de descarga</i>	01:22	00:39
<i>Flange de aspiração</i>	01:26	00:42

Após a primeira furação *peck drill* é realizada uma furação de alargamento do furo para diâmetro 18 milímetros, através de uma broca de aço rápido de diâmetro igual ao furo. A operação de alargamento do furo ocupa a maior percentagem de tempo no processo global de furação. Verificou-se então a necessidade do alargamento do furo e se poderia ser otimizado.

Através da análise do produto final concluiu-se que nas furações normalizadas da flange serão montados parafusos M16. Assim, como existe folga entre o furo e o parafuso M16, não é necessário realizar um furo com elevada exatidão, nem realizar o alargamento do furo para 18 milímetros sendo que este não será um fator relevante na montagem do produto final. Sugeriu-se assim uma alteração nas dimensões do produto final das bombas, ao qual se excluiu os furos de 18 milímetros, realizando-se furações de 17.9 milímetros com a broca de pastilhas existente. Foi sugerido o diâmetro 17.9mm por não existir na empresa ferramenta de diâmetro 18mm. Se for imperativo manter este diâmetro terá de ser adquirida ferramenta apropriada. Assim, exclui-se a necessidade de alargar o furo.

A Tabela 4.12 apresenta o tempo otimizado através da exclusão da operação de alargamento.

Tabela 4.12 Tempos otimizados na flange pela exclusão da operação de alargamento.

	<i>Tempo furação global</i>	<i>Furação direta sem alargamento</i>
<i>Flange de descarga</i>	08:06	00:39
<i>Flange de aspiração</i>	08:03	00:42

4.3 Otimização das ferramentas

Em função da análise efetuada no capítulo anterior, no que diz respeito às ferramentas de corte disponíveis, apresentam-se neste capítulo, sugestões para potenciar o desempenho do centro de maquinagem e o fabrico de bombas centrífugas. Seguidamente, serão expostas essas propostas bem como os resultados dos testes realizados no *Mastercam* com as ferramentas de corte.

4.3.1 Ferramentas para contornos

Tendo em consideração a duração do contorno helicoidal foi testada uma primeira ferramenta (Figura 4.32) para realizar os contornos, a fresa de topo de pastilhas intercambiáveis cujas características e respetivo orçamento se encontram apresentadas no Anexo E.1. Esta fresa apresenta 15 pastilhas distribuídas em espiral. Devido à sua largura de corte elevada (44 milímetros) e penetramento de trabalho máximo de 11 milímetros ($ae_{max} = 0.25 \times D$), permite abranger toda a altura dos contornos das bombas, o que não era possível com a fresa de topo de diâmetro 16mm disponível na empresa.

Apesar da enorme vantagem na sua utilização, esta é uma ferramenta dispendiosa. A aquisição poderia justificar-se caso esta permitisse realizar os contornos de uma forma muito mais eficaz. Para tal, realizaram-se testes à ferramenta. Os primeiros testes tiveram como alvo a flange de aspiração da bomba, com esta fixa através da bucha pneumática. O teste visou a realização do contorno numa única volta circular, com um penetramento de trabalho de 3 mm de espessura. Os parâmetros utilizados no teste (recomendados pelo fabricante da ferramenta) compreendem um avanço de 540 mm/min, velocidade de rotação 1500 rpm e velocidade de corte de 235,5 m/min.



Figura 4.32 Fresa de topo de pastilhas intercambiáveis.

Realizando os testes sobre a flange de aspiração verificou-se que a fixação da bomba na bucha pneumática não foi totalmente garantida, o que fez com que a bomba se deslocasse da sua posição original durante a maquinagem. Desta forma, no segundo teste realizado com a ferramenta optou-se por utilizar um penetramento de trabalho menor, pelo que se realizaram 3 voltas circulares ($a_e=1\text{mm}$). O tempo do contorno foi então reduzido para 1/4 face ao contorno helicoidal utilizado atualmente.

Tendo em conta o preço desta ferramenta, e devido ao método de fixação atual não permitir a realização do contorno da flange em apenas uma volta circular, esta solução foi descartada. Visto ser uma alternativa vantajosa, sugere-se para o futuro, a aquisição da ferramenta e a seleção de um novo método de fixação para a primeira etapa de maquinagem.

Devido à necessidade de reduzir o tempo das operações de contorno, é crucial sugerir uma ferramenta com um comprimento de corte superior a 35mm de modo a que seja aplicada em todos os contornos das peças em estudo. No entanto, os custos associados à ferramenta não são tão elevados quanto a fresa de pastilhas testada previamente. Com isto, a empresa Palbit sugeriu uma fresa de topo de metal duro integral cujas características se encontram no Anexo E.2. Devido às limitações impostas pela bucha pneumática as operações de contorno nas flanges de aspiração continuam a ser realizadas utilizando múltiplas passagens (4 voltas circulares) com um penetramento de trabalho de 1 mm ($V_c=210\text{ m/min}$ e $f_z=0.1\text{ mm}$). As reduções dos tempos de desbaste nos contornos encontram-se na Tabela 4.13:

Tabela 4.13 Tempos com fresa de topo de Diâmetro 18 mm.

	<i>Tempo Atual</i>	<i>Incremental XY</i>	<i>Tempo Ganho</i>
<i>Flange de aspiração</i>	09:11	02:03	07:08
<i>Flange de descarga</i>	09:02	01:58	07:04
<i>Tampa do Motor</i>	04:08	01:24	02:44
<i>Caixa de Terminais</i>	05:47	01:34	04:13

Com base nestes resultados, é justificável a compra de uma fresa de topo com comprimento suficiente para realizar os contornos completos das bombas e carcaças. Devido à redução de tempo associada a este tipo de ferramentas, e tendo em conta as limitações impostas pela bucha pneumática, fica a sugestão de compra deste tipo de ferramentas para o futuro da empresa. No entanto, não foi possível realizar os testes associados a uma ferramenta deste género pelo que será necessário ter em consideração o tempo de vida associado.

4.3.2 Ferramentas para furação

Na eventualidade das sugestões propostas para as operações de furação das flanges (Secção 4.2) não serem executadas pela empresa, devido a implicar uma mudança em todos os desenhos das bombas, podem sugerir-se brocas de pastilhas intercambiáveis ou integrais em metal duro para os furos normalizados da flange serem executados da forma mais rápida possível. Recorrendo novamente ao catálogo da Palbit foram seleccionadas duas brocas de pastilhas com diâmetros 18 e 22 milímetros (Anexo E.3). Os parâmetros de corte recomendados pelo fornecedor variam quer seja para o ferro fundido cinzento ou nodular. No entanto, considerou-se um valor intermédio entre os dois para a realização dos testes, o que equivale a uma velocidade de corte de 180 m/min com um avanço por rotação de 0.1 mm/rot. Com estas condições de corte os tempos de furação nas flanges ficariam reduzidos aos indicados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 Tempos de furação na flange da bomba com broca de pastilhas de 18 mm.

<i>Bomba</i>	<i>Tempo atual</i>	<i>Tempo com broca de pastilhas</i>
<i>Flange de aspiração</i>	08:06	00:53
<i>Flange de Descarga</i>	08:03	01:03

Poder-se-ia considerar que as operações de alargamento do furo seriam excluídas através destas duas ferramentas. A sua aplicação permite uma redução de 14 minutos e 13 segundos no fabrico completo de cada bomba TGCL.

4.3.3 Ferramentas para chanfrar/escarear

A análise dos resultados da tabela dos tempos de maquinagem do Anexo A permitiu verificar que operações simples como o escareamento ou chanfragem podem ser demoradas. Para além disso, pode analisar-se o processo de escareamento e chanfragem com recurso a uma única ferramenta, evitando-se a troca de ferramentas e otimizando o tempo global das duas etapas. Com isto, sugere-se uma ferramenta de metal duro com 6 arestas de corte e um diâmetro de 10 mm que permite incluir estas duas operações com velocidades de corte superiores. Segundo o fabricante, Inova Tools, os parâmetros recomendados para o ferro fundido são a velocidade de corte igual a 150 m/min e um avanço por dente de 0.05 mm. A ferramenta sugerida encontra-se no Anexo E.4 e os resultados simulados através do *Mastercam* são apresentados na Tabela 4.15 e na Tabela 4.16. De modo a contabilizar o tempo do processo atual concluiu-se que a troca de ferramentas de escarear e chanfrar demora 9 segundos.

Tabela 4.15 Testes com ferramenta de escarear na Bomba TGCL100-200 100L.

<i>Bomba</i>	<i>Tempo atual</i>	<i>Tempo sugerido</i>	<i>Tempo otimizado</i>
<i>Flange de aspiração</i>	01:49	00:53	00:56
<i>Interior da Bomba</i>	04:49	02:11	02:38
<i>Flange de Descarga</i>	02:18	01:03	01:15

Tabela 4.16 Testes com ferramenta de escarear na carcaça TGCL 100L.

<i>Carcaça</i>	<i>Tempo atual</i>	<i>Tempo sugerido</i>	<i>Tempo otimizado</i>
<i>Tampa do Motor</i>	02:19	01:03	01:16
<i>Tampa da Bomba</i>	02:04	00:47	01:17
<i>Caixa de Terminais</i>	02:08	00:51	01:17

A obtenção de uma ferramenta deste tipo permite reduções de 4 minutos e 49 segundos no fabrico do corpo de uma bomba bem como 3 minutos e 50 segundos no fabrico da carcaça. Apesar de serem ganhos de tempo pequenos em relação ao tempo total (4 min 39 seg no corpo da bomba e 3 min e 50 seg na carcaça), numa série de 10 peças são significativos. Seria necessário realizar testes com estas ferramentas de modo a garantir que os parâmetros de corte utilizados não comprometam o acabamento final da peça através do excesso de rebarba. No entanto, tal não foi possível pois não foi disponibilizada a ferramenta para realizar os testes.

Em relação às capacidades de armazenamento de ferramentas (ATC) do centro de maquinagem, sendo necessário gerir o número total de ferramentas. Esta solução permitiria excluir o uso de mais uma ferramenta do seu carrossel.

4.3.4 Ferramentas para o interior da carcaça.

O último modelo de ferramentas testadas foram as ferramentas para o interior da carcaça. Os testes foram realizados com recurso ao *Mastercam* na carcaça TGCL 100L e pretendiam apurar qual a vantagem no investimento de ferramentas para realizar o interior da carcaça no centro de maquinagem, excluindo a utilização do torno vertical. Neste sentido calculou-se o tempo aproximado que demoraria a executar a operação de torneamento de uma peça completa. Ao acompanhar as operações de maquinagem no torno vertical registaram-se as velocidades utilizadas no interior da carcaça, sendo o avanço de 25 mm/min e a velocidade de rotação de 100 rpm. Na operação de desbaste realizavam-se 4 passagens com 1 mm de profundidade de corte cada, finalizando com 1 passagem de acabamento. Assim, é possível simular o tempo que demora cada operação de torneamento da peça recorrendo à equação do tempo de maquinagem:

$$Tm = \frac{L}{vf} \quad (4.11)$$

Onde:

L é o comprimento total a maquinar, [mm],

vf é a velocidade de avanço, [mm/min], e

Tm , é o tempo de maquinagem total, [min].

Para competir com a maquinagem do torno foi sugerida pela Palbit S.A. uma roca de diâmetro 80 com 7 pastilhas intercambiáveis. Por sugestão do fornecedor, devido aos diâmetros excessivos no interior da carcaça (mínimo 180 milímetros de diâmetro) a profundidade de corte não deve exceder 1 mm ($ap = 1$ mm). O ficheiro da ferramenta em formato STEP foi fornecido pela Palbit e importado para o *Mastercam*, como se verifica na Figura 57.

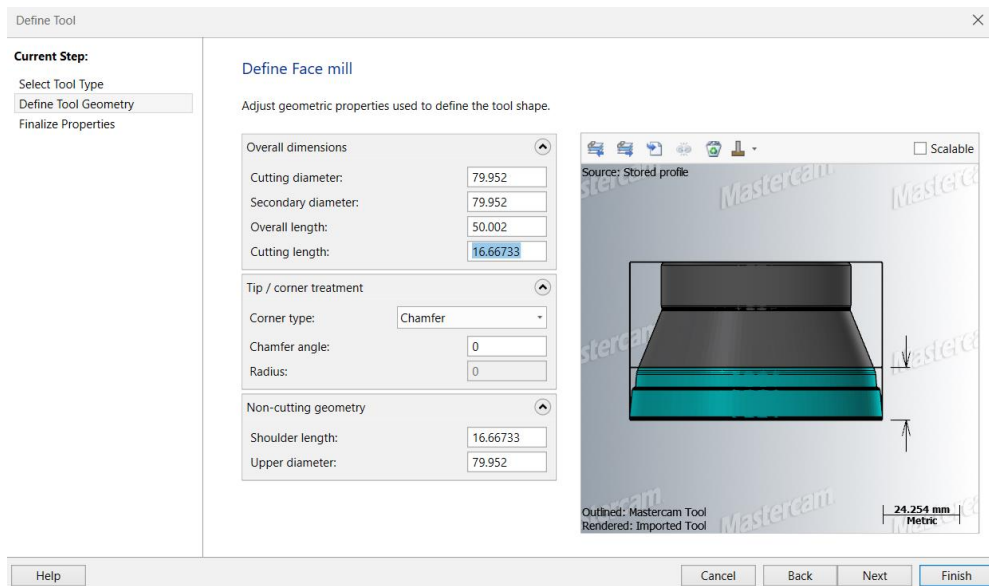


Figura 4.33 Importação do modelo *step* da ferramenta para *Mastercam*.

Utilizando os mesmos parâmetros de corte em cada operação ($V_c = 260$ m/min e $f_z = 0.2$ mm/dente), foi possível comparar os resultados da maquinagem da carcaça no torno vertical e no centro de maquinagem. Os resultados da simulação permitem concluir que o tempo efetuado no centro de maquinagem será muito elevado comparativamente com o torno vertical. Com recurso ao torno vertical, uma o torneamento interior da carcaça demora cerca de 53 minutos e o tempo simulado em *Mastercam* é superior a 4 horas de maquinagem (Figura 4.34).

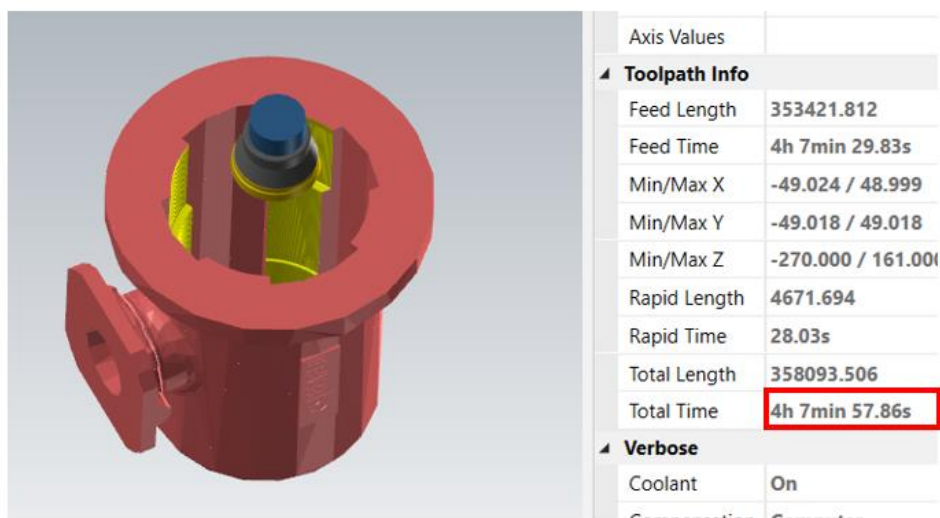


Figura 4.34 Torneamento interior da carcaça TGCL 100L.

Para além disso, para realizar operações de maquinagem de elevadas profundidades seria necessário a compra de um cone de elevado comprimento, com características anti-vibratórias, sendo estes extremamente dispendiosos. A título de exemplo referem-se alguns cones da Sandvik, designados por *silent tools* [28].

Conclui-se que é muito difícil um centro de maquinagem de 3 eixos como o da *Akira-Seiki* conseguir realizar o contorno das carcaças num tempo inferior ao do torno vertical convencional. Desta forma, não será vantajoso investir em meios de fixação e ferramentas que permitem realizar os contornos internos da carcaça, sendo preferível continuar a optar-se pela operação do torno.

Desta forma, a maquinagem do interior da carcaça no CM nunca poderá ser realizada de um modo tão rápido e eficiente como no torno vertical. Numa solução ideal poderia ser benéfico para a empresa a aplicação de um centro de maquinagem que incluísse, simultaneamente, operações de torneamento e de fresagem, não obstante o seu custo mais elevado, de modo a minimizar complexidades de produção resultantes da troca de peças entre diferentes máquinas.

4.4 Ficha de maquinagem

Ao longo deste trabalho foi possível ter a experiência direta da importância do registo da informação associada aos processos de produção e da maquinagem, em particular. O conhecimento necessário para maquinar uma peça estende-se desde a interpretação da especificação de projeto, à definição do número e tipo de operações necessárias, às ferramentas mais adequadas e respetivos parâmetros de corte, aos métodos e dispositivos utilizados na fixação das peças, e ainda ao conhecimento adequado para utilizar uma máquina-ferramenta e neste caso programável. Envolvendo múltiplos aspetos com decisões muitas vezes associadas à experiência de casos anteriores, naturalmente é fundamental um armazenamento e acesso expedito para a troca de informação entre as especialidades envolvidas.

Com este objetivo analisaram-se as fichas de maquinagem atualmente usadas e definiu-se um modelo de ficha de maquinagem que pudesse conter a informação relevante para os casos analisados. Promovendo um registo organizado da informação para as peças fabricadas, poderiam ser evitados “fichas de maquinagem” com soluções diferentes para operações “semelhantes” em condições de maquinagem “semelhantes”.

No caso atual verificou-se que, em modelos de bombas semelhantes, com métodos de fixação idênticos, do mesmo material e com as mesmas ferramentas, os parâmetros de corte utilizados e as operações de maquinagem realizadas podem variar entre os programas. Verificaram-se ainda erros de maquinagem pelo uso incorreto da sonda e da identificação do zero peça num local diferente ao inicial durante a criação do programa de comando numérico.

Estes problemas poderiam ser evitados com a inclusão de uma ficha de maquinagem que permitisse auxiliar o operador da máquina na criação de novos programas no controlador ou na verificação dos programas já existentes, dando informações sobre as ferramentas, parâmetros de corte, métodos de fixação e sobre a origem do referencial (zero peça) definido na realização do programa.

Para além de poder evitar estes problemas disponibilizando informação para ajudar o operador da máquina, a ficha reúne informação útil para o planeamento da produção, uma vez que identifica recursos e quantifica os seus tempos de utilização. Potencia ainda uma melhoria contínua se for usada como um elemento cuja informação pode ser atualizada tendo em conta a contribuição por parte do operador em relação a como foram ou podem ser executadas as operações na máquina. Por outro lado, como existe apenas um operador na máquina CNC, esta

poderá auxiliar a formação de operadores inexperientes e evitar não conformidades associadas à falta de comunicação.

Como foi referido, a maioria dos sistemas CAM permite criar fichas de maquinagem que incluem os principais parâmetros do programa criado, fornecem informações globais sobre o tempo de maquinagem e são facilmente alteráveis. Tendo já sido usado o *Mastercam* neste trabalho, o modelo de ficha proposto é feito a partir do *Mastercam*. Na Figura 4.35 apresenta-se um exemplo de uma ficha de maquinagem criada através do *Mastercam* e aplicada à primeira fase de maquinagem (flange de aspiração) do corpo da bomba TGCL 100-200 100L.

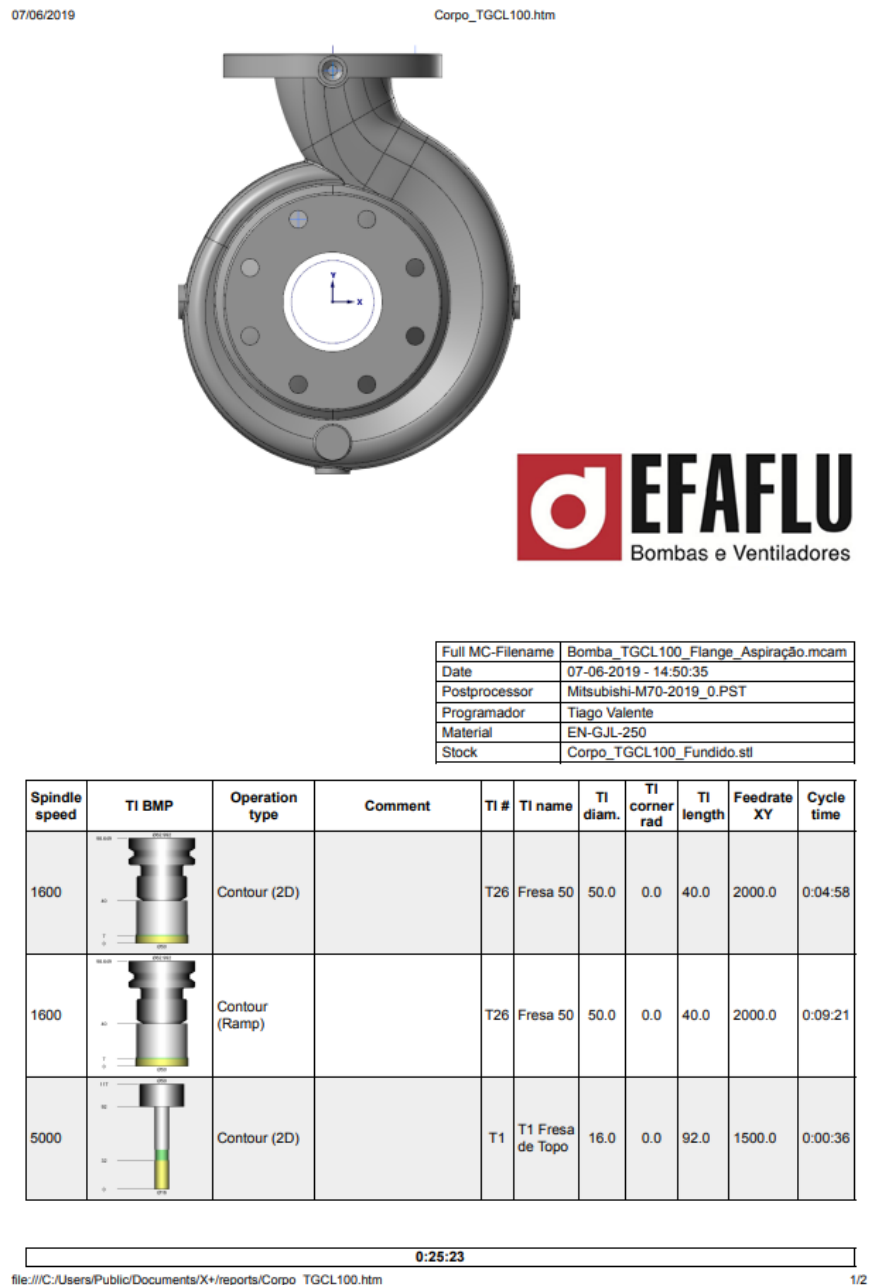


Figura 4.35 Ficha de maquinagem criada no *Mastercam*.

As fichas de maquinagem criadas pelo *software CAM* permitem incluir de uma forma rápida todas as informações necessárias para auxiliar o operador durante as operações de *setup* referenciando o tipo de ferramentas utilizadas, a ordem e respetivas operações de maquinagem, os parâmetros de corte, o tempo de cada operação de maquinagem e o comprimento da ferramenta. Ainda podem ser inseridas informações sobre a peça a maquinar, o tipo de fixação

e programa a selecionar. Com estas indicações o operador conseguirá realizar rapidamente as operações de *setup* referentes à seleção das ferramentas e à seleção do programa, reduzindo os tempos de preparação de maquinagem e incrementando a produtividade do processo de maquinagem.

Por outro lado, como a empresa não possui nenhum *software CAM*, poderia ser adaptado um modelo de ficha de maquinagem e aplicar esse modelo a todos os produtos da EFAFLU. Foi então criado um modelo a ser incluído nas diversas fases de maquinagem. A cada fase de maquinagem corresponderiam duas folhas de maquinagem: a primeira incluía todas as informações relevantes sobre as ferramentas a utilizar, os respetivos parâmetros de corte e as operações de maquinagem em que eram utilizadas, juntamente com tempo de cada operação e o posicionamento do zero peça; a segunda folha de maquinagem incluía as operações principais de *setup*, os equipamentos utilizados na fixação bem como os dispositivos de controlo dimensional e o programa a selecionar no controlador.

A criação desta ficha permitiria, assim, o controlo do tempo de fabrico de todas as peças no centro de maquinagem, adequar os parâmetros de corte ideais aos diversos programas de maquinagem, uniformizar a diversidade programas, auxiliar o trabalho de todos os operadores do CM (especialmente os operadores inexperientes), reduzir os tempos de *setup* e por último evitar erros de programação devido à falta de comunicação.

Um exemplo de uma ficha de maquinagem, que poderia ser aplicada como modelo a qualquer produto da empresa, é apresentada seguidamente para os corpos das bombas TGCL 100-200 100L, durante as três primeiras fases de maquinagem no CM.

Na primeira folha seria aplicada uma capa geral na qual seriam identificados os objetivos do trabalho a realizar, quais as máquinas onde serão realizadas as operações de maquinagem e as faces a maquinar para a peça em questão. Distinguem-se ainda dois tipos de tarefas, internas e externas, pois a ficha poderá complementar ações a realizar pelo operador enquanto a máquina está em funcionamento, tal como preparação de novas ferramentas para a próxima fase de maquinagem ou escareamento de furos manualmente.

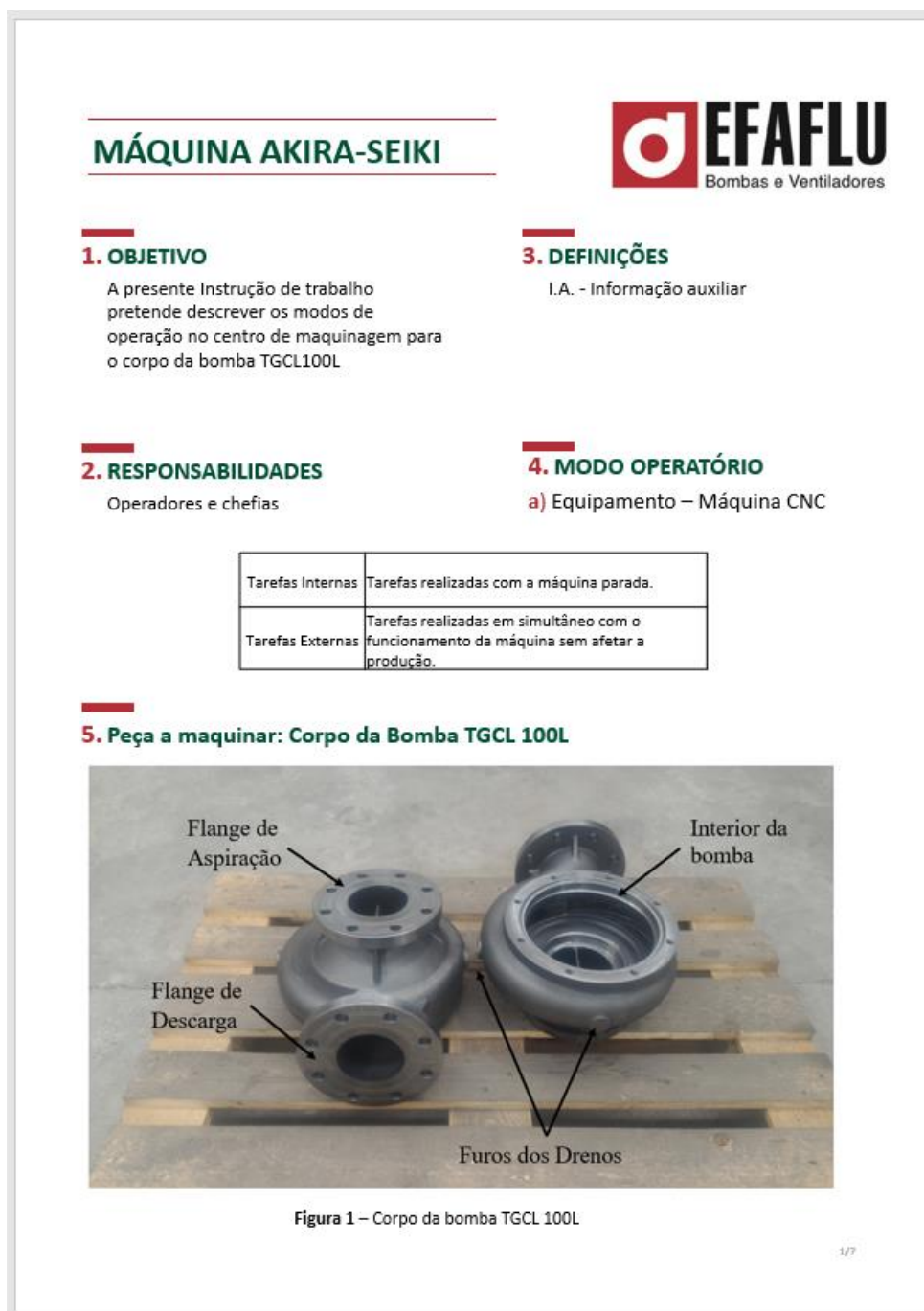


Figura 4.36 Capa genérica para ficha de maquinagem.

Em seguida seriam inseridas todas as informações relevantes sobre as operações realizadas e ferramentas correspondentes, bem como todos os parâmetros de corte necessários para realizar uma nova programação no controlador caso seja necessário. Na Figura 4.37 a ficha criada começa por definir qual a peça a maquinar bem como a fase de maquinagem associada a essa peça. Outras informações tal como o tipo de material, dispositivos auxiliares de fixação e o programa a selecionar no controlador também podem ser inseridos para facilitar o processo de *setup*. Posteriormente há necessidade de inserir quais as ferramentas a utilizar nesta fase de maquinagem e as suas dimensões (diâmetro e comprimento), caso haja necessidade de inserir valores aproximados para realizar a medição da ferramenta no sistema “preset” da Renishaw. As operações de maquinagem efetuadas na peça encontram-se ordenadas cronologicamente, e a cada uma irá corresponder uma ferramenta diferente, com os parâmetros de corte mais importantes no processo, isto é, velocidade de corte (V_c), velocidade de rotação (n), velocidade de avanço (V_f) e a profundidade de corte axial (a_p). Como a cada ferramenta incluída no

controlador está associado um diâmetro de corte máximo, optou-se por não incluir o valor do penetramento de trabalho (ae). É ainda incluído o tempo realizado por cada operação de maquinagem, sendo que o tempo final pode ser retirado através das informações disponibilizadas pelo controlador da máquina. Por último, para o operador ter uma perceção da zona a maquinar na peça, a ficha poderá incluir uma foto em CAD 3D ou 2D do modelo de maquinagem final, identificando o local onde irá ser realizada cada operação de maquinagem, bem como o local para identificação do ponto zero da peça.

BOMBA TGCL 100L – FERRAMENTAS

Fase 1

Máquina: Akira-Seiki V6 XP

Sector: Fresagem

Peça: Corpo da Bomba

Dispositivo de fixação:

Data: 10/05/2019

Parte: Flange de aspiração

- Bucha pneumática de 3 grampos

Programador: Tiago Valente

Material: EN-GJL-250

- Esquadro de referência

Programa: 3MH171079_fase1

Ferramentas

Parâmetros de Corte

Maquinagem

Tipo	Diâmetro [mm]	Nº	Offset [mm]	Vc [m/min]	n [rpm]	Vf [mm/min]	ap [mm]	Operação	Ref.	Tempo [min:seg]
Fresa	50	T26	40	251	1600	2000	0.8	Facejar Desbaste	A	05:10
Fresa	50	T26	40	251	1600	2000	1	Contorno Helicoidal	D	09:23
Fresa de topo	16	T1	92	251	5000	1500	30	Contorno Acabamento	D	00:37
Broca de pastilhas	17	T30	162	101.5	1900	500	30	Furação Incremental	B	01:26
Broca HSS	18	T8	144	17	300	40	30	Furação Direta	B	08:11
Chanfro Exterior	10	T2	100	78.4	2500	700	1	Chanfrar	C	01:13
Chanfro Interior	10	T2	100	78.4	2500	700	1	Chanfrar	C	00:37

Ponto Zero : X e Y no centro da flange e Z no topo

27:14

2/7

Figura 4.37 Ficha de maquinagem EFAFLU – Ferramentas e parâmetros de corte.

Em seguida foi criada uma nova folha complementar às ferramentas de corte que pretende explicar de uma forma sucinta os procedimentos de *setup* utilizados, de modo a auxiliar novos operadores no centro de maquinagem a definir uma metodologia para aplicação

dos diferentes dispositivos utilizados na fixação. Neste caso, no início da folha poderá ser repetida alguma informação importante já descrita na folha de ferramentas, onde é identificado o programa de maquinagem ou o zero peça. Posteriormente são designadas as diferentes tarefas a realizar pelo operador, o tempo aproximado que demora cada uma delas, o equipamento necessário para as realizar (guindaste, grampos manuais, cavilhas), e os sistemas auxiliares de controlo de posicionamento ou medição da peça (paquímetro, micrómetro, comparador). Como método de auxílio poderão ser incluídas algumas imagens do processo de *setup* para melhor compreensão. O exemplo da folha de *setup* está representado na Figura 4.38.

BOMBA TGCL 100L – SETUP





EFAFLU
Bombas e Ventiladores

Parte	Flange de Aspiração
Data	05/05/2019
Operador	Rafael Silva
Material	Ferro Fundido EN-GJL-250;
Programa	3MH171079_fase1
Zero peça	X e Y no centro da flange e Z no topo da flange

Procedimento

Número	Tarefa	Tempo (min:seg)	Figura	Equip.	Controlo
1	Interna				
1.1	Medição do excesso de material na peça fundida	01:20			Paquímetro
1.2	Comparar valores a maquinar no programa	02:00			Controlador
1.3	Colocação da bomba na bucha de 3 grampos	00:20	Fig.1	Guindaste	
1.4	Colocação do esquadro lateralmente à bucha	03:14	Fig.1	Guindaste	Comparador
1.5	Ajuste manual da bomba ao esquadro	00:10	Fig.2		
2	Interna				
2.1	Retirar “zero peça” no centro da flange	01:08			Sonda Renishaw
2.2	Seleção do programa 3MH171079_fase1	00:10			

Ilustrações




Fig.1

Fig.2

3/7

Figura 4.38 Ficha de maquinagem EFAFLU – Etapas de *Setup*.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentava como principal objetivo a otimização da maquinagem de componentes de bombas centrífugas, nomeadamente da utilização do centro de maquinagem da *Akira-Seiki*, recentemente adquirido pela empresa EFAFLU. Tal foi possível após identificação e elaboração de um conjunto de sugestões a aplicar em todos os procedimentos incluídos no processo de maquinagem de bombas centrífugas, nomeadamente nos métodos e dispositivos de fixação das peças, nos programas de maquinagem e nas ferramentas de corte.

A tecnologia de comando numérico, particularmente os centros de maquinagem CNC, apresenta-se em constante desenvolvimento, sendo evidente o surgimento de soluções automatizadas que visam facilitar as tarefas do operador e reduzir tempos de *setup* ao nível das ferramentas, preparação das peças de trabalho e elaboração dos programas de CN. Durante a realização desta dissertação, analisou-se o centro de maquinagem *Akira-Seiki Classic Performa V6 XP* tendo como referência as mais recentes soluções existentes no mercado de máquinas CNC. Apesar da existência de um sistema de armazenamento e troca de ferramenta automático (ATC) e de um sistema de medição da peça disponível no CM, os tempos de *setup* inicial continuam a apresentar-se como uma desvantagem a ultrapassar na empresa dado corresponderem a tempos de interrupção de produção elevados durante a preparação ou troca de peças. As soluções atuais de troca de peças como as estruturas robotizadas ou sistemas de troca automática de peças, são exemplos de modelos que não se encontram disponíveis e poderiam ser adaptados ao processo de maquinagem de componentes de bombas centrífugas, não tendo, no entanto, sido considerados neste trabalho.

O acompanhamento dos processos de maquinagem dos componentes de bombas centrífugas, nomeadamente o corpo da bomba e respetivas carcaças, permitiu verificar todos os sistemas de fixação e as estratégias utilizadas pelo operador na maquinagem destes dois produtos. Tendo em vista a compreensão das principais áreas a intervir e otimizar foram avaliados os tempos de fixação e maquinagem em cada fase. Posteriormente foram projetados quatro novos dispositivos de fixação, cujo objetivo seria a montagem rápida e eficiente das peças sobre a mesa da máquina, eliminando alguns dos elementos de fixação atuais demorados, mantendo, contudo, a exatidão associada ao posicionamento da peça. Desta forma, soluções de fixação automatizadas, como grampos ou bucha de acionamento automático podem facilmente ser incluídas na fixação destas duas peças, pelo que foram determinadas as condições para aplicação destes dispositivos e sugestões de compra para implementação no futuro.

De forma similar, foi analisado o processo atual de desenvolvimento dos programas de comando numérico em modo *online*, diretamente no controlador da máquina, e comparado com soluções *offline* de simulação, nomeadamente a utilização de sistemas CAD/CAM. Concluiu-se que a programação *online* continua limitada pelo número/variedade de ciclos disponibilizados pelo controlador ou através da programação manual simples com códigos normalizados G&M, associando-se por isso a um aumento considerável dos tempos de maquinagem. A extensão dos programas de maquinagem e a quantidade de operações a eles associados, revela-se ainda uma limitação dado o tempo prolongado de programação das peças diretamente no controlador e consequentes reduções no tempo disponível para produção.

A consideração de sistemas CAD/CAM visava ultrapassar algumas dificuldades de programação do controlador CNC, com recurso a um maior número de ciclos de maquinagem, uma programação e parametrização mais simples e intuitiva, maior controlo dos parâmetros de corte utilizados e, por último, através da simulação identificar erros de programação. O *software* CAM usado foi o *Mastercam*, sendo possível confirmar todas as potencialidades do *software* CAM a nível empresarial, aplicado a novos ciclos de maquinagem (facejamento e contornos),

a sua maior rapidez de programação e à forma como poderá auxiliar os operadores da máquina através da criação de uma ficha de maquinagem complementar a este processo. Apesar de este ser o único *software* analisado, foram obtidos outros orçamentos, concluindo-se que, no caso das peças em análise, o *Mastercam* e *Fusion 360*, da *Autodesk*, seriam soluções com custos mais baixos.

A simulação do 4º eixo disponível para a máquina CNC foi executada com recurso ao *Mastercam*, concluindo-se que, no caso dos corpos de bombas e carcaças, a utilização deste dispositivo não será justificável. Isto reflete o elevado investimento necessário e os ganhos mínimos de tempo pela possibilidade de orientação automática da peça.

Relativamente às ferramentas de corte constatou-se a necessidade em adquirir ferramentas adequadas para contornos, escareamento e furação. A estratégia mais vantajosa, face à geometria das peças em estudo, seria a aplicação de uma fresa de topo para a realização de contornos, seja de pastilhas intercambiáveis ou em metal duro integral. Do mesmo modo foram objetivados ganhos associados à substituição de brocas de aço rápido (HSS) por brocas de metal duro ou de pastilhas intercambiáveis, ou na execução dos processos de escareamento e chanfragem com recurso a uma mesma ferramenta, também esta em metal duro. Para todos os casos em que se verificaram melhorias significativas, foram dadas sugestões de ferramentas, de modo a que no futuro a empresa possa avaliar os resultados e adquirir o melhor modelo de ferramentas para os seus produtos.

Conclui-se que, o centro de maquinagem *Akira Seiki Performa Classic V6 XP* apresenta características e dispositivos auxiliares que garantem o fabrico aperfeiçoado das peças da empresa. Assim, apesar de a incorporação do 4º eixo rotativo não se ter revelado vantajosa, existem soluções de programação *offline*, métodos de fixação e ferramentas de corte que podem ainda ser implementadas de modo a potenciar todo fabrico dos componentes para bombas centrífugas.

5.2 Trabalhos Futuros

Tendo em consideração o trabalho realizado, propõe-se no futuro a continuação da investigação dirigida aos três principais modelos abordados nesta dissertação - métodos e dispositivos de fixação das peças, elaboração dos programas de CN e ferramentas de corte.

Relativamente aos métodos de fixação abordados, poderia ser vantajoso discriminar o tempo ganho com a aplicação de cada método na produção de corpos de bombas e carcaças, e verificar a sua aplicabilidade nos restantes modelos de peças existentes da EFAFLU. Também seria relevante desenvolver um sistema de batente para excluir o método de posicionamento das peças em estudo através do esquadro de referência. Através dos cálculos efetuados para os sistemas de fixação automáticos, a empresa poderia evidenciar a solução mais vantajosa a aplicar no centro de maquinagem, como grampos de aperto automático ou uma nova bucha.

A respeito da elaboração dos programas de CN, deveria proceder-se ao desenvolvimento de programas a partir de um sistema de CAM escolhido (ex. *Mastercam*) e à sua execução no controlador da máquina. Por outro lado, o modelo de programação automática da sonda poderia ser testado nas peças em estudo ou nos restantes produtos da empresa, através de um modelo semelhante ao evidenciado na secção 4.2.1. Também seria interessante analisar a uso da sonda na monitorização das variações das peças de fundição, para correção automática dos programas de CN, e na monitorização do desgaste das ferramentas.

Relativamente às ferramentas de corte, seria relevante determinar orçamentos para as ferramentas sugeridas, com dimensões e parâmetros de corte semelhantes, possibilitando posteriormente a escolha da ferramenta mais custo-efetiva. Futuramente, deveriam também

realizar-se testes de maquinagem que permitissem avaliar as vibrações causadas na peça e o acabamento final dos produtos para os parâmetros de corte recomendados.

Por fim, o modelo de ficha de maquinagem poderia ainda ser aplicado às peças da empresa, caso não se adquirisse o *software* CAM. Contudo, apesar do modelo criado poder ser adaptado a qualquer produto do centro de maquinagem, este poderia ser incluído e desenvolvido em formato digital através da criação de uma base de dados que incorporasse todas as ferramentas disponíveis no CM e as informações relativas aos parâmetros de corte, auxiliando o registo das fichas de maquinagem.

Referências

- [1] “TGCL - Bomba radial centrífuga.” [Online]. Disponível em: <http://www.efaflu.pt/>. [03-Jun-2019].
- [2] J. F. Gülich, *Centrifugal Pumps*, 1st ed. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] R. V. Rao, “Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision-making method,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 28, 2006.
- [5] O. F. Alloyed, “Machinability of Alloyed Austempered Ductile Iron,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 35, 1995.
- [6] L. Collini, G. Nicoletto, and R. Koneč, “Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 488, 2008.
- [7] M. Lukhi, M. Kuna, and G. Hütter, “Numerical investigation of low cycle fatigue mechanism in nodular cast iron,” *Int. J. Fatigue*, vol. 113, 2018.
- [8] “Adaptive Control & Monitoring — OMATIVE Systems.” [Online]. Disponível em: <http://www.omative.com/adaptive-control-monitoring>. [27-Mar-2019].
- [9] S.-H. Suh, S.-K. Kang, D.-H. Chung, and I. Stroud, *Theory and Design of CNC Systems*. London: Springer Science & Business Media, 2008.
- [10] X. Dong, Z. Jian-qu, and W. Feng, “Fuzzy PID Control To Feed Servo System of CNC Machine Tool,” *Procedia Eng.*, vol. 29, 2012.
- [11] “Hardware | WireFreeCNC.” [Online]. Disponível em: <https://www.wirefreecnc.com/hardware>. [17-Jun-2019].
- [12] “CTX TC Series - Turn and Mill by DMG MORI.” [Online]. Disponível em: <https://en.dmgmori.com/products/machines/turning/turn-mill/ctx-tc>. [20-Abr-2019].
- [13] “Robo2Go 2nd Generation.” [Online]. Disponível em: <https://en.dmgmori.com/products/automation>. [17-Jun-2019].
- [14] “Voice-enabled Machine Interaction | Makino.” [Online]. Disponível em: <https://www.makino.com/athena>. [Accessed: 23-Mar-2019].
- [15] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, 2nd ed. Courier Corporation, 2013.

- [16] “AKIRA-SEIKI.” [Online]. Disponível em: <https://www.akiraseiki.com/productsDia.php?d=8>. [17-Jun-2019].
- [17] C. Relvas, *Controlo Numérico Computorizado Conceitos Fundamentais*, 1st ed. Publindústria, 2000.
- [18] “OMP60 optical transmission probe.” [Online]. Disponível em: <https://www.renishaw.com/> [20-Jun-2019].
- [19] M. M. Rahman and R. Mayer, “Measurement Accuracy Investigation of Touch Trigger Probe With Five-Axis Machine Tools,” *Arch. Mech. Eng.*, vol. 63, 2016.
- [20] “Power Chucks : Forkardt.” [Online]. Disponível em: <http://www.forkardt.com/chucks/power-chucks/>. [18-Jun-2019].
- [21] R. Iyer, P. Koshy, and E. Ng, “Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 2, pp. 205–210, 2007.
- [22] Palbit S.A., *Palbit General Catalogue*. 2019.
- [23] “Ângulo de posição e espessura de cavacos.” [Online]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/entering-angle-and-chip-thickness.aspx>. [11-Abr-2019].
- [24] “Enerpac | Europa, Middle East, Afrika, India.” [Online]. Disponível em: <https://www.enerpac.com/en-gb/>. [27-Mai-2019].
- [25] “University Workholding - How to choose clamping force.” [Online]. Disponível em: http://www.enerpac.it/html/wh_university/university/lib/topics/issue06/issue06_page2.html. [10-Mai-2019].
- [26] “Small Swing Cylinders | Jergens Inc.” [Online]. Disponível em: <http://www.jergensinc.com>. [12-Jun-2019].
- [27] “Productivity+™ – PC-based probe software for machining centres.” [Online]. Disponível em: <https://www.renishaw.com/en/productivity-pc-based-probe-software-for-machining-centres--6252>. [20-Mar-2019].
- [28] “Silent Tools para fresamento.” [Online]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/> [18-Jun-2019].
- [29] “Mitsubishi Electric - General Catalog Downloads.” [Online]. Disponível em: <https://www.mitsubishielectric.in/fa/cnc-download.php>. [27-Abr-2019].
- [30] “Air Chucks, SP, 3 Jaws, Standard Stroke.” [Online]. Disponível em: <https://www.smwautoblok.com/index.php/sliding-jaw-chucks/sp.html>. [15-Mai-2019].

- [31] “ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools” [*Online*]. Disponível em:
<https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3106411&fnum=3490&mapp=ML&GFSTYP=M&srch=1>. [29-Mar-2019].

ANEXO A: Maquinagem de bombas centrífugas

A.1 – Maquinagem do corpo da bomba TGCL 100L

Este anexo destina-se à representação detalhada da maquinagem do corpo da bomba centrífuga da gama TGCL100L. São identificadas os métodos de fixação, dispositivos auxiliares e operações realizadas nas diferentes fases de maquinagem, tempos de maquinagem e os desenhos detalhados do corpo da bomba TGCL100L. A Figura A1 representa as faces completas a maquinar no corpo de uma bomba.

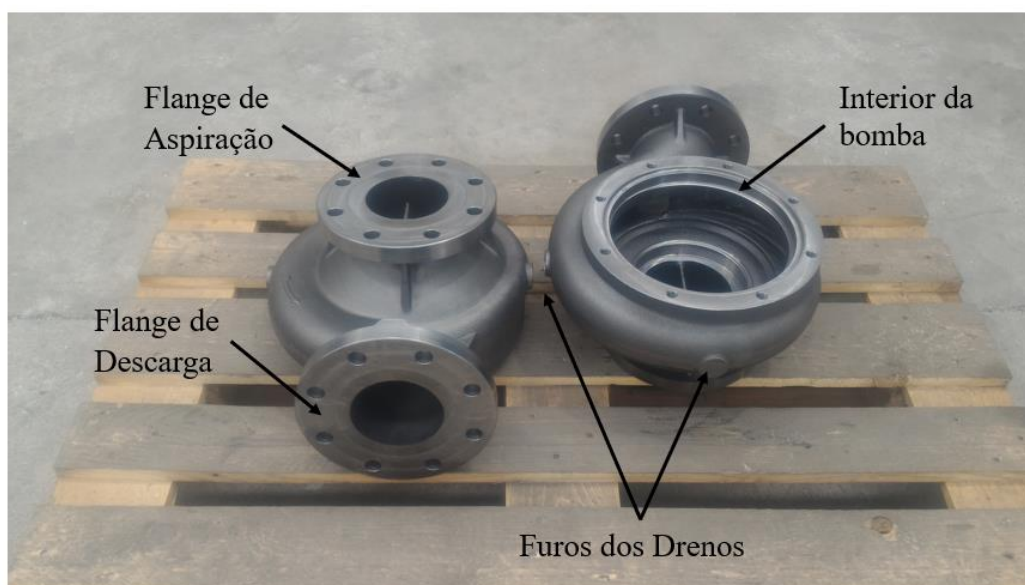


Figura A. 1 Partes a maquinar do corpo da bomba TGCL100L.

Primeira fase de maquinagem – Corpo da Bomba TGCL100L

O método de fixação utilizado na primeira fase de maquinagem é a bucha pneumática. O esquadro identificado apenas serve para orientar a flange da bomba segundo o eixo X da mesa da máquina.



Figura A. 2 Fixações na primeira fase de maquinagem.

A ordem das operações de maquinagem executadas na primeira fase estão representadas na Figura A.3. Na primeira fase de maquinagem é ainda realizado o facejamento parcial da flange de descarga de modo a esta se apoiar sobre o bloco retificado na segunda fase de maquinagem.



- 1 - Facejamento em desbaste e acabamento
- 2 - Contorno exterior em desbaste e acabamento
- 3 - Furação e Escareamento dos furos
- 4 - Facejamento da flange de descarga

Figura A. 3 Operações de maquinagem na primeira fase.

Segunda fase de maquinagem – Corpo da Bomba TGCL 100L

Na segunda fase de maquinagem do corpo da bomba, a flange de aspiração irá apoiar sobre a mesa da máquina e fixada através de grampos de fixação manual. É ainda introduzido um bloco onde irá apoiar a flange de descarga para orientar a peça segundo o eixo X da superfície da mesa.



a)



Bloco de apoio à flange de descarga

Grampos de fixação manual

b)

Figura A. 4 Elementos de fixação segunda fase de maquinagem: a) bomba fixa por grampos; b) bloco de apoio à flange de descarga.

A ordem das operações de maquinagem executas na segunda fase estão representadas na Figura A.5.



- 1 - Facejamento em desbaste e acabamento
- 2 - Contorno interior da bomba e chanfragem 45°
- 3 - Furação, roscagem e escareamento dos furos

Figura A. 5 Operações de maquinagem na segunda fase - corpo da bomba TGCL100L.

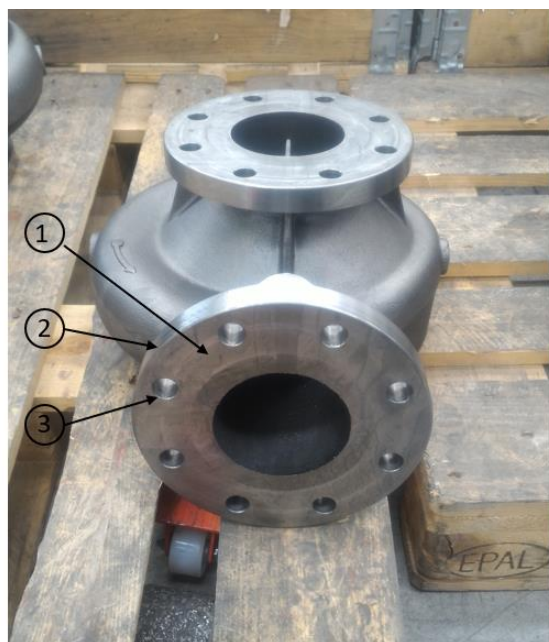
Terceira fase de maquinagem – Corpo da Bomba TGCL 100L

Os métodos de fixação utilizados na terceira fase de maquinagem são o esquadro de fixação e uma barra de aperto manual que irá comprimir a peça contra o esquadro. A bomba poderia estar nesta posição ou com a flange de aspiração contra a o esquadro.



Figura A. 6 Elementos de fixação na terceira fase de maquinagem.

As operações a realizar nesta etapa têm como alvo a flange de descarga da bomba. As operações de maquinagem realizadas são semelhantes às da primeira fase de maquinagem.



- 1 - Facejamento em desbaste e acabamento
- 2 - Contorno exterior em desbaste e acabamento
- 3 - Furação e Escareamento dos furos

Figura A. 7 Operações de maquinagem na terceira fase - corpo da bomba TGCL100L.

Quarta fase de maquinagem – Corpo da Bomba TGCL 100L

Na quarta etapa de maquinagem, o corpo da bomba irá rodar 90° para realizar a maquinagem dos drenos. Os métodos de fixação são os mesmos que a terceira etapa de maquinagem e encontram-se registados na Figura A.8. As operações de maquinagem nesta fase passam pela furação e roscagem dos furos dos drenos.

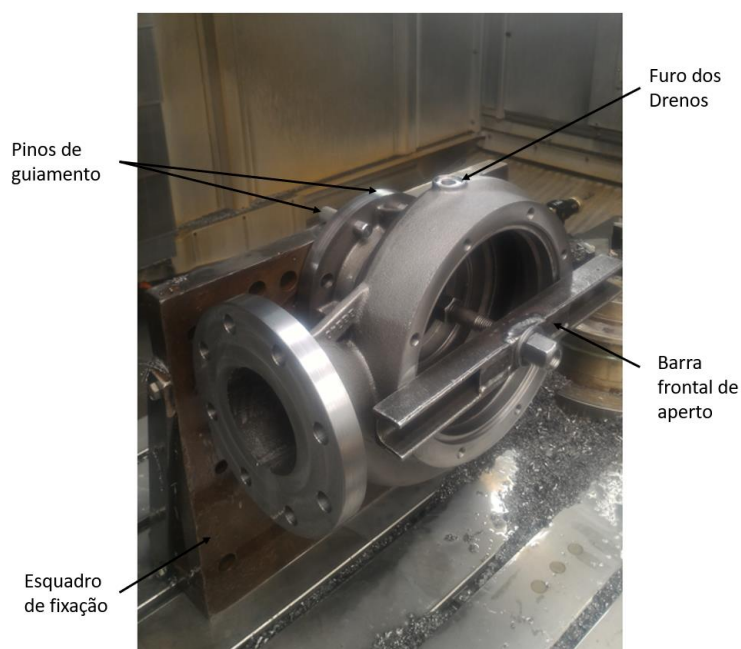


Figura A. 8 Operações de maquinagem na segunda fase - corpo da bomba TGCL100L.

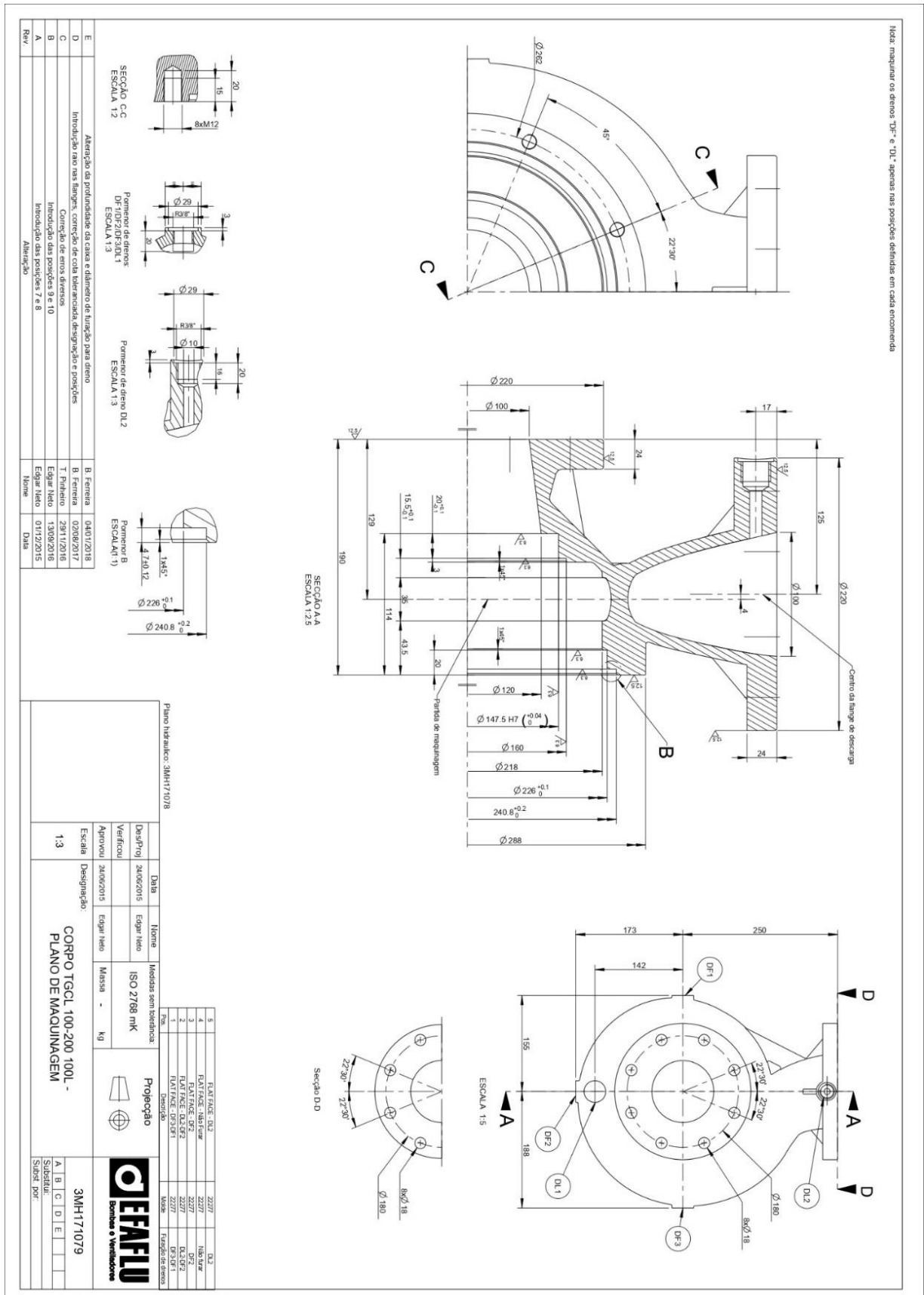


Figura A. 9 Desenho técnico do corpo da bomba TGCL100L.

Tabela A.1 Tempos de *setup* e maquinagem do corpo da bomba TGCL100-200 100L para lotes de 10 unidades.

			Tempo por peça (lotes de 10) (hora:mim:seg)	Tempo por lote de 10 unidades (hora:mim:seg)
1º Fase	Operação de <i>Setup</i>	Montagem da Fixação	00:00:33	00:05:32
		Montagem da peça	00:03:17	00:32:50
		Medição com Sonda	-	-
		Tempo total de <i>Setup</i>	00:03:50	00:38:22
	Operação de maquinagem	Facejamento	00:05:19	00:53:10
		Contornos	00:10:07	01:41:10
		Furação	00:09:59	01:39:50
		Chanfrar/Escarear	00:01:47	00:17:50
		Roscar	-	-
		Tempo total de Maquinagem	00:27:12	04:32:00
2º Fase	Operação de <i>Setup</i>	Montagem da Fixação	00:01:17	00:12:53
		Montagem da peça	00:03:45	00:37:30
		Medição com Sonda	00:01:17	00:12:50
		Tempo total de <i>Setup</i>	00:06:19	01:03:13
	Operação de maquinagem	Facejamento	00:06:08	01:01:20
		Contornos	00:21:56	03:39:20
		Furação	00:06:20	01:03:20
		Chanfrar/Escarear	00:04:49	00:48:10
		Roscar	00:01:21	00:13:30
		Tempo total de Maquinagem	00:40:34	06:45:40
3º Fase	Operação de <i>Setup</i>	Montagem da Fixação	00:01:06	00:10:56
		Montagem de peça	00:04:05	00:40:50
		Medição com Sonda	00:01:13	00:12:10
		Tempo total de <i>Setup</i>	00:06:24	01:03:56
	Operação de maquinagem	Facejamento	00:07:20	01:13:20
		Contornos	00:09:52	01:38:40
		Furação	00:08:06	01:21:00
		Chanfrar/Escarear	00:02:18	00:23:00
		Roscar	-	-
		Tempo total de Maquinagem	00:27:36	04:36:00
TOTAL			01:51:55	18:39:11
DIAS DE TRABALHO			0,23	2,33

Anexo A.2 – Maquinagem da carcaça do motor TGCL100L

Este anexo destina-se à representação detalhada da maquinagem da carcaça da bomba centrífuga da gama TGCL100L. São identificados os métodos de fixação, dispositivos auxiliares e operações realizadas nas diferentes fases de maquinagem, tempos de maquinagem e *setup* e os desenhos detalhados. A Figura A.10 representa as faces completas a maquinar na carcaça de uma bomba TGCL100L.

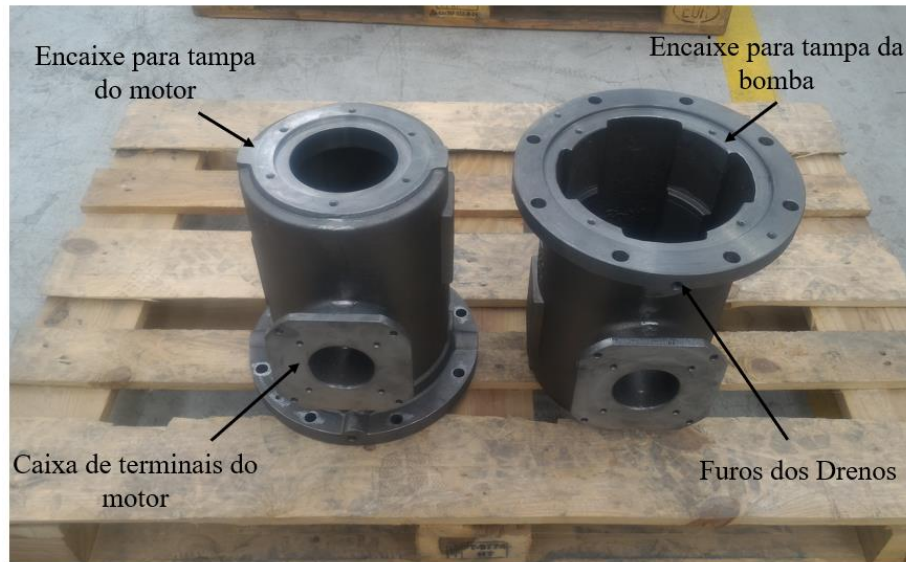
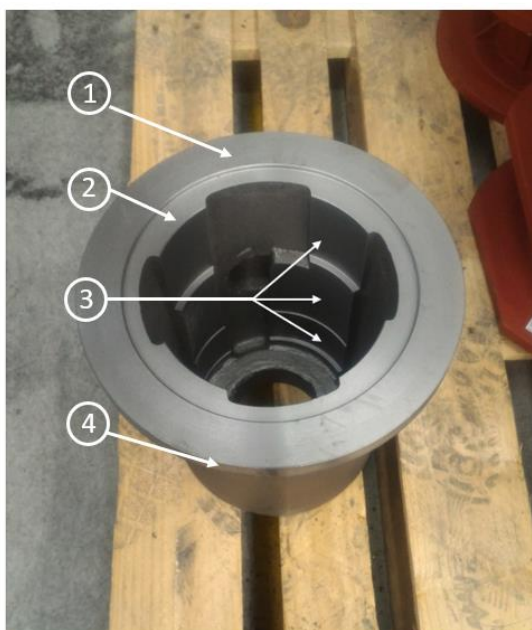


Figura A. 10 Partes a maquinar da carcaça da bomba TGCL100L.

Primeira fase de maquinagem – Carcaça da bomba TGCL100L – Torno vertical

A primeira fase de maquinagem é realizada recorrendo ao torno vertical. Para a fixação da carcaça apenas se recorre à bucha de aperto manual disponível no torno vertical. As operações de maquinagem realizadas apresentam elevada exatidão no interior da carcaça de modo a acoplar o motor elétrico no seu interior. As operações de maquinagem encontram-se na Figura A.11.



- 1 - Faceamento em desbaste e acabamento
- 2 - Torneamento interior – Rebaixo de 5 mm com tolerância H7
- 3 - Torneamento interior da carcaça com 3 diâmetros diferentes – Tolerância S7
- 4 - Torneamento exterior da flange

Figura A. 11 Operações de maquinagem na carcaça TGCL 100L no torno vertical.

Segunda fase de maquinagem – Carcaça da bomba TGCL100L – CM AKIRA-SEIKI

Na segunda fase de maquinagem, quando a carcaça é incluída no centro de maquinagem, os métodos de fixação utilizados para fixar a peça são, grampos de aperto manual, blocos de apoio à flange para garantir a mesma posição durante a troca de peças, e o esquadro de referência que permite alinhar a caixa de terminais da carcaça segundo o eixo X da mesa da máquina.



Figura A. 12 Dispositivos de fixação na segunda fase de maquinagem – CM Akira-Seiki.

A ordem das operações de maquinagem executadas na primeira fase estão representadas na Figura A.13.



Figura A. 13 Operações de maquinagem na segunda fase no CM Akira-Seiki.

Terceira fase de maquinagem – Carcaça da bomba TGCL100L – CM AKIRA-SEIKI

Na terceira fase de maquinagem, realizam-se as furações na flange da carcaça que seriam impossíveis de realizar no torno vertical. Como apenas são realizadas furações, o método de fixação utilizado é simples, através de uma placa (Figura A. 14 a)) que será incorporada no interior da carcaça e feita a conexão à mesa da máquina através de um “T de fixação”. Como auxiliar ao método de fixação, e apesar de não ser apresentado na Figura A.14, é instalado o esquadro de referência para garantir o paralelismo entre o eixo da caixa de terminais da carcaça e o eixo X do plano da mesa.

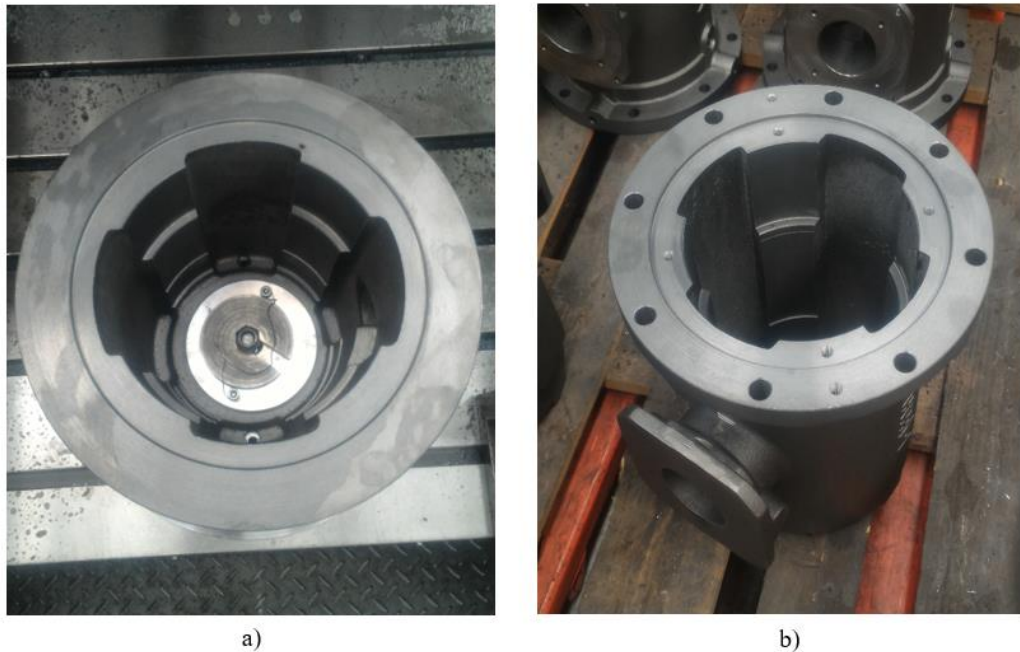


Figura A. 14 Terceira fase de maquinagem: a) fixação por plana no interior da carcaça; b) furações realizadas na flange da carcaça.

Quarta fase de maquinagem – Carcaça da bomba TGCL100L – CM AKIRA-SEIKI

Os métodos de fixação utilizados na quarta fase de maquinagem são o esquadro de fixação, uma barra de aperto frontal que irá comprimir a peça contra o esquadro, dois pinos retificados, e o bloco de apoio para garantir a que a carcaça é sempre maquinada no mesmo local do esquadro (Figura 15). A ordem das operações de maquinagem aplicadas à caixa de terminais está representado na Figura A.16

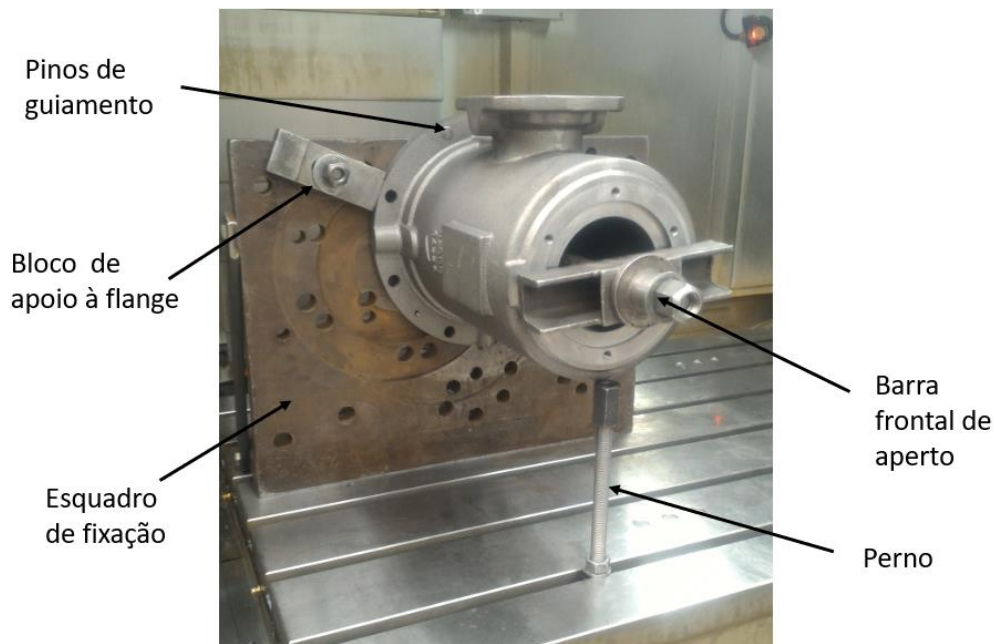
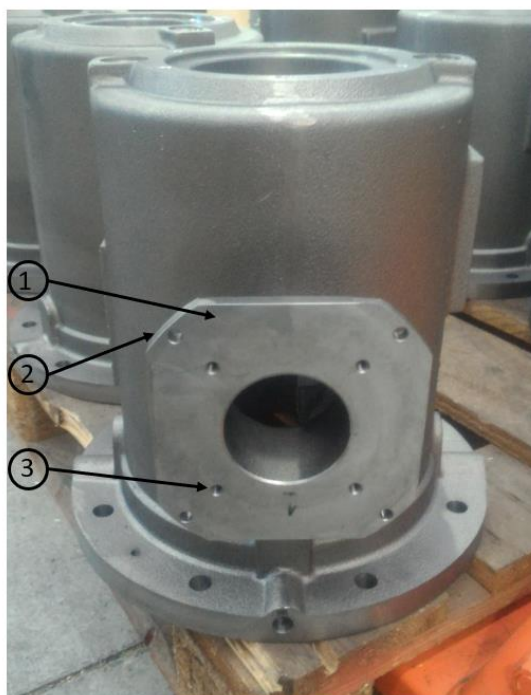


Figura A. 15 Elementos de fixações na quarta fase de maquinagem - carcaça TGCL100L.



- 1 - Facejamento em desbaste e acabamento
- 2 - Contorno exterior em desbaste e acabamento
- 3 - Furações, Escareamento/Chanfragem e roscagem

Figura A. 16 Operações de maquinagem na caixa de terminais da carcaça TGCL100L.

Quinta fase de maquinagem – Carcaça da bomba TGCL100L – CM AKIRA-SEIKI

Na última fase de maquinagem aplicada à carcaça os métodos de fixação utilizados são idênticos à fase anterior. No entanto, a carcaça realiza rotações consecutivas de 90° através da colocação dos pinos de guiamento nos furos da flange (Figura A.17)

Relativamente às operações de maquinagem realizadas nesta fase, apenas se verificam as operações de furação, escareamento e roscagem dos furos dos drenos.

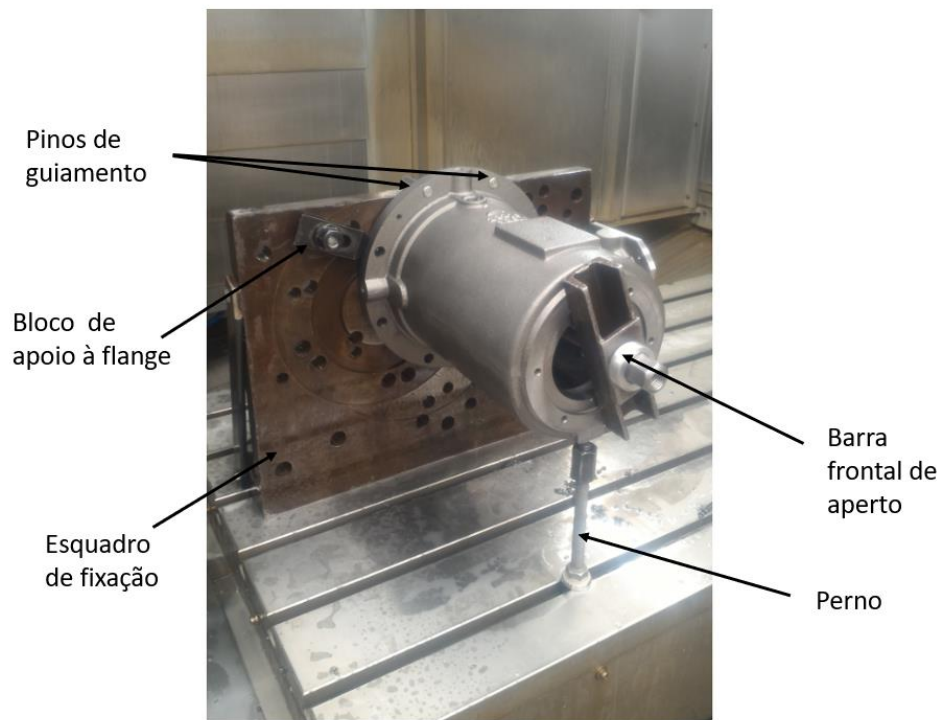


Figura A. 17 Elementos de fixação na quinta fase de maquinagem - carcaça TGCL100L.

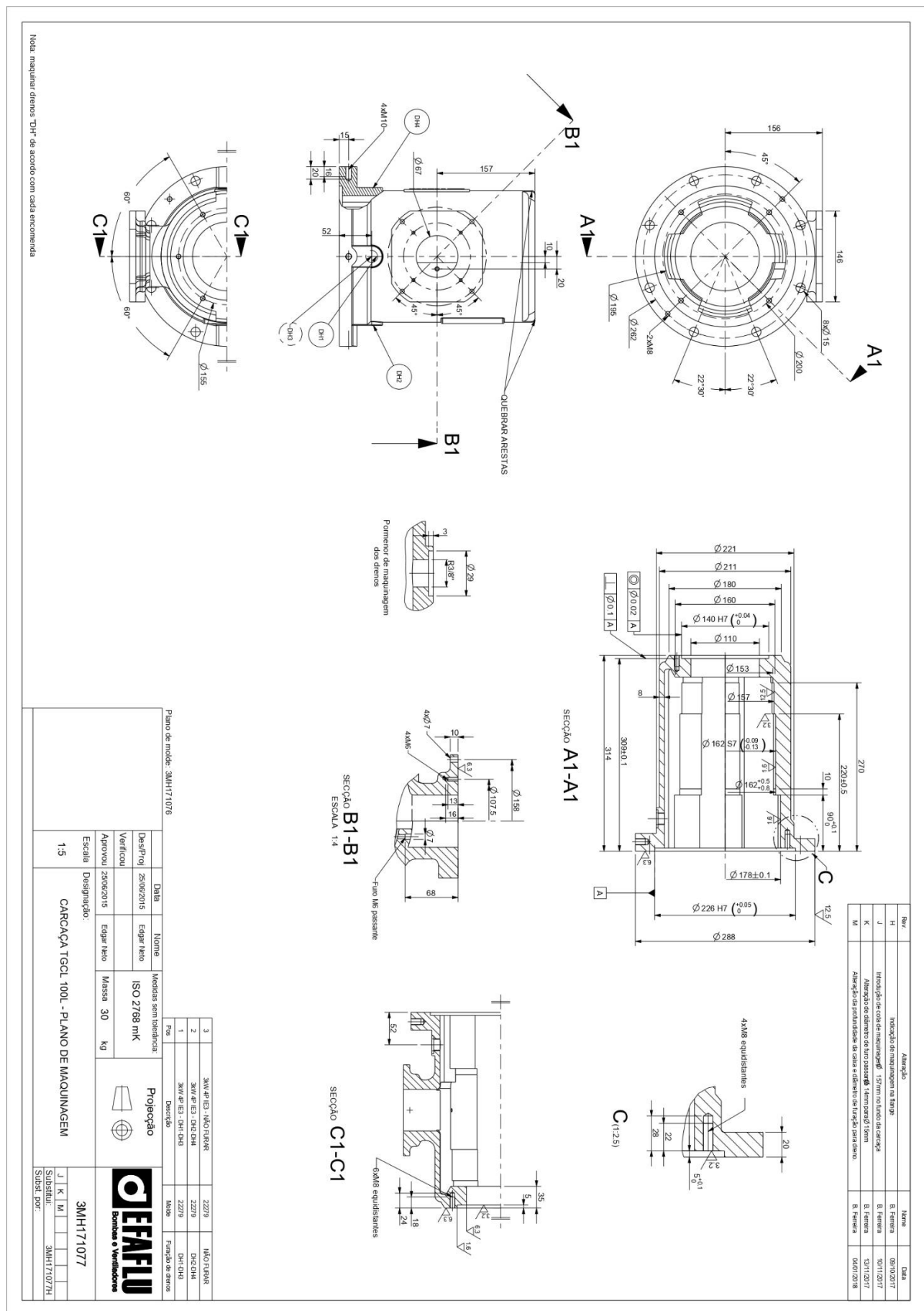


Figura A. 18 Desenho técnico da carcaça da bomba TGCL100L.

Tabela A. 2 Tempos de *setup* e maquinagem da carcaça da bomba TGCL100L.

			Tempo por peça (lotes de 10) (hora:mim:seg)	Tempo por lote de 10 unidades (minutos)
2º Fase	Operação de <i>Setup</i>	Montagem da Fixação	00:01:12	00:11:56
		Montagem da peça	00:06:18	01:03:00
		Medição com Sonda	00:01:20	00:13
		Tempo total de <i>Setup</i>	00:08:50	01:28:16
	Operação de maquinagem	Facejamento	00:05:37	00:56:10
		Contornos	00:07:03	01:10:30
		Furação	00:02:25	00:24:10
		Chanfrar/Escalear	00:02:19	00:23:10
		Roscar	00:01:24	00:14:00
		Tempo total de Maquinagem	00:18:48	03:08:00
3º Fase	Operação de <i>Setup</i>	Montagem da Fixação	00:00:28	00:04:36
		Montagem da peça	00:02:44	00:27:20
		Medição com Sonda	00:01:17	00:12:50
		Tempo total de <i>Setup</i>	00:04:29	00:44:46
	Operação de maquinagem	Facejamento	-	-
		Contornos	-	-
		Furação	00:09:47	01:37:50
		Chanfrar/Escalear	00:02:04	00:20:40
		Roscar	00:02:27	00:24:30
		Tempo total de Maquinagem	00:14:18	02:23:00
4º Fase	Operação de <i>Setup</i>	Montagem da Fixação	00:00:53	00:08:54
		Montagem de peça	00:03:28	00:34:40
		Medição com Sonda	00:01:13	00:12:10
		Tempo total de <i>Setup</i>	00:05:34	00:55:44
	Operação de maquinagem	Facejamento	00:12:58	02:09:40
		Contornos	00:05:47	00:57:50
		Furação	00:04:58	00:49:40
		Chanfrar/Escalear	00:02:08	00:21:20
		Roscar	00:01:14	00:12:20
		Tempo total de Maquinagem	00:27:05	04:30:50
TOTAL			01:19:04	13:10:36
DIAS DE TRABALHO			0,16	1,65

ANEXO B: Documentos do Centro de Maquinagem *Akira-Seiki*

B.1 - Etapas de criação de um programa de maquinagem no controlador Mitsubishi M70V

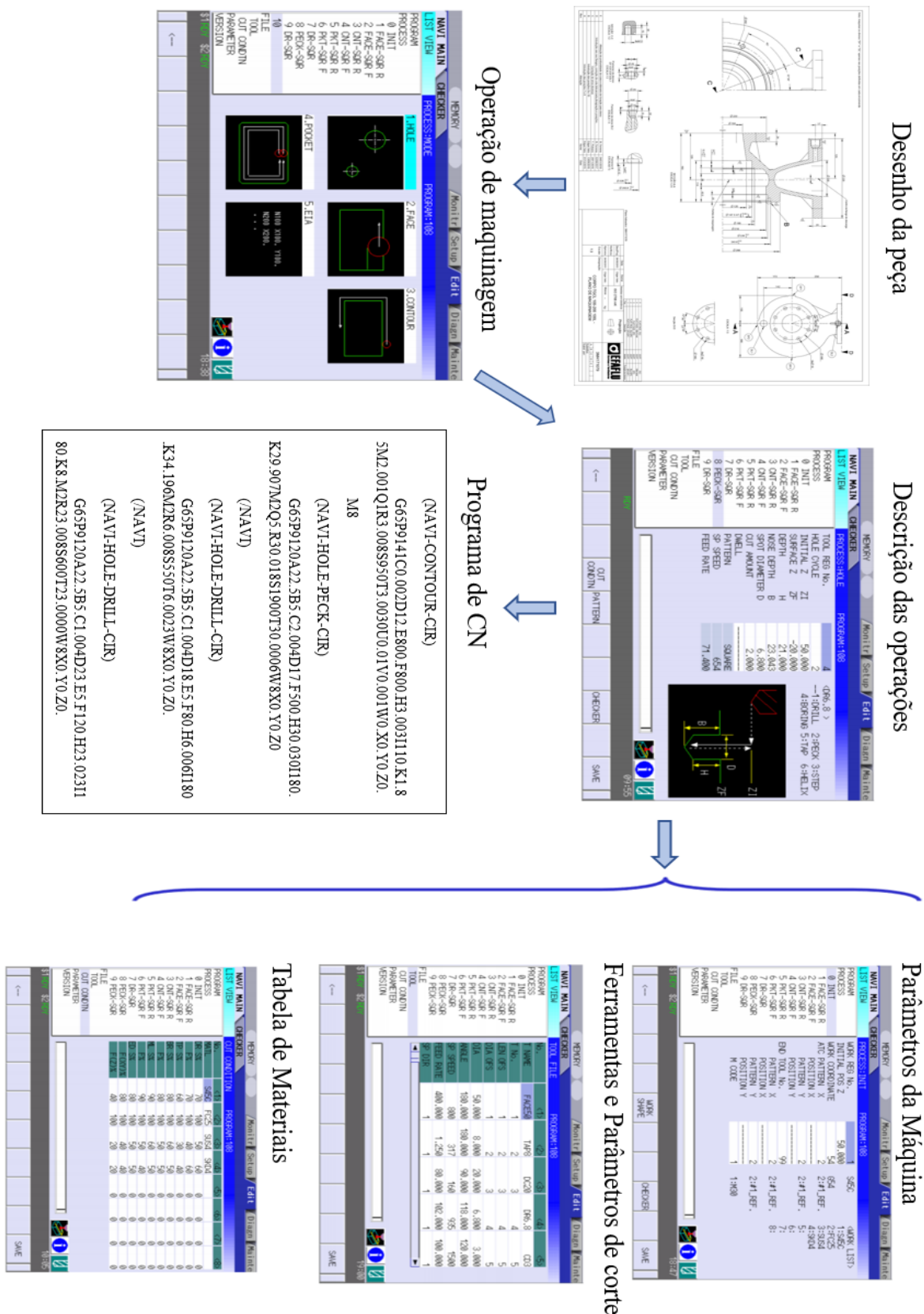


Figura B. 1 Etapas de criação de um programa no controlador.

B.2 – Lista de códigos G do controlador Mitsubishi M70V

O: Modal, x: Unmodal			
G code	Group	Function	Modal
00	01	Positioning	O
01	01	Linear interpolation	O
02	01	Circular interpolation CW (clockwise) / Spiral/Conical interpolation CW (type2)	O
03	01	Circular interpolation CCW (counterclockwise) / Spiral/Conical interpolation CCW (type2)	O
04	00	Dwell	x
05	00	High-speed high-accuracy control II/high-speed machining mode	O
07	00	Hypothetical axis interpolation	O
07.1	21	Cylindrical interpolation	O
107	00	High-accuracy control 1	O
08	00	Exact stop check	x
09	00	Program data input (parameter /compensation data/parameter coordinate rotation data)	-
10	00	Program data input cancel	-
11	00	Circular cut CW (clockwise)	x
12	00	Circular cut CCW (counterclockwise)	x
13	00	Polar coordinate command OFF	-
15	18	Plane selection X-Y	O
16	18	Plane selection Z-X	O
17	02	Plane selection Y-Z	O
18	02	Inch command	O
19	02	Metric command	O
20	06	Stroke check before travel ON	-
21	04	Stroke check before travel cancel	-
22	04	Reference position return	x
23	00	Reference position return	x
27	00	Start position return	x
28	00	2nd to 4th reference position return	x
29	00	Skip/Multi-step skip function 1-1	x
30	00	Skip/Multi-step skip function 1-2	x
31	00	Skip/Multi-step skip function 1-3	x
31.1	00	Thread cutting	O
31.2	00	Special fixed cycle (bolt hole circle)	x
31.3	00	Special fixed cycle (line at angle)	x
33	01	Special fixed cycle (arc)	x
34	00	Automatic tool length measurement	x
35	00		
36	00		
37	00		

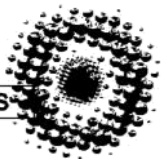
40	07	Tool radius compensation cancel / 3-dimensional tool radius compensation cancel	-
41	07	Tool radius compensation left / 3-dimensional tool radius compensation left	O
42	07	Tool radius compensation right / 3-dimensional tool radius compensation right	O
52	00	Local coordinate system setting	x
53	00	Basic machine coordinate system selection	O
54	12	Workpiece coordinate system 1 selection	O
55	12	Workpiece coordinate system 2 selection	O
56	12	Workpiece coordinate system 3 selection	O
57	12	Workpiece coordinate system 4 selection	O
58	12	Workpiece coordinate system 5 selection	O
59	12	Workpiece coordinate system 6 selection	O
73	09	Fixed cycle (step)	O
74	09	Fixed cycle (reverse tap)	O
75	09	Fixed cycle (circle cutting cycle)	O
76	09	Fixed cycle (fine boring)	O
80	09	Fixed cycle cancel	-
81	09	Fixed cycle (drill/spot drill)	O
82	09	Fixed cycle (drill/counter boring)	O
83	09	Fixed cycle (deep drilling)	O
84	09	Fixed cycle (tapping)	O
85	09	Fixed cycle (boring)	O
86	09	Fixed cycle (back boring)	O
87	09	Fixed cycle (boring)	O
88	09	Fixed cycle (boring)	O
89	09	Fixed cycle (boring)	O
90	03	Absolute value command	O
91	03	Incremental command value	O
92	00	Coordinate system setting	O
92.1	00	Workpiece coordinate system pre-setting	x
93	05	Inverse time feed	O
94	05	Per-minute feed (Asynchronous feed)	O
95	05	Per-revolution feed (Synchronous feed)	O
96	17	Constant surface speed control ON	O
97	17	Constant surface speed control OFF	-
98	10	Fixed cycle initial level return	O
99	10	Fixed cycle R point level return	O

Figura B. 2 Lista de códigos G para o controlador Mitsubishi M70V [29].

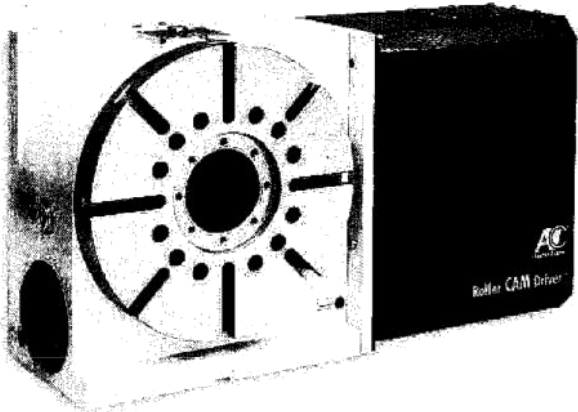
B.3 – Orçamento e dimensões do quarto eixo divisor do centro de maquinagem

stockmachines

186100203-AS



Cotação: Quarto eixo divisor AT320R



Preço base - 15.200,00 €

Acessórios Opcionais:	
• Chumaceira/Contraponto Ø320mm c/ aperto pneumático/hidraulico.	2.405,00 €
• Placa base com 1000 X 318 X 50 mm	8.450,00 €

Página 2 de 4



STOCK MACHINES, LDA.
Rua Pomar de Marvila - Lote 20B
4705-345 - Sequeira - Braga
Portugal

tel
253 197 800

email
geral@stockmachines.pt

url
www.stockmachines.pt

nipc
507 180 615

capital social
500 000 euros

Figura B. 3 Orçamento do 4º eixo divisor.

ANEXO C: Operação realizadas com *Mastercam*

C.1 - Criação dos modelos CAD 3D

Para facilitar a simulação das operações de maquinagem com recurso ao *Mastercam*, inicialmente foi realizada a medição de uma série de 10 peças fundidas e o seu modelo 3D foi projetado tanto para o corpo da bomba como da respetiva carcaça. O tipo de *software* utilizado na criação dos modelos CAD 3D foi o PTC Creo 3.0.

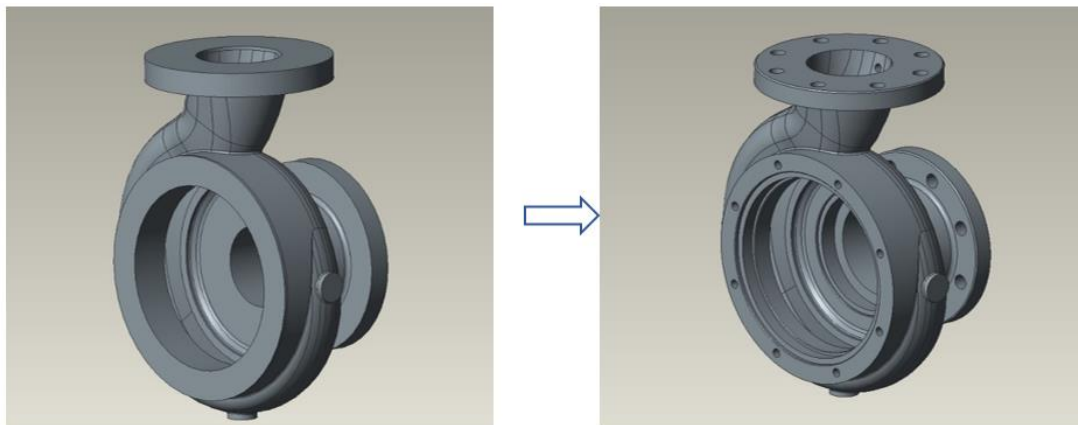


Figura C. 1 Comparação entre o corpo da bomba fundido e maquinado.

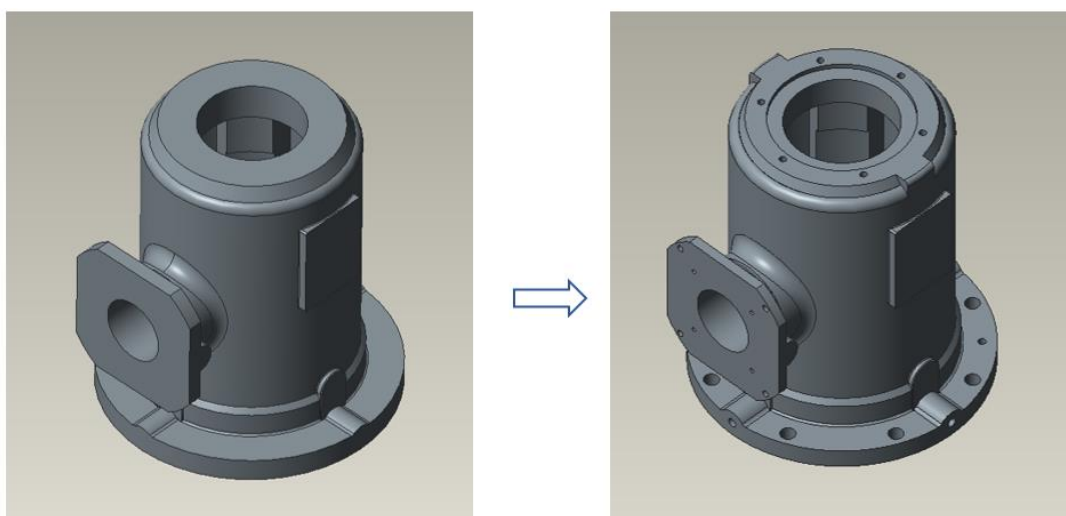


Figura C. 2 Comparação entre o corpo da carcaça fundido e maquinado.

C.2 – Operações realizadas no *Mastercam* para Carcaça TGCL 100L

Após importação dos ficheiros CAD para o *Mastercam* foi possível simular todas as operações de maquinagem tal como está a ser feito no Centro de Maquinagem da empresa. Verificou-se a criação de um total de 37 operações realizadas na carcaça da bomba para concluir a sua maquinagem. As operações de maquinagem utilizadas enquadram-se na categoria de maquinagem 2D disponibilizada pelo *Mastercam*. As operações aplicadas à carcaça estão destacadas na Figura C. 3.

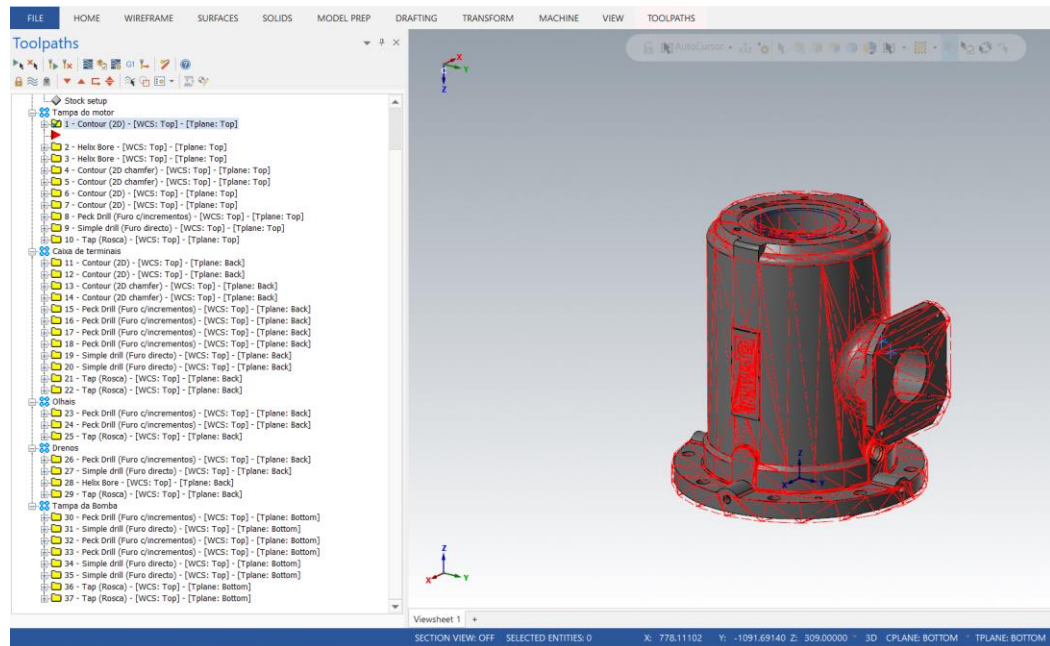


Figura C. 3 Operações de maquinagem do *Mastercam* aplicada à carcaça TGCL100L.

De modo a prever interseções de maquinagem e erros de programação é possível simular a maquinagem com recurso ao *software* CAM. As operações de maquinagem aplicadas à carcaça da bomba encontram-se representadas na Figura C. 4

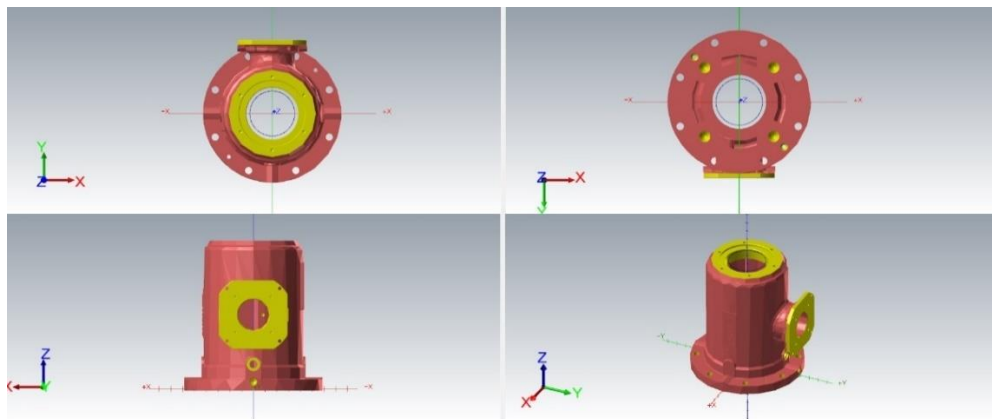


Figura C. 4 Simulação das operações de maquinagem na carcaça TGCL100L.

C.4 – Trajetórias da ferramenta

C.4.1 – Trajetórias otimizadas no *Mastercam* para o corpo da bomba

Através do *Mastercam* foi possível verificar que a grande vantagem na aplicação dos ciclos de faceamento às zonas circulares (como acontece com as flanges) é o ciclo dinâmico em espiral. A Figura C.5 mostra o trajeto da ferramenta (representado a laranja) na aplicação dos ciclos dinâmicos de faceamento no corpo da bomba TGCL100L.

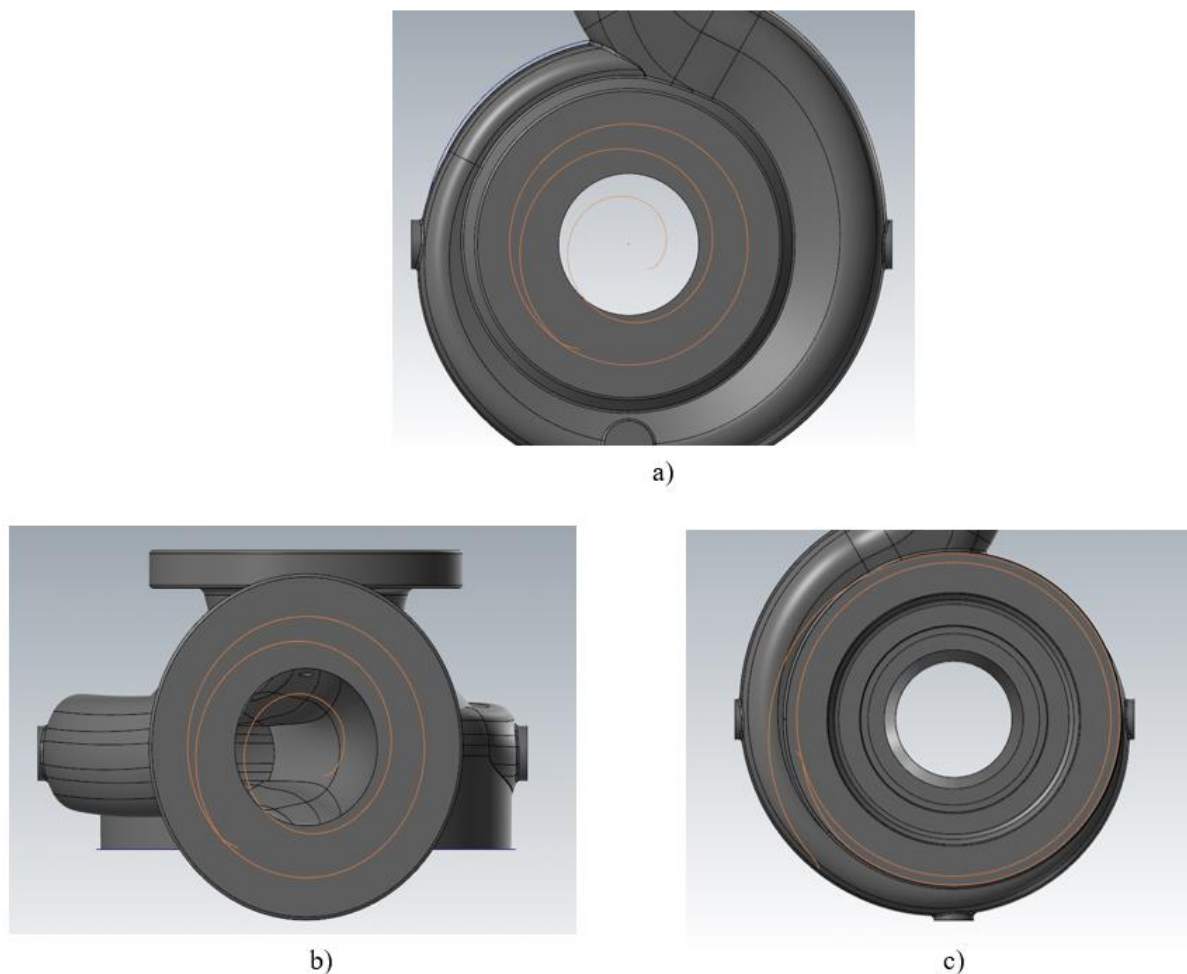


Figura C. 5 Percursos de facejamento otimizados no corpo da bomba através do percurso dinâmico do *Mastercam*: a) Flange de aspiração; b) flange de descarga; c) zona de encaixa da tampa da bomba.

C.4.2 – Trajetos otimizados no *Mastercam* para a carcaça da bomba

Relativamente à carcaça da bomba, também os diferentes ciclos de facejamento foram testados pelo que se verificaram enormes vantagens comparativamente com o ciclo de facejamento atual no controlador da máquina. Na sua aplicação à zona da tampa do motor, devido à sua geometria circular, concluiu-se que o ciclo dinâmico volta a ser a maior vantagem do *Mastercam*, tal como está representado na Figura C. 6.

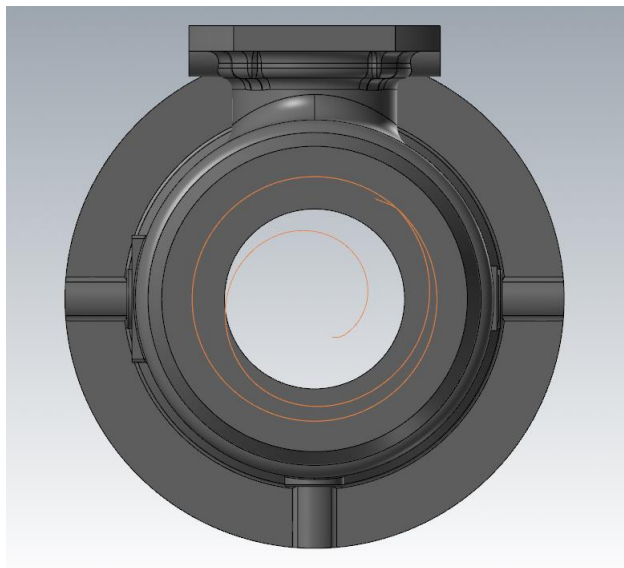


Figura C. 6 Ciclo dinâmico aplicado à zona de encaixe da tampa do motor - Carcaça TGCL100L.

Na caixa de terminais da carcaça, o facto de apresentar uma geometria diferente das restantes analisadas anteriormente, verifica-se uma grande vantagem na aplicação de outros ciclos de facejamento no *Mastercam*, tal como a Morph Spiral, Zig-Zag, True Spiral e novamente o ciclo dinâmico. A representação destes 4 ciclos na zona da caixa de terminais está ilustrada na Figura C. 7.



Figura C. 7 Ciclos de facejamento aplicado à zona da caixa de terminais da carcaça: a) Dinamic Mill; b) Zig-Zag; c) True Spiral; d) Morph Spiral.

ANEXO D: Novos métodos de fixação

D.1 - Mesa de Fixação

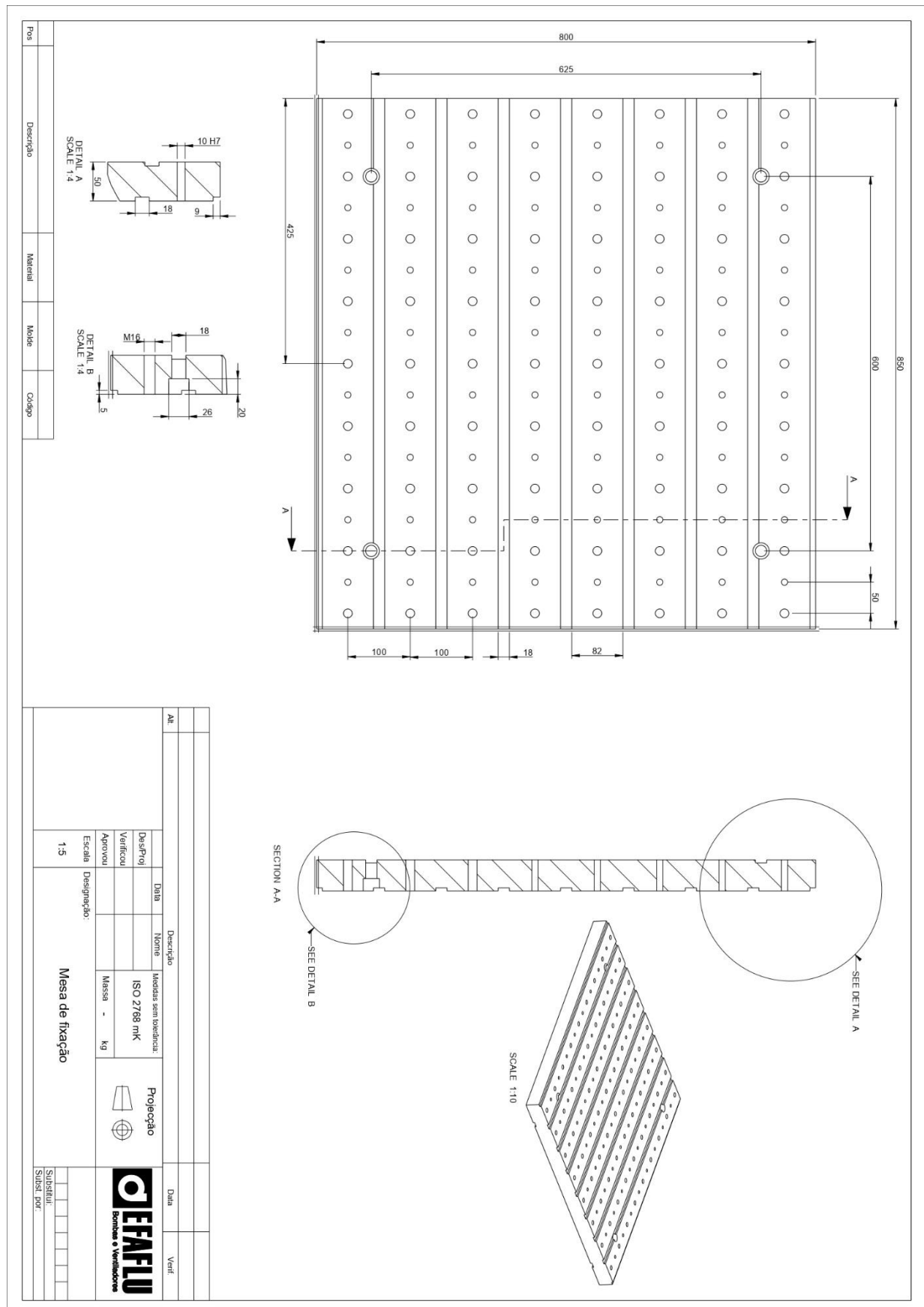


Figura D. 1 Desenho da mesa de fixação.

D.2 - Esquadro de Suporte

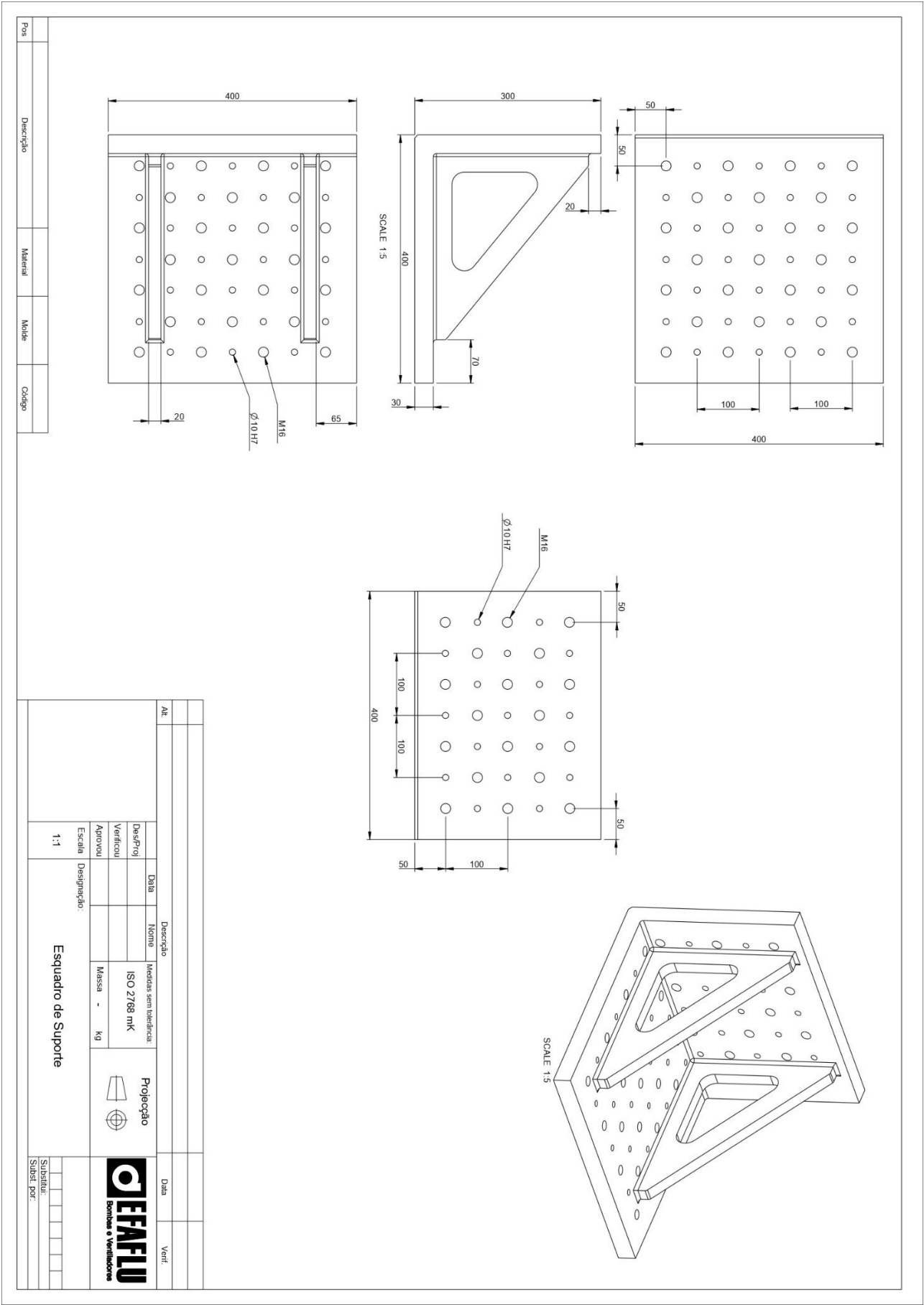


Figura D. 2 Desenho do esquadro de suporte.

D.3 - Prato para fixação de Bombas

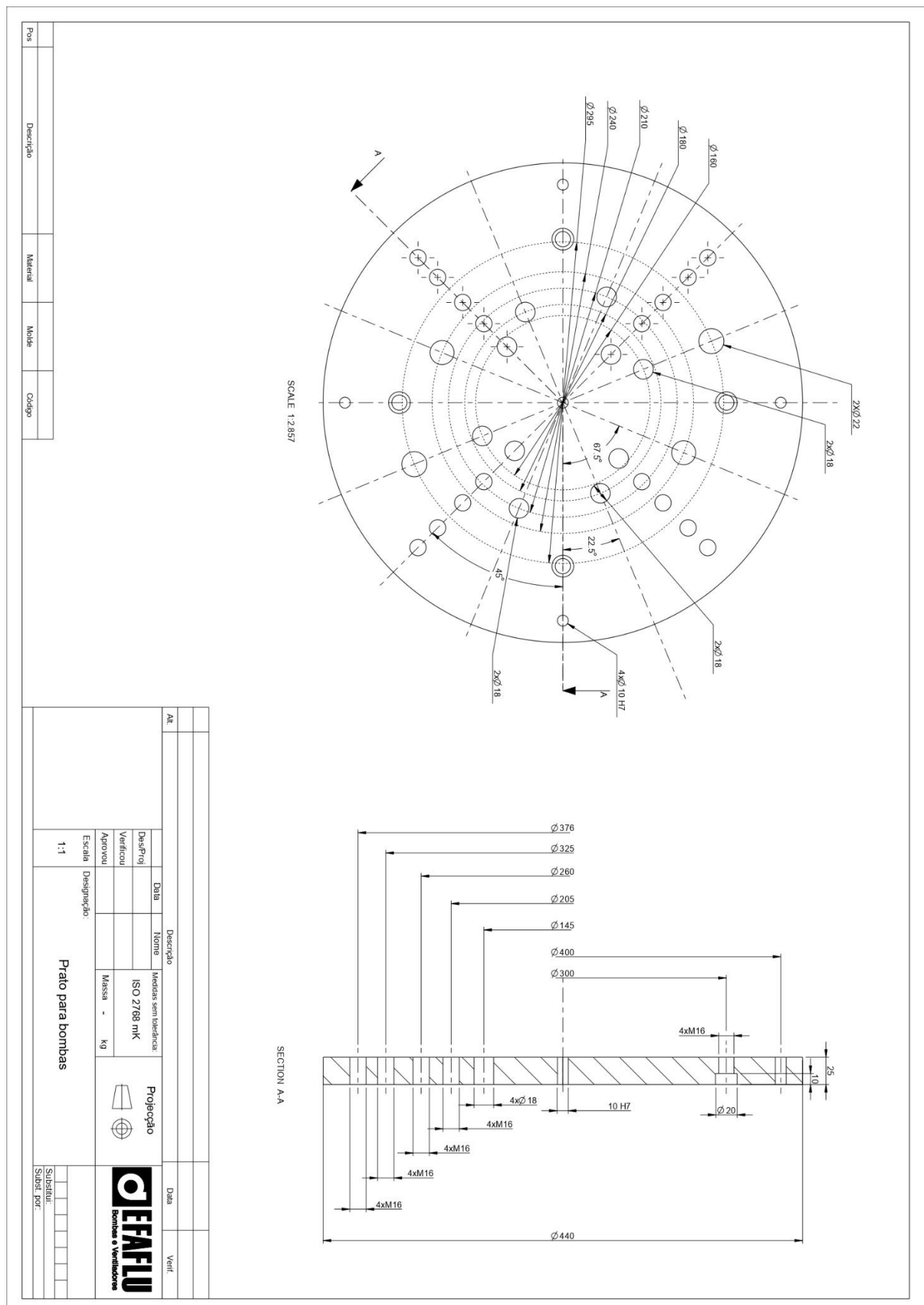


Figura D. 3 Desenho do prato de apoio para bombas.

D.4 - Prato para fixação de carcaça TGCL 112M

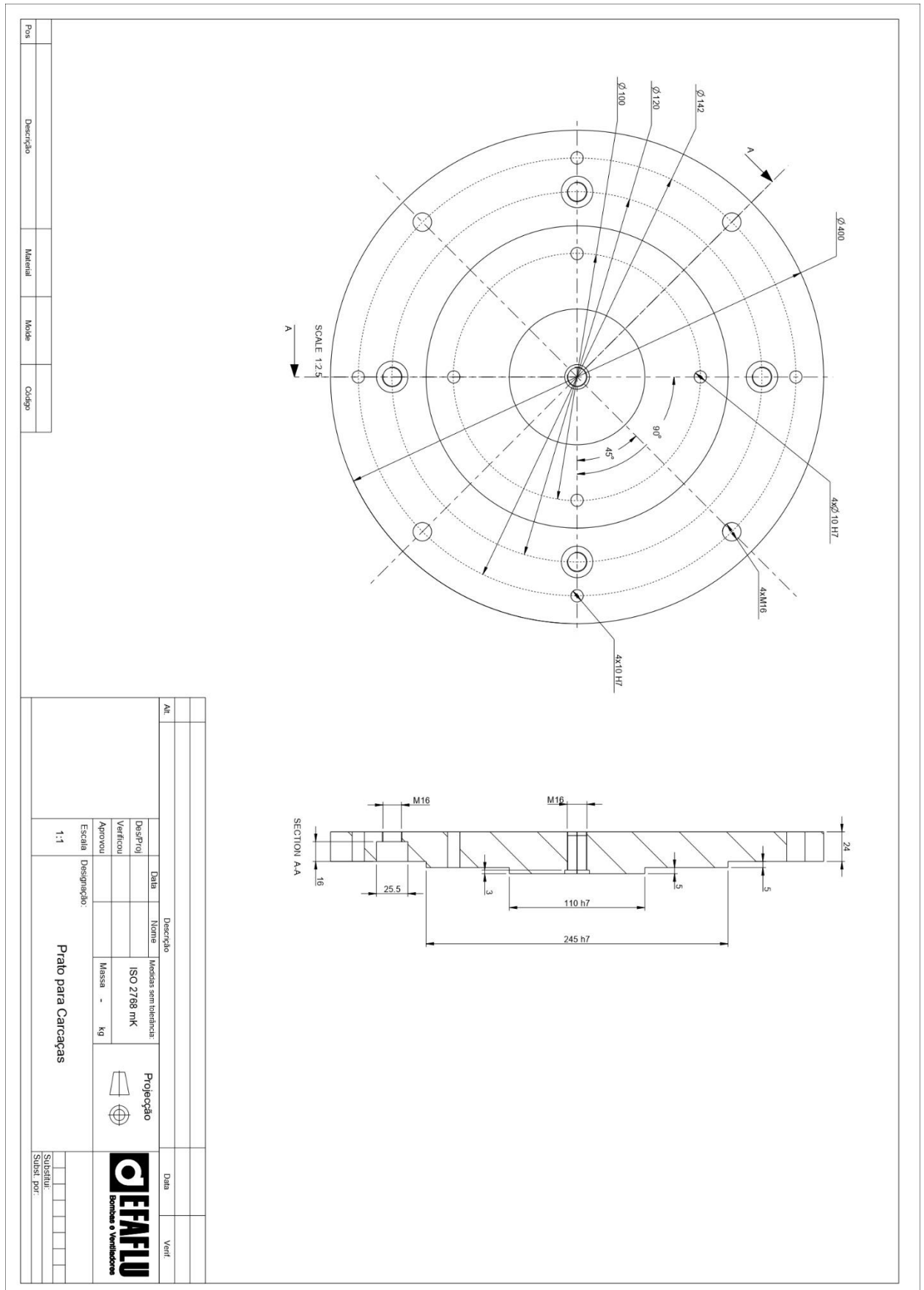


Figura D. 4 Desenho do Prato de apoio para carcaça TGCL 112M.

D.5 - Placa para prato de apoio das carcaças - TGCL 100L

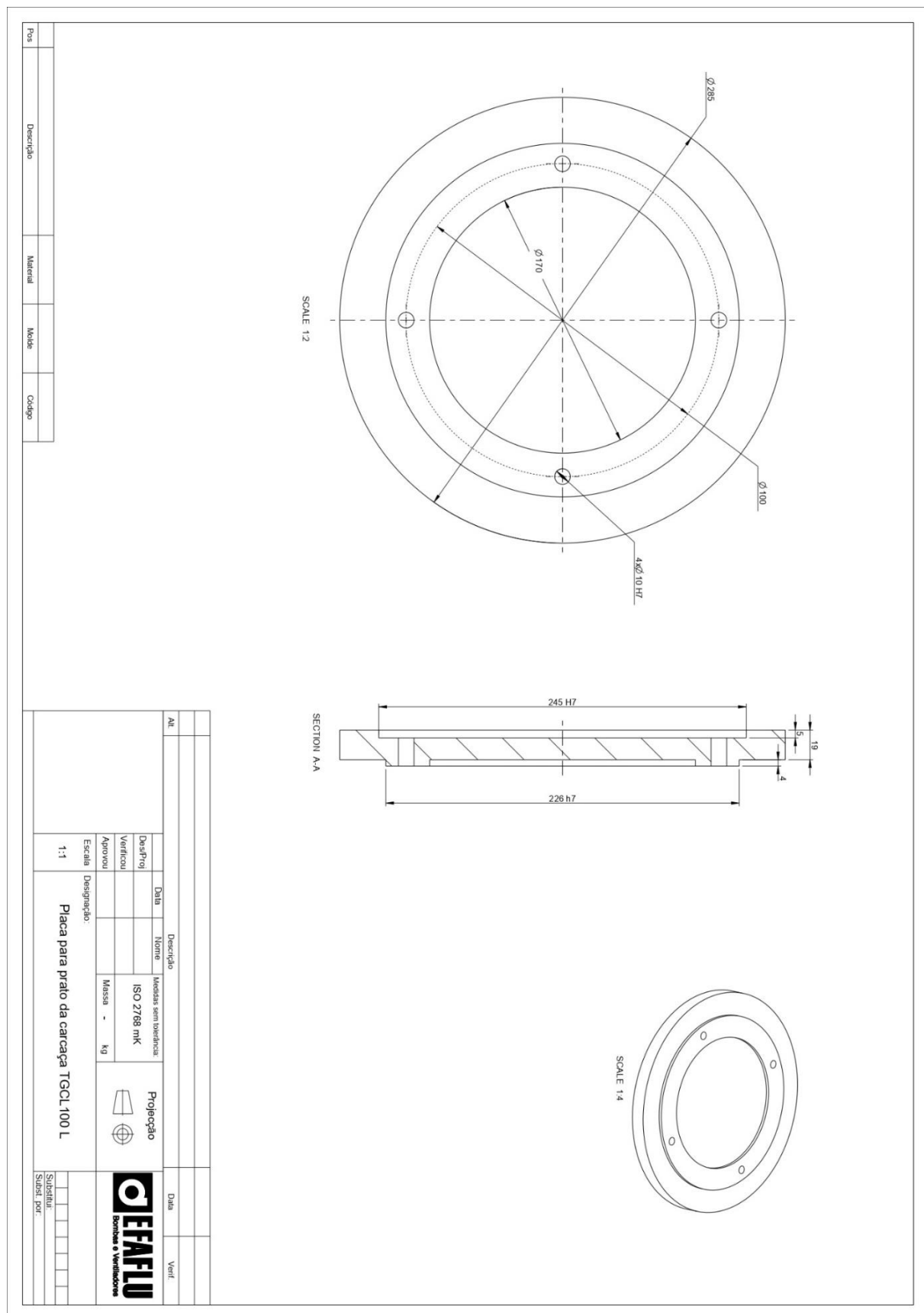


Figura D. 5 Placa para prato da carcaça TGCL 100L.

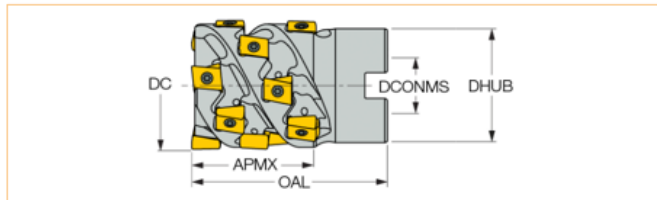
ANEXO E: Novas ferramentas para o centro de maquinagem

E.1 - Fresa de topo de pastilhas intercambiáveis - ISCAR

Items Per Package : 1

ae max for regular inserts, up to 0.25xD, ae max for -CS (chip splitting) inserts, up to 0.30xD.

Family Designation: **T490 SM-08** Extended flute shell mills carrying T490 LNMT/HT 0804... tangentially clamped inserts (HELITANG T490 Line).



Item Designation: **T490 SM D050-44-5-22-08**

Non ISO ISO 13399

DC	APMX	NOF	CICT	OAL	DHUB	DCONMS	Arbor	MIID
50.00	44.00	5	30	65.00	47.00	22.00	A	0.61

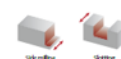
	Item No.	Item Desc.		Qty.	Price €	Disc.1	Net Price	Total Value
1	3106411	T490 SM D050-44-5-22-08		1	772,00	30.0 %	540,40	540,40
2	5605471	T490 LNMX 0804PN-R IC910		30	16,20	15.0 %	13,77	413,10
								953,50

Figura E. 1 Parâmetros de corte e orçamento da fresa de topo [31].

E.2 – Fresa de topo de metal duro integral – Palbit

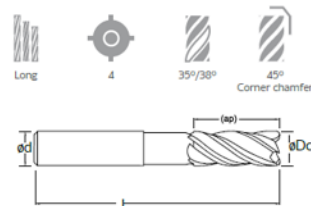
HC35ML Corner Chamfer, Variable Helix 35° - 38°, Long Length

HRC
≤ 60



STEEL MATERIALS

P K H



All order codes are cylindrical shank.
Weldon shank available under request.

Order code Código	Reference Referência	Ø	Dimensions Dimensões Dimensiones (mm)				Stock
			ØDc	Ød	ap	L	
211221100	HC35ML 4 040 11	4	4	6	11	57	⊗
211102300	HC35ML 4 060 13	4	6	6	13	57	⊗
1180052G4	HC35ML 4 080 19	4	8	8	19	63	⊗
1180053G4	HC35ML 4 100 22	4	10	10	22	72	⊗
211102600	HC35ML 4 120 26	4	12	12	26	83	⊗
211102700	HC35ML 4 160 32	4	16	16	32	92	⊗
211102800	HC35ML 4 200 38	4	20	20	38	104	⊗

⊗ Stock item | Produto de stock | Itens de stock

○ Available under request | Disponível sobre consulta | Disponible bajo consulta

Figura E. 2 Seleção da fresa de topo de diâmetro 20 mm [22].

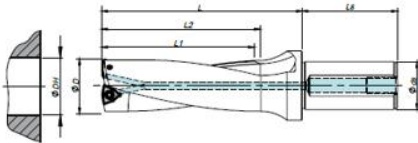
RECOMMENDED CUTTING SPEEDS (m/min)

Velocidades de corte recomendadas (m/min) | Velocidades de corte recomendables (m/min)

ISO	Material	Vc (m/min)	
		min	max
P	Non-alloy Steel < 600 N/mm ²	250	325
	Non-alloy Steel < 800 N/mm ²	210	300
	Alloy Steel 800 N/mm ² - 1000 N/mm ²	175	250
	Alloy Steel 1000 N/mm ² - 1400 N/mm ²	125	210
	Alloy Steel 1400 N/mm ² - 1600 N/mm ²	80	150
M	Ferretic/Martensetic Stainless Steel - Soft	120	175
	Ferretic/Martensetic Stainless Steel - Hard	80	110
K	Cast Iron - Soft	210	250
	Cast Iron - Hard	140	175
N	Aluminium Si < 2% - Soft	400	600
	Aluminium Si 2 - 10% - hard	200	250
	Copper/Copper Alloys - Soft	400	600
	Brass - Soft	200	250
S	Heat resistant super alloys	25	60
H	Hardened materials 46-54 HRC	300	500
	Hardened materials 55-62 HRC	200	400
	Hardened materials 63-70 HRC	180	300

Figura E. 3 Parâmetros de corte na fresa de topo para ferro fundido [22].

E.3 – Broca de pastilhas intercambiáveis - Palbit

Order code	Reference	Dimensions Dimensões Dimensiones (mm)						Insert	Insert Screw	Torx key	Stock
Código	Referência	ØD	Ød	L1	L2	L					
184034600	TDS 13020-3D	13,0	20	39	42	62		WCKX 02T104	PO180500	XT06	●
184034700	TDS 13520-3D	13,5	20	41	44	64		WCKX 02T104	PO180500	XT06	●
184034800	TDS 14020-3D	14,0	20	42	45	65		WCKX 02T104	PO180500	XT06	●
184034900	TDS 14520-3D	14,5	20	44	47	67		WCKX 02T104	PO180500	XT06	●
184035000	TDS 15020-3D	15,0	20	45	48	68		WCKX 02T104	PO180500	XT06	●
184035100	TDS 15520-3D	15,5	20	47	50	70		WCKX 02T104	PO180500	XT06	●
184035200	TDS 16025-3D	16,0	25	48	51	76		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035300	TDS 16525-3D	16,5	25	50	53	78		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035400	TDS 17025-3D	17,0	25	51	54	79		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035500	TDS 17525-3D	17,5	25	53	56	81		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035600	TDS 18025-3D	18,0	25	54	57	82		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035700	TDS 18525-3D	18,5	25	56	59	84		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035800	TDS 19025-3D	19,0	25	57	60	85		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184035900	TDS 19525-3D	19,5	25	59	62	87		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184036000	TDS 20025-3D	20,0	25	60	63	88		WCKX 030204	PO220500	XT07	●
184036100	TDS 20525-3D	20,5	25	62	65	90		WCKX 040204	PO250503	XT08	●
184036200	TDS 21025-3D	21,0	25	63	66	91		WCKX 040204	PO250503	XT08	●
184036300	TDS 21525-3D	21,5	25	65	68	93		WCKX 040204	PO250503	XT08	●
184036400	TDS 22025-3D	22,0	25	66	69	94		WCKX 040204	PO250503	XT08	●
184036500	TDS 22525-3D	22,5	25	68	71	96		WCKX 040204	PO250503	XT08	●

Figura E. 4 Seleção de brocas de pastilhas intercambiáveis para a flange do corpo da bomba [22].

JET DRILLS

Recommended Speeds and Feeds | Parâmetros de Corte Recomendados
Recomendaciones de Datos de Corte

ISO	Material Group Grupo Materiais	Vc (m/min)	Ø13-15,5	Ø16-20	Ø20,5-25	Ø25,5-30	Ø31-41	Ø42-58	Ø59-80
P	UNALLOYED STEEL (<0,25%)	180-260	0,05-0,08	0,06-0,10	0,07-0,12	0,09-0,15	0,11-0,18	0,15-0,28	0,11-0,18
	LOW-ALLOY STEEL (0,25%-)	150-240	0,05-0,08	0,06-0,10	0,07-0,12	0,09-0,15	0,11-0,18	0,15-0,28	0,11-0,18
	LOW-ALLOY STEEL	120-240	0,05-0,08	0,06-0,10	0,07-0,12	0,09-0,15	0,11-0,18	0,15-0,28	0,11-0,18
	HIGH-ALLOY STEEL	130-220	0,05-0,08	0,06-0,10	0,07-0,12	0,09-0,15	0,11-0,18	0,15-0,28	0,11-0,18
M	STAINLESS STEEL	150-220	0,04-0,08	0,05-0,09	0,06-0,12	0,07-0,13	0,08-0,16	0,10-0,20	0,08-0,16
K	GREY CAST IRON	150-250	0,05-0,11	0,07-0,13	0,08-0,12	0,10-0,18	0,14-0,26	0,18-0,35	0,14-0,26
	CAST IRON WITH NODULAR CAST	120-200	0,05-0,11	0,06-0,13	0,07-0,12	0,08-0,18	0,14-0,26	0,18-0,35	0,14-0,26
N	ALUMINIUM FORGING ALLOYS	300-380	0,04-0,06	0,05-0,07	0,06-0,08	0,07-0,09	0,10-0,14	0,12-0,17	0,10-0,14
	ALUMINIUM CAST ALLOYS	260-330	0,04-0,06	0,05-0,07	0,06-0,08	0,07-0,09	0,10-0,14	0,12-0,17	0,10-0,14
S	SUPER-ALLOYS AND TITANIUM	40-80	0,03-0,05	0,04-0,06	0,04-0,07	0,05-0,08	0,06-0,10	0,07-0,13	0,06-0,10

Figura E. 5 Parâmetros de corte para broca de pastilhas [22].

E.4 – Escareador – Palbit/ Inova Tools

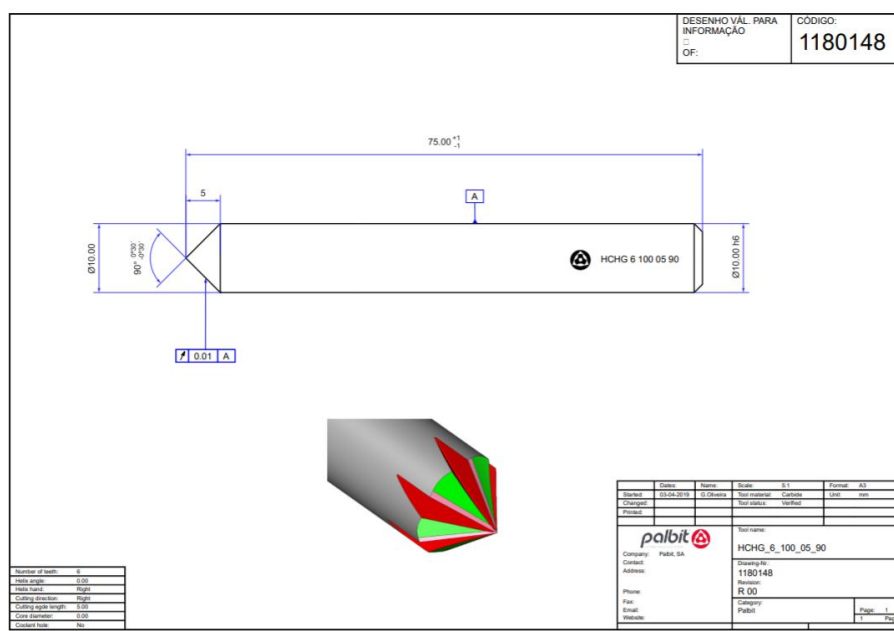


Figura E. 6 Dimensões do escareador.

Foi possível a importação desta ferramenta, com as mesmas dimensões e parâmetros de corte sugeridos pela Inova Tools, para o *Mastercam*. A importação destas ferramentas encontra-se nas figuras E.7 e E.8.

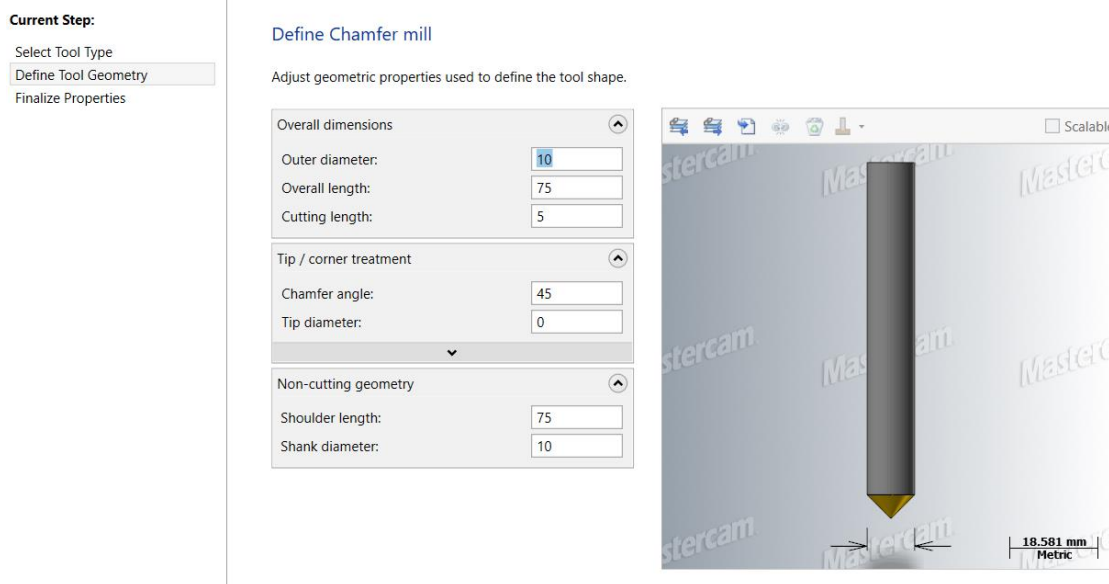


Figura E. 7 Criação do escareador da Inova Tools no *Mastercam*.

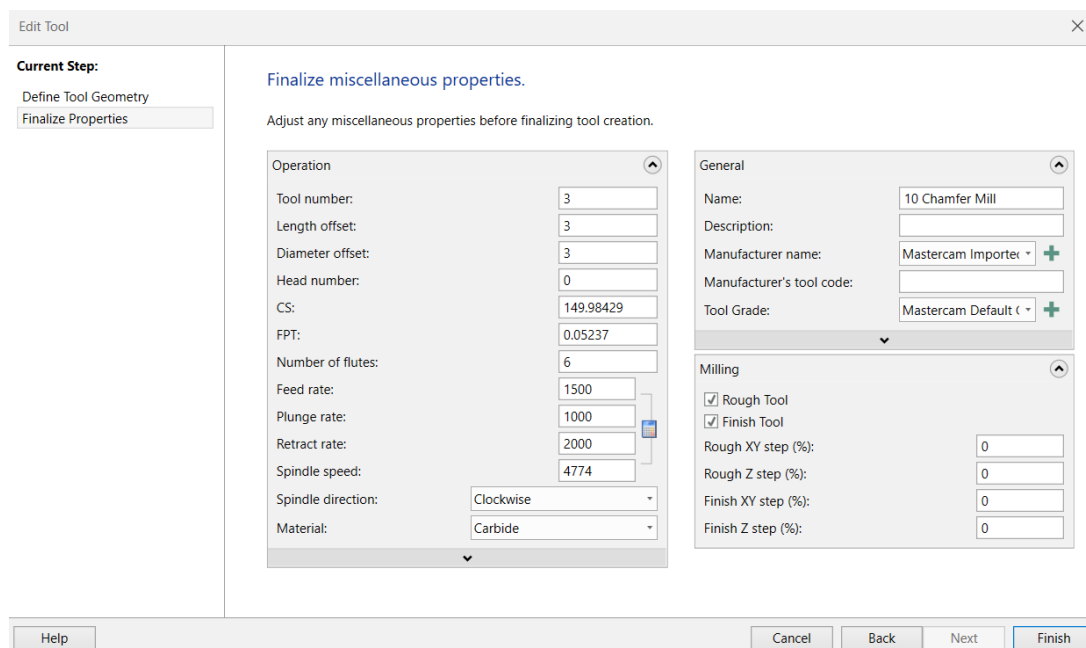


Figura E. 8 Parâmetros de corte utilizados no escareador - Inova Tools.