



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Trabalho de Projeto

Estudo de processos de maquinagem aeroespacial de um estabilizador vertical

Pedro Miguel Beco Prates

Orientador(es) | Joaquim Guerreiro Marques
David Viana Guerreiro Figueira

Évora 2024





Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Trabalho de Projeto

**Estudo de processos de maquinagem aeroespacial de um
estabilizador vertical**

Pedro Miguel Beco Prates

Orientador(es) | Joaquim Guerreiro Marques
David Viana Guerreiro Figueira

Évora 2024



O trabalho de projeto foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Fernando Manuel Janeiro (Universidade de Évora)

Vogais | Joaquim Guerreiro Marques (Universidade de Évora) (Orientador)
Vera Pires (Universidade de Évora) (Arguente)



UNIVERSIDADE
DE ÉVORA



Agradecimentos

Este trabalho de Projeto marca o último passo para a obtenção do grau académico de mestre, o que representa um grande objetivo pessoal. Desta forma, gostaria de agradecer solenemente a todos os que contribuíram para a realização e conclusão desta etapa.

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, professor Joaquim Guerreiro Marques, por toda a disponibilidade, apoio e motivação dados na realização e conclusão deste Projeto.

Gostaria de agradecer, também, a toda a equipa de Engenharia de Manufatura de Montagem, Aernnova Évora, pelo apoio prestado durante todo o percurso académico. Gostaria de agradecer em especial ao meu orientador externo, o engenheiro David Figueira, por todo o apoio e disponibilidade demonstrados durante a realização deste Projeto.

Por fim, gostaria de agradecer a toda a minha família, e em especial à minha namorada, por todo o apoio e compreensão demonstrados durante todo o meu percurso académico.



Estudo de processos de maquinagem aeroespacial de um estabilizador vertical

Resumo

Este trabalho de Projeto tem como principal foco o estudo e melhoria de dois processos de maquinagem aeroespacial utilizados durante a montagem do estabilizador vertical do avião militar KC-390.

Com este trabalho pretende-se estudar e melhorar os valores de planeza obtidos ao facear a raiz da empenagem durante uma fase avançada da montagem, focando também na melhoria do tempo de ciclo da operação e melhorar o valor final de circularidade do furo responsável por unir o estabilizador vertical com o estabilizador horizontal, diminuindo assim o número de não conformidades.

Durante a realização deste trabalho foram testadas e implementadas várias alterações no processo que se traduziram em melhorias. Na operação de faceamento da raiz a alteração do cabeçote e das pastilhas de corte melhorou o tempo de ciclo da operação em cerca de 10 %. Na operação de alargamento do furo do *bore* as melhorias foram principalmente operacionais, clarificando as instruções e o correto procedimento a seguir. Foi também calibrada uma ferramenta de corte com o diâmetro de corte perto do limite mínimo da tolerância dimensional do furo, estas alterações contribuíram para que a condição do furo ficasse conforme desenho nas três ordens acompanhadas.

Palavras-Chave

Estabilizador Vertical, Maquinagem, Planeza, Circularidade e Tolerâncias.

A informação contida neste documento é propriedade da Aernnova e do seu autor, não podendo ser usada, copiada ou reproduzida sem a autorização do mesmo.



Study of aerospace machining processes of a vertical stabilizer

Abstract

The scope of this Project is the study and improvement of two aerospace machining processes used during the assembly of the vertical stabilizer of the military grade aircraft KC-390.

This project aims to study and improve the final flatness after a face milling operation during the final steps of the vertical stabilizer assembly improving the operation cycle time, and to improve the overall circularity of the bore used to assemble the vertical stabilizer and horizontal stabilizer thus reducing the number of non-conformities.

During this work, several changes were tested and implemented in the process, which resulted in improvements. In the face milling operation, the change of the face milling tool and inserts improved the overall operation cycle time in 10 %. In the boring operation the improvements were mainly operational, clarifying the instructions and the correct procedure to follow. A cutting tool was also calibrated with a diameter closer to the lower limit of the dimensional value of the bore, these changes contributed to the condition of the hole being in accordance with the drawing in the three orders monitored.

Keywords

Vertical Stabilizer, Machining, Flatness, Circularity and Tolerance

The information contained in this document is property of Aernnova and its authors and cannot be used, copied, or reproduced without a written Authorization.



Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice.....	xi
Índice de Tabelas	xiii
Índice de Figuras	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xvii
Glossário	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento técnico.....	1
1.2. Introdução à Empresa e ao Cliente	1
1.3. Introdução à Embraer.....	2
1.4. Introdução ao KC-390 / C-390 Millennium	2
1.5. Introdução ao problema em estudo	4
1.6. Estrutura do projeto de mestrado	5
2. Avaliação GD&T	7
2.1. História.....	7
2.2. Sistema <i>True-Position</i>	8
3. Furo do <i>Bore</i>	11
3.1. Explicação da Operação	11
3.2. Fluxo produtivo Típico	12
3.3. Pé de Pato	13
3.4. Link	15
3.5. Caixão.....	15
3.6. Alargamento do Furo do <i>Bore</i>	17
3.7. Operação de <i>Boring</i>	18



3.8.	Validação do Furo	19
3.9.	Máquina-Ferramenta	20
3.10.	Cálculo da potência necessária para a maquinagem.....	21
3.11.	Caracterização das ferramentas de corte	23
3.12.	Explicação dos ângulos das ferramentas corte.....	25
3.13.	Ordens Anteriores	28
3.14.	Análise dos Dados do Diâmetro Mínimo e Máximo dos Furos.....	30
3.15.	Análise dos Dados como um Conjunto	31
3.16.	Acompanhamento de Operações	32
3.17.	Análise das Alterações Implementadas	35
4.	Faceamento da Raiz	37
4.1.	Explicação da operação	37
4.2.	Preparação da Operação	38
4.3.	Máquina-Ferramenta	39
4.4.	Composição da Raiz	40
4.5.	Operação padrão	41
4.6.	Características de corte.....	42
4.7.	Teste de ressonância do conjunto	43
4.8.	Acompanhamentos	52
4.9.	Melhorias ao processo	53
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	55
5.1.	Conclusões	55
5.2.	Trabalhos futuros	56
	Referências	59



Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características as ligas utilizadas [18,19].....	14
Tabela 2 - Composição das ligas [18,19]	14
Tabela 3 - Variação da tolerância por diâmetro adaptado [20].	20
Tabela 4 - Histórico de ordens anteriores, valores em mm.	29



Índice de Figuras

Figura 1 - KC-390 Millennium [6].	2
Figura 2 - B-29 [5].	3
Figura 3 - F-16 [7].	3
Figura 4 - Especificações Técnicas [8].	4
Figura 5 - Método de Avaliação Tradicional vs GD&T [9].	7
Figura 6 - Tipos de avaliações de GD& [12].	8
Figura 7 - Quadro de controlo tipo adaptado [12].	9
Figura 8 - Tolerância de posição da linha.	9
Figura 9 - Fluxograma do fluxo produtivo.	12
Figura 10 - Conjunto da ferragem "Pé de Pato".	13
Figura 11 - Rebites HI-LITE [17].	13
Figura 12 - Ferragem de ligação EV EH.	15
Figura 13 - Gabarito de montagem do EV.	16
Figura 14 - Gabarito de montagem com o EV.	16
Figura 15 - Furos do Bore após encalque das rótulas.	17
Figura 16 - Máquina-Ferramenta de Lineboring.	20
Figura 17 - Valores de Kc para diferentes materiais [21].	22
Figura 18 - Pastilha de corte.	24
Figura 19 - Explicação da nomenclatura da norma ANSI [23].	24
Figura 20 - Configuração da pastilha utilizada.	25
Figura 21 - Esquema das faces e arestas de uma ferramenta de corte [24].	26
Figura 22 - Visualização da rugosidade superficial [25].	27
Figura 23 - Histograma da frequência dos valores de diâmetro mínimos	32
Figura 24 - Histograma da frequência dos valores de diâmetro máximos	32
Figura 25 - Calibres GoNogo.	34
Figura 26 - Cabeçote	39
Figura 27 - Raiz da empenagem.	40
Figura 28 - Movimentos da fresadora.	42
Figura 29 - Martelo DYNAPULSE.	44
Figura 30 - Condições do teste.	45
Figura 31 - Sensor do martelo.	45
Figura 32 - Sensor do produto.	45



Figura 33 - Frequência de ressonância da fresadora em X.....	46
Figura 34 - Frequência de ressonância da fresadora em Y.....	47
Figura 35 - Frequência de ressonância do EV.....	48
Figura 36 - Valores de fase em função da frequência.....	48
Figura 37 - Frequência de saída.....	49
Figura 38 - Forma do cabeçote.....	50
Figura 39 - Dados das pastilhas de corte.....	50
Figura 40 - Dados do material do EV.....	51
Figura 41 - Gráfico da Função de transferência com input da frequência.....	51
Figura 42 - Núcleos de estabilidade.....	52
Figura 43 - Pastilha de corte.....	53



Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CdP	Corpo de Prova
C.G.	Centro de Gravidade
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CNQ	Custo Não Qualidade
EH	Estabilizador Horizontal
EV	Estabilizador Vertical
FAI	<i>First Article Inspection</i>
GD&T	<i>Geometric Dimensioning & Tolerancing</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NOK	<i>Not OK</i>
PN	<i>Part Number</i>
RPM	Rotações por Minuto



Glossário

Apresentam-se os termos específicos referentes aos processos de maquinagem aeroespacial estudados neste trabalho projeto de mestrado.

Caixão - Montagem da asa fechada, ou seja, montagem dos dois painéis.

CdP - Corpo de Prova ou provete, placa de material com características similares ao produto para testar e calibrar as ferramentas a utilizar.

Data Collection - Campo de introdução de dados utilizado para controlar e registar dados durante o processo produtivo.

Gabarito – Estrutura ferramental que auxilia no processo de fabrico ou montagem de um produto

GoNogo – Calibre passa não-passa.

Ordem – Cópia do roteiro associado à produção de um PN, é um documento passível de rastrear e auditar.

Operação – divisão da ordem em ações produtivas mais pequenas, geralmente realizadas por um ou mais operadores.

PN – *Part Number*, pode ser uma peça primária ou um conjunto de peças montadas.

Poka-yoke – sistema anti erro.

Próximas montagens – montagem ou ação irá decorrer fora da ordem atual.

Roteiro – Algoritmo com as instruções de trabalho e documentos de apoio necessários para a fabricação ou montagem do PN.

Sub-montagens – Montagem do conjunto realizada previamente com melhores acessos e visibilidade, com o intuito de ser montada numa fase posterior da montagem.

Tryouts - Operação de teste ou verificação, sempre que é feita uma alteração relevante no processo é necessário realizar um *tryout* para validar a alteração.



1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados o enquadramento técnico deste trabalho de projeto, uma breve análise ao *State of the Art* do processo de fabrico de estruturas aeronáuticas e apresentada a empresa.

1.1. Enquadramento técnico

O presente trabalho de projeto, desenvolvido na Aernnova Aerospace, enquadra-se num projeto de melhoria dos processos de fabrico internos que visa o aumento da qualidade da entrega final do produto e consequentemente a diminuição do custo da não qualidade.

Este projeto de melhoria integra duas operações de maquinagem realizadas numa fase avançada da montagem do estabilizador vertical. O faceamento da raiz é uma operação que é realizada com o intuito de garantir os requisitos de planeza e espessura da zona de interface do estabilizador vertical com a fuselagem. O alargamento do furo do *bore* é a operação de maquinagem mais crítica de toda a montagem. O *bore* é o furo onde é instalada a rotula que faz a ligação entre o estabilizador vertical e horizontal.

1.2. Introdução à Empresa e ao Cliente

A Aernnova Aerospace, é uma empresa especializada no *design*, produção e manutenção de estruturas e componentes aeronáuticos [1].

Em Évora estão localizadas duas fábricas: Estruturas Metálicas e Estruturas Compósitas. Este projeto de mestrado vai abordar um dos produtos da fábrica de Metálicos - o estabilizador vertical do KC-390.

Nesta fábrica, atualmente, são fabricados os painéis para as asas dos aviões KC-390, E2-195 e E2-190, as longarinas para o programa E2 e, ainda, a asa para o programa *Preactor*. Todos estes programas têm a Embraer como cliente.



1.3. Introdução à Embraer

A Embraer é uma construtora de aeronaves brasileira, com produtos nos segmentos comercial, agrícola, executivo e militar. Foi oficializada como empresa em 1969 e o seu primeiro Presidente foi Ozires da Silva, o grande impulsionador da Embraer [2].

Em 2012 foi construída uma fábrica da Embraer em Évora. Este complexo industrial foi vendido à Aernnova em 2022, no entanto continua a produzir os mesmos componentes e montagens que produzia anteriormente.

1.4. Introdução ao KC-390 / C-390 Millennium

O KC-390 e o C-390 Millennium (Figura 2) são duas versões do avião do segmento militar lançado em 2009 [3,4]. A diferença na nomenclatura deve-se à retirada da capacidade de reabastecimento em voo na versão C-390. As escolhas das letras no nome dos aviões militares seguem regras específicas que ajudam no reconhecimento das características de cada aeronave. Por exemplo, “A” representa aviões de ataque, “B” bombardeiros (Figura 2), “C” aviões de carga, “F” representa aviões de combate aéreo do inglês *fighter* (Figura 3), “K” representa aviões com capacidade de reabastecimento aéreo (*tanker*).



Figura 1 - KC-390 Millennium [6].



Figura 2 - B-29 [5].



Figura 3 - F-16 [7].

Independentemente da versão, é um avião de transporte multimissão com a capacidade de operar em diversos teatros operacionais. Possui uma capacidade de aterragem e descolagem acima da média (Figura 4), o que permite a sua operação a partir de aeroportos e pistas de aviação em terra ou outro tipo de pavimento.

Esta aeronave possibilita a realização de missões de busca e salvamento, transporte de cargas ou tropas, lançamento de cargas ou paraquedistas, evacuação médica e ainda combate a incêndios ou missões humanitárias [8].

Portugal comprou 5 destes aviões em 2019, o primeiro foi entregue a 23 de outubro de 2023, visando a substituição dos C-130 já em fim de vida. Estes aviões serão operados pela Esquadra 506 da Força Aérea Portuguesa, sendo que a versão encomendada por Portugal é a KC.

Especificações Técnicas

Motor IAE V2500-E5	Potência 31 330 lbf (139 400 N)	Comprimento 35,20 m	Envergadura 35,05 m
Altura 11,84 m	Velocidade Máxima 870 km/h	Peso máximo na descolagem 81.000 Kg	Tecto de Serviço 10.972 m
Raio de acção 8070 km	Macas 74	Passageiros 80	Paraquedistas 66
Tripulação 4	Combustível 23.200 L	Ano de Início 2023	

Figura 4 - Especificações Técnicas [8].

1.5. Introdução ao problema em estudo

O KC é um programa recente que está em constante desenvolvimento e evolução. Na montagem do estabilizador vertical existem muitas sub-montagens¹ e operações de elevada criticidade e complexidade, como por exemplo a montagem das *hinges* do leme de cauda. Este tipo de operações possui um controlo de GD&T muito apertado, uma vez que desvios fora da tolerância definida afetam a performance de voo e manobrabilidade da aeronave.

Outras operações como o “faceamento da raiz” e o “alargamento do furo do *bore*” têm uma contribuição direta para a posição e orientação do estabilizador vertical e do estabilizador horizontal na aeronave.

Estas operações constituem duas das operações mais complexas e críticas de toda a montagem do caixão. A impossibilidade de retrabalho, caso alguma destas operações não atinja o resultado esperado, é uma das principais preocupações durante a realização das mesmas.

Com a evolução do processo produtivo, foi necessário alterar alguns aspetos da forma como é realizada a operação. Isto está relacionado com o *feedback* recebido durante a execução das operações e com o acompanhamento realizado pela equipa da

¹ Submontagens ou Subconjuntos são montagens realizadas de forma total ou parcial antes da sua instalação no produto principal.



Engenharia de Manufatura. Por essa razão, alguns dos dados apresentados e analisados apenas dizem respeito a algumas das ordens produtivas que foram acompanhadas, por consequência de terem sido adicionadas ou retiradas certas operações de medição e verificação intermédias.

1.6. Estrutura do projeto de mestrado

Este trabalho de projeto encontra-se dividido em cinco capítulos. Cada um desses capítulos é dividido em subcapítulos de acordo com a natureza do seu conteúdo e similaridade aos assuntos tratados anteriormente.

Neste capítulo inicial, é apresentado o problema em estudo, o objetivo principal do projeto de mestrado, é apresentada a empresa onde decorre o projeto e o cliente final do produto.

No segundo capítulo é apresentada a avaliação por GD&T, explicando a sua origem e importância histórica bem como a sua importância na avaliação da qualidade do produto final. É apresentado o sistema de medição *true position* e a sua relação com a medição tridimensional realizada no produto final.

O terceiro capítulo é dedicado à operação de alargamento do furo do bore, neste capítulo é explicado o processo utilizado na operação, é também apresentado o fluxo produtivo da montagem do estabilizador vertical. É ainda analisado estatisticamente o resultado das melhorias implementadas durante a realização deste trabalho.

No quarto capítulo é apresentada a operação do faceamento da raiz e as suas particularidades. É ainda apresentado o resultado de testes de ressonância realizados durante este trabalho. Tal como no capítulo anterior são apresentados os resultados das melhorias implementadas durante a realização deste trabalho.

O último capítulo deste trabalho é a conclusão, onde são apresentados os resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.



2. Avaliação GD&T

Neste capítulo será introduzido a avaliação dimensional e de forma, de acordo com os padrões definidos pelo GD&T. Inclui também uma contextualização histórica e uma explicação do conceito de *true-position*.

2.1. História

Geometric Dimensioning & Tolerancing, vulgarmente chamado apenas GD&T, é um sistema de definição e comunicação de tolerâncias e forma geométrica de uma peça. Este sistema foi desenvolvido por Stanley Parker no seu trabalho na *Royal Torpedo Factory* na Escócia, durante a 2.^a guerra mundial [9].

Parker reparou que alguns dos torpedos que eram rejeitados por não atenderem os requisitos dimensionais na verdade podiam ser utilizados. Isto devia-se à forma como a sua avaliação dimensional era realizada (Figura 5).

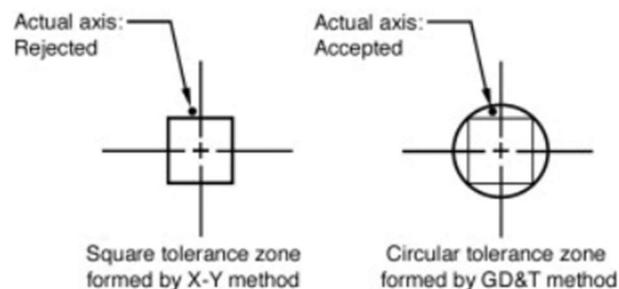


Figura 5 - Método de Avaliação Tradicional vs GD&T [9].

Esta foi a premissa inicial do GD&T, avaliar o objeto tendo em conta a sua própria forma ou a forma da próxima montagem onde vai ser aplicado.

Também nesta altura deu-se um grande desenvolvimento nas técnicas de medição e quantificação dimensional. Um dos sistemas mais utilizados foi o calibre “passa não-passa” [10]. Este tipo de dispositivo permitia a qualquer operador verificar se determinado detalhe do produto estava ou não conforme, sem ter que realmente medir o produto. Isto é bastante importante porque elimina uma fonte de incerteza e simplifica o processo. É de lembrar que, nesta altura, grande parte da força operária era iletrada ou com um nível de escolaridade bastante baixo.



2.2. Sistema *True-Position*

Todo o sistema de GD&T está ligado e complementa o conceito de “*true-position*”, também desenvolvido por Stanley Parker. Este sistema consiste em avaliar a condição dimensional da peça em relação a ela própria e não em relação a um referencial estático [11].

Para avaliar uma peça com recurso a este sistema é necessário realizar o seu *constraint* em relação aos três eixos de rotação e três eixos de translação. Para isto é necessário fixar a peça em três *Datums*² distintos. A escolha destes pontos, planos ou superfícies é livre e depende da forma da peça a ser avaliada.

Os *Datums* A, B e C restringem todos os movimentos da peça e possibilitam a avaliação geométrica da peça em relação a estes *Datums*. Depois de medidos todos os pontos de interesse da peça, é gerado um sólido virtual que é posicionado por *best-fit* nos pontos coincidentes dos *Datums*. Desta forma, temos uma avaliação da peça física em função do seu CAD de projeto sem desvios de forma ou tolerância.

O sistema de GD&T permite a medição de desvios de forma, perfil, orientação, localização e batimento (Figura 6).

Tolerances	Characteristics	Symbol
Form	Straightness	—
	Flatness	▭
	Roundness	○
	Cylindricity	⌀
	Profile any line	∩
	Profile any surface	∪
Orientation	Parallelism	//
	Perpendicularity	⊥
	Angularity	∠
	Profile any line	∩
	Profile any surface	∪
Location	Position	⊕
	Concentricity (for centre points)	⊙
	Coaxiality (for axes)	⊙
	Symmetry	≡
	Profile any line	∩
	Profile any surface	∪
Run-out	Circular run-out	↗
	Total run-out	↗↘

Figura 6 - Tipos de avaliações de GD& [12].

² Plano, ponto ou linha usado como referência.



Um quadro de controlo de GD&T, como o da figura 7 fornece sempre pelo menos três informações distintas: o tipo de tolerância a avaliar, o intervalo de valores permitidos e os *Datums* para a medição. Na figura 7 está representado um quadro de controlo que indica a tolerância de posição da linha em relação aos *Datums* A e B, indica a localização dos *Datums* na peça e indica também o valor da tolerância a considerar para a avaliação. É de notar que um quadro de controlo pode ser mais complexo e fornecer mais informações relevantes para a avaliação [13].

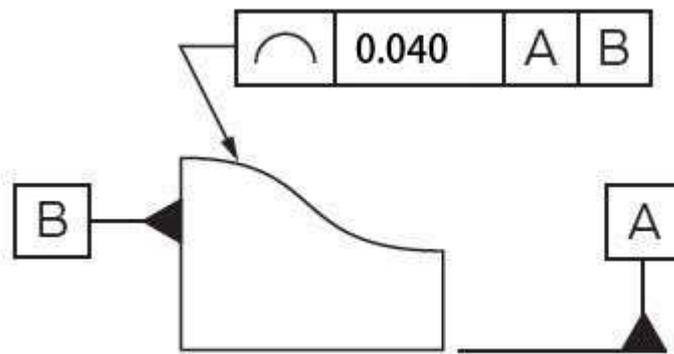


Figura 7 - Quadro de controlo tipo adaptado [12].

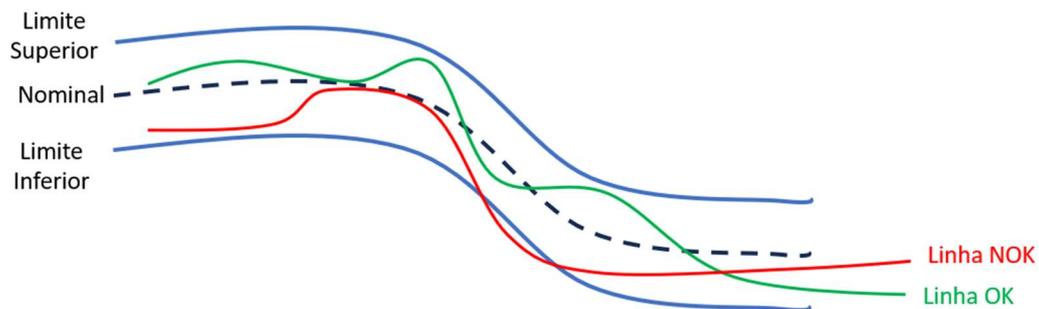


Figura 8 - Tolerância de posição da linha.



O quadro de controlo em conjunto com a indicação dos *Datums* na figura possibilita a medição e avaliação da posição da linha [14]. A tolerância de localização da linha é de 0,040 mm em relação a “A” e “B”, ou seja, qualquer ponto da linha pode estar 0,020 mm acima ou abaixo do seu valor nominal e a característica da peça continuar dentro da tolerância de projeto (Figura 8).



3. Furo do *Bore*

Este capítulo é dedicado ao estudo da operação de alargamento do furo do *bore*, é explicada a razão da necessidade da operação e é também explicado o fluxo produtivo dos produtos na empresa [16]. É ainda feita uma análise estatística ao histórico de valores de diâmetro dos furos das últimas ordens produtivas e as melhorias implementadas durante este trabalho.

3.1. Explicação da Operação

O *boring* é uma operação de maquinagem que consiste em alargar um furo pré-existente até ao diâmetro final, para o caso um furo de 90mm com tolerância H7, bem como garantir a tolerância de concentricidade entre os dois furos esquerdo e direito.

Este tipo de operação é muito utilizado quando é necessário garantir certos requisitos de desenho mais críticos ou com tolerâncias mais apertadas, como o diâmetro final ou o acabamento da superfície. Ao dividir a operação de fabricação do furo em *drilling* e *boring*, é possível aumentar a eficiência do processo de fabricação, bem como aumentar a qualidade final do produto.

Geralmente esta operação é realizada num torno mecânico com uma ferramenta de corte chamada *boring bar*. Também pode ser executada numa fresadora com uma *boring head* e uma *boring bar*. A principal vantagem desta operação é que com uma única ferramenta de *boring* é possível alargar um furo para qualquer diâmetro, diminuindo assim a quantidade de ferramentas necessárias e o custo associado ao processo de fabrico da peça.

Existem ainda algumas variações desta operação como *lineboring* ou *backboring*. Estas variações resultam da utilização de máquinas especializadas e do tipo de acesso disponível no produto. O processo utilizado na montagem do estabilizador vertical em Évora é considerado *lineboring*, embora possua algumas características diferenciadoras.



A operação de furação pode ser realizada numa etapa inicial da maquinação e por ferramentas com uma alta taxa de remoção de material. Muitas vezes, este pré-furo é utilizado como fixação durante a própria maquinação ou até em próximas montagens³.

A etapa de *boring* é depois realizada por uma ferramenta com uma menor taxa de remoção de material, mas com uma tolerância muito mais apertada, o que representa um furo final com melhor acabamento superficial e com tolerâncias de diâmetro muito mais próximas do valor nominal.

3.2. Fluxo produtivo Típico

Antes do furo do *bore* ser realizado é necessário percorrer todo um processo produtivo que termina numa das últimas operações da montagem do caixão⁴ do EV (Figura 9)

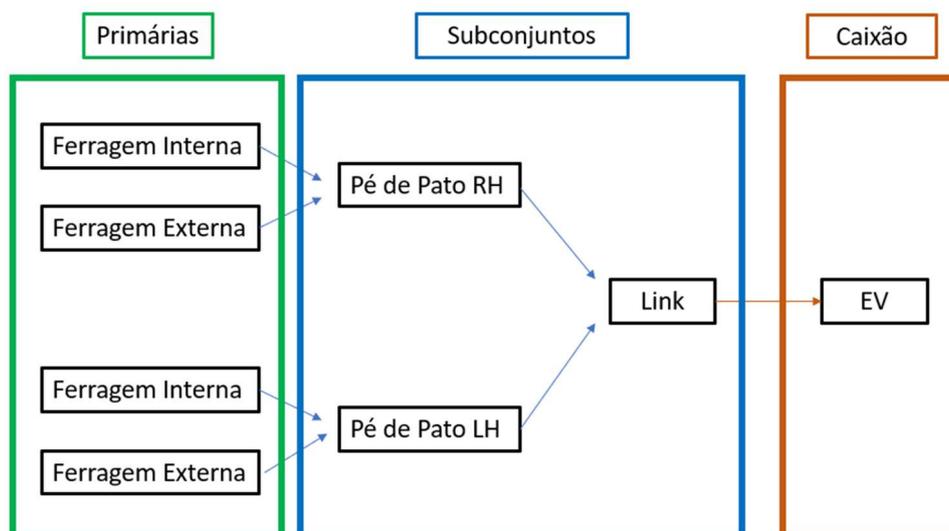


Figura 9 - Fluxograma do fluxo produtivo.

³ Montagens seguintes à ordem produtiva atual.

⁴ Montagem da Empenagem com os dois painéis colocados.

3.3. Pé de Pato

O Pé de Pato⁵ foi o nome dado ao primeiro subconjunto do fluxo produtivo do estabilizador vertical e obteve este nome por possuir uma forma semelhante aos pés de pato (Figura 10).

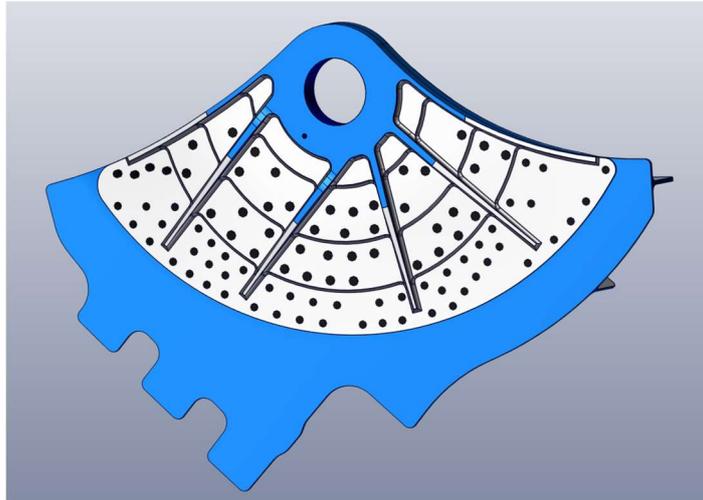


Figura 10 - Conjunto da ferragem "Pé de Pato".

Esta ferragem é composta por duas outras ferragens unidas entre si através de fixação mecânica com rebites do tipo *HI-LITE* (Figura 11). Este tipo de fixação de componentes é utilizado de uma forma bastante ampla entre todos os programas e montagens realizadas na fábrica. O ato de cravar deste tipo de rebites é composto por duas ações, a instalação do pino com interferência num furo já existente e o aperto de um colar que atua como contra cabeça. O nível da interferência varia consoante a classe de furação utilizada e é definido no projeto do avião.



Figura 11 - Rebites HI-LITE [17].

⁵ Nome comum dado à ferragem do *Bore*.



As duas ferragens utilizadas são produzidas internamente na parte de fabricação. Estas ferragens são fabricadas através de maquinaria CNC.

A parte representada a branco é a ferragem externa que é rebitada à ferragem interna representada a azul. O material das duas ferragens é diferente, embora sejam as duas ligas de alumínio da série 7000, a composição e tratamento é diferente.

As ferragens internas têm dimensões superiores, possuem uma espessura maior e são fabricadas em alumínio da liga 7050-T7451, já as ferragens externas são bastante mais finas, possuem uma geometria mais regular e são fabricadas na liga 7475-T7351.

Estas duas ligas pertencem à série 7000. As características gerais das duas ligas são similares, mas possuem algumas diferenças, na tabela seguinte estão alguns dos dados em que as características diferem ou que possuem uma maior relevância para esta aplicação das ferragens [18,19].

Tabela 1 - Características as ligas utilizadas [18,19].

	7050-T7451	7475-T7351
Densidade	2.83 g/cm ³	2.81 g/cm ³
Dureza <i>Brinell</i>	140	135
Módulo de Elasticidade	71.7 GPa	71.7 GPa
Tensão máxima na zona elástica	469 MPa	421 MPa
Coefficiente de dilatação térmica (20 °C a 100 °C)	23.0 µm/(m °C)	23.2 µm/(m °C)

A composição das duas ligas também é bastante similar embora a 7050 tenha uma maior percentagem de Cobre e Zinco.

Tabela 2 - Composição das ligas [18,19]

Elementos	7050-T7451	7475-T7351
Al	87.3 – 90.3 %	88.5 – 91.5 %
Cr	0.04 %	0.18 – 0.25 %
Cu	2.0 – 2.6 %	1.2 – 1.9 %
Mg	1.9 – 2.6 %	1.9 – 2.6 %
Zn	5.7 – 6.7 %	5.2 – 6.2 %



3.4. Link

A ferragem de Ligação EV x EH (Figura 12), é composta por seis subconjuntos, os dois subconjuntos do pé de pato, o esquerdo e o direito e, ainda, 4 subconjuntos de *ribs*.

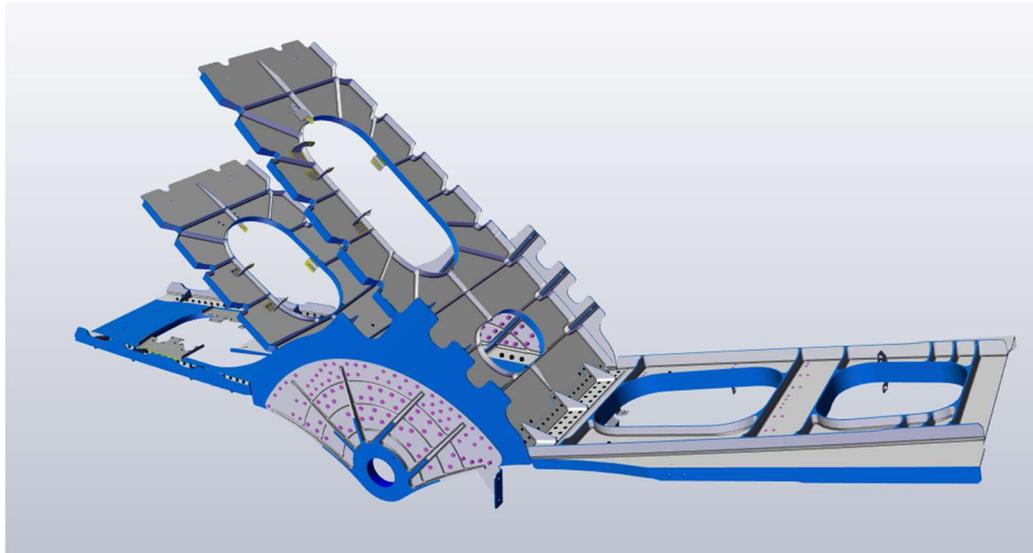


Figura 12 - Ferragem de ligação EV EH.

Este subconjunto tem como função, como o seu próprio nome indica, ligar o estabilizador vertical e o estabilizador horizontal. É posicionado na ponta da empenagem e é fixado ao bordo de fuga e ao bordo de ataque.

A posição das peças instaladas é controlada pelo gabarito de montagem, tal como já acontecia no Pé de Pato. No entanto, como este conjunto é mais complexo e possui uma maior criticidade dimensional, é realizada uma medição por *Laser Tracker* para aferir que o conjunto está com as dimensões e forma pretendidas. Também o gabarito é sujeito a medições periódicas para garantir a sua condição.

Este é o último passo da montagem relacionado com o *bore* fora da montagem do caixão.

3.5. Caixão

A montagem do caixão⁶ começa com o posicionamento dos bordos no gabarito. O bordo de ataque é posicionado na parte inferior do gabarito e o bordo de fuga fica na

⁶ Montagem da asa ou empenagem com os revestimentos exteriores já fixados.



parte superior. Isto deve-se à geometria da empenagem e ao facto de existirem componentes salientes no bordo de fuga, nomeadamente as *hinges*.

A posição dos bordos é garantida pelo próprio gabarito (Figuras 13 e 14). Os bordos são posicionados com o auxílio de pinos ferramentais que travam o movimento da peça em relação ao gabarito, existem também batentes chamados *index's* que identificam a posição nominal do componente. Após o posicionamento destes subconjuntos, dá-se o início do posicionamento das *ribs* e a instalação de alguma “suportagem”⁷ que é fixa nas *ribs*. É apenas após todas estas etapas que são subidos os painéis para o gabarito, resultando na montagem de asa fechada, de onde vem o nome de caixão. Nas imagens seguintes está representado o gabarito de montagem com e sem o produto.

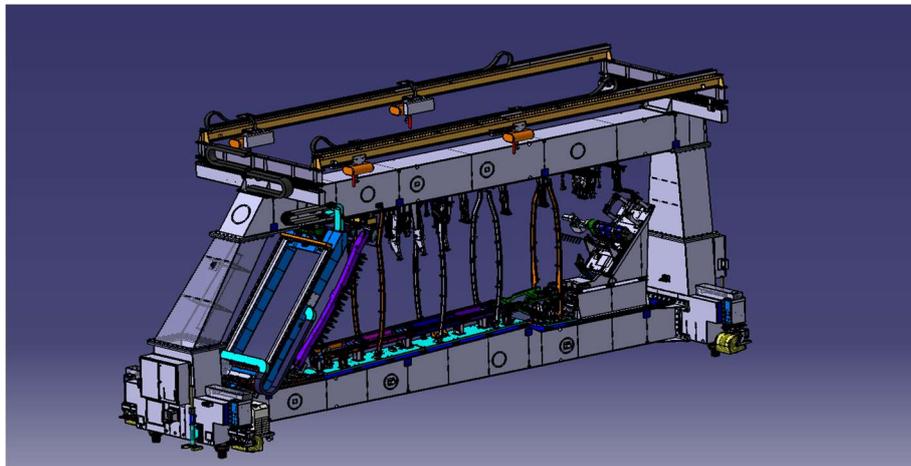


Figura 13 - Gabarito de montagem do EV.

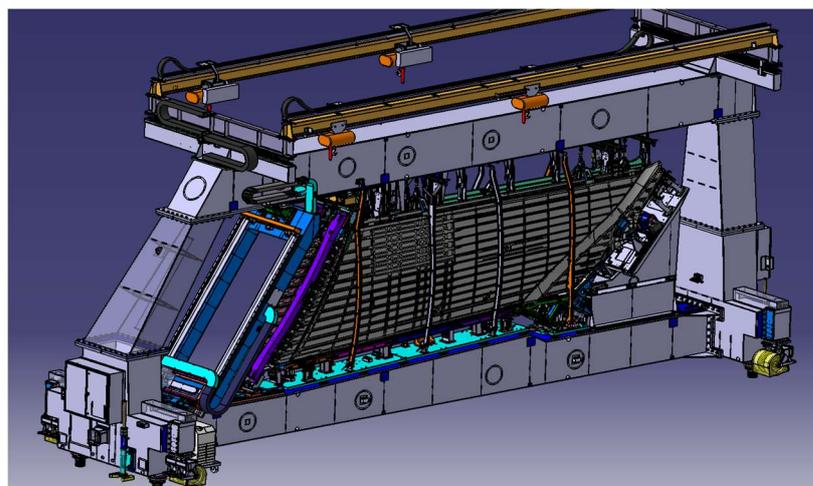


Figura 14 - Gabarito de montagem com o EV.

⁷ Instalação de componentes de suporte que irão ser utilizados em próximas montagens.



3.6. Alargamento do Furo do *Bore*

O alargamento do furo do *bore* é uma das últimas operações a ser realizada neste gabarito, devido à criticidade da mesma e também por razões de segurança não é permitido realizar nenhuma operação em paralelo.

De um ponto de vista simplista, o furo do *bore* pode ser caracterizado por um furo passante a toda a estrutura do estabilizador vertical no sentido transversal.

O diâmetro e a posição do furo final são requisitos de desenho que influenciam o controlo e estabilidade da aeronave em voo. O requisito de posição dos furos é garantido pelo gabarito. É o gabarito que posiciona todo o estabilizador vertical e posteriormente posiciona a máquina-ferramenta responsável pelo alargamento do furo. Já o requisito de forma é garantido através da operação de alargamento do furo.

Após o alargamento do furo e a validação da sua medida máxima e mínima de diâmetro, é realizada uma operação de encalque por processo criogénico (Figura 15), devido ao elevado grau de interferência entre as rótulas e as ferragens. As rótulas são depois travadas com recurso a duas porcas especiais e ainda duas travas que garantem a impossibilidade de desaperto gradual das porcas. Na figura seguinte é possível observar as rótulas já encaçadas e travadas com as respetivas porcas e travas.

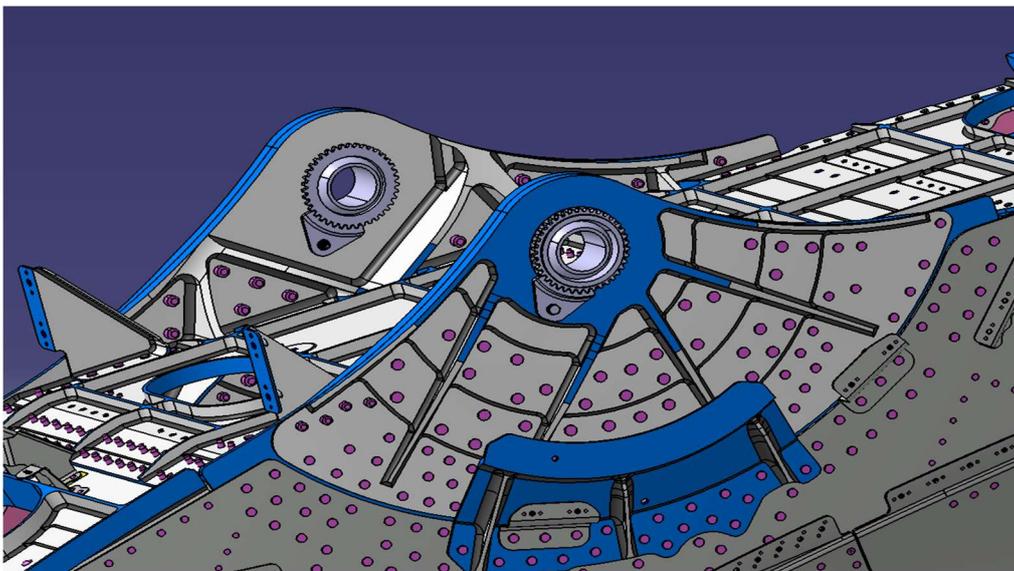


Figura 15 - Furos do Bore após encalque das rótulas.



3.7. Operação de *Boring*

A operação encontra-se separada por etapas para garantir um melhor controlo do resultado final. A operação é realizada na totalidade em CdP antes de ser realizada no produto. Nesta operação são validadas todas as etapas de alargamento do furo.

Etapas de Alargamento: Ferragens laterais montadas no *link* já possuem um pré-furo de 86 mm, que é utilizado no posicionamento das ferragens para a sua montagem no subconjunto do Pé de Pato.

1.^a operação de *Boring*: esta operação consiste num alargamento do furo para um diâmetro de 89 mm. Esta é a passagem com uma profundidade de corte maior e, por isso, maior carga sobre a máquina. Após esta passagem com uma profundidade de corte de 1,5 mm, é garantida a concentricidade dos furos, dentro da tolerância garantida pelo veio da máquina.

2.^a operação de *Boring*: nesta passagem, os furos são alargados para um diâmetro pré-final de 89,800 mm. Esta passagem com uma profundidade de corte de 0,400 mm, representa uma carga muito menor na máquina e na própria empenagem, reduzindo assim a vibração do conjunto e diminuindo o impacto das deformações resultantes das forças de corte.

3.^a operação de *Boring*: nesta 3.^a e última passagem, o furo é alargado para o seu diâmetro final de 90,000 mm. Nesta passagem, a profundidade do corte é de apenas 0,100 mm. Estes furos têm uma tolerância definida em projeto de H7, o que para este diâmetro corresponde a uma variação máxima de 0,035 mm acima da medida nominal, ou seja, os diâmetros finais do furo têm de estar compreendidos entre 90,000 e 90,035 mm.

Chanfro 1 e 2: são ainda realizados dois chanfros no furo, um do lado interno e outro do lado externo. Estes chanfros têm como função remover as arestas vivas resultantes das etapas anteriores, facilitar o processo de encaixe da rótula que vai ser instalada no furo e eliminar geometrias de concentração de tensões.

Como estes chanfros não são críticos para a qualidade do produto final, a análise da sua dimensão não foi contemplada neste projeto de mestrado.



3.8. Validação do Furo

Como já foi referido anteriormente, é necessário garantir uma tolerância de variação do diâmetro compreendida pelos valores máximos de H7 para o diâmetro de 90 mm e garantir a concentricidade entre furos de 0,3 mm.

A tolerância H7 pertence à norma ISO 286-2 referente a tolerâncias de ajuste para furos e fixos. Esta norma define o tipo de ajuste entre um par eixo-furo com base na sua interferência de montagem. Podemos dividir os ajustes em três tipos distintos, ajuste forçado, aderente/deslizante e rotativo. Estes três tipos correspondem aos extremos máximo e mínimo de interferência e ao ponto intermédio. Entre eles existe toda uma gama de ajustes que pode ser escolhida de acordo com a utilização específica do projeto [20].

O ajuste forçado possui um grande nível de interferência, o que faz com que geralmente seja montado por meio de prensagem e, por vezes, dilatação térmica do furo e ou o arrefecimento da peça macho com recurso a equipamentos de arrefecimento (refrigerador) ou a nitrogénio líquido dependendo da classe de ajuste. Este tipo de ajuste é utilizado para montagens permanentes e não possibilita a rotação do eixo no furo.

Os ajustes aderente e deslizante são dois tipos de ajuste que possibilitam a montagem manual. O ajuste aderente possui uma interferência mínima que permite a montagem com recurso a suaves pancadas com um martelo, já o ajuste deslizante permite a montagem sem interferência, mas ainda sem oscilações e rotação livre do eixo no furo.

O ajuste rotativo permite a montagem e a rotação livre do eixo no furo. Isto é muito utilizado em conjuntos que são montados e desmontados durante a sua utilização típica.

Esta norma identifica os limites de tolerância de um furo ou veio com recurso a letras e números, como por exemplo H7s6, isto representa um furo com tolerância H7 e um eixo com tolerância s6. Os furos são sempre representados por letras maiúsculas e os eixos por minúsculas.

É de salientar que este tipo de tolerância funciona por intervalos de diâmetro, ou seja, o intervalo de tolerância não é uma proporção direta em relação ao diâmetro. A tabela seguinte apresenta a variação dos limites de tolerância de um furo H7.

Tabela 3 - Variação da tolerância por diâmetro adaptado [20].

Diâmetro do furo (mm)	Limite inferior da tolerância (μm)	Limite superior da tolerância (μm)
6-10	0	+ 15
10-18	0	+ 18
18-30	0	+ 21
30-50	0	+ 25
50-80	0	+ 30
80-120	0	+ 35
120-180	0	+ 40

As condições de medição, fabrico e montagem têm influência direta no resultado final da operação, todo o hangar é climatizado e a temperatura é mantida constante a cerca de 20 °C.

De acordo com os valores de dilatação térmica já apresentados anteriormente, o coeficiente de dilatação térmica para a liga de alumínio 7050 era de $23.0 \mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$, ou seja, o furo com diâmetro nominal de 90 mm irá sofrer uma dilatação de $2,07 \mu\text{m}$ por grau, o que equivale a quase 6 % do intervalo da tolerância definida para este diâmetro. Por essa razão, é efetuada uma medição de temperatura no momento da medição geométrica.

3.9. Máquina-Ferramenta

Para realizar esta operação foi desenvolvida uma máquina-ferramenta dedicada, como mostra a figura 16.

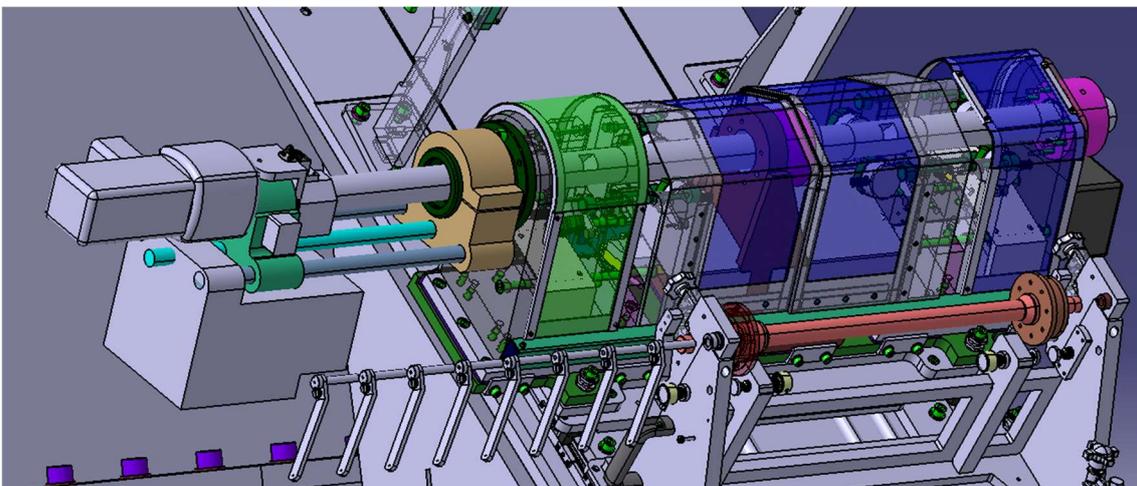


Figura 16 - Máquina-Ferramenta de Lineboring.



Como já foi referido anteriormente, a posição do furo em relação à empenagem é garantida pela fixação da máquina ao próprio gabarito.

Para facilitar a análise, máquina vai ser dividida em dois componentes principais, o grupo motor e o veio de *boring* responsável pela fixação das ferramentas de corte.

O grupo motor é composto por dois motores independentes, garantindo assim que a velocidade de rotação e o avanço sejam controlados de forma independente. O veio responsável pelo *boring* está acoplado diretamente ao motor, não passando assim por nenhum tipo de caixa redutora. O motor responsável pelo avanço do conjunto está acoplado a uma caixa redutora, o que facilita o seu controlo e torna o sistema mais eficiente. O avanço do sistema é feito com a rotação de um parafuso com rosca-sem-fim. Este sistema move toda a máquina em relação ao seu ponto de fixação.

3.10. Cálculo da potência necessária para a maquinagem

Para o cálculo da potência necessária para o Alargamento do Furo do *Bore* optou-se por calcular apenas a potência necessária para a primeira passagem, visto esta ser a pior condição em termos de profundidade de corte [21].

A potência de corte para este tipo de operação pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$P_C = \frac{V_c \times a_p \times f_n \times K_c}{60 \times 10^3} \times \left(1 - \frac{a_p}{D_c}\right), \quad (1)$$

P_C Potência de corte efetiva, em *Watts*;

V_c Velocidade periférica de corte, em metros por minuto;

a_p Profundidade de Corte, em milímetros;

f_n Avanço da ferramenta de corte, em milímetros por rotação;

K_c Constante de corte específica, em N/mm^2 ;

D_c Diâmetro da ferramenta de corte, em milímetros.

Para calcular a potência de corte é necessário calcular cada uma das variáveis mencionadas acima. Foi considerada uma velocidade de rotação de 420 RPM e um avanço de 30,5 milímetros por minuto, para o cálculo da potência.

$$V_c = \frac{\pi \times D_c \times n}{1000}, \quad (2a)$$

D_c Diâmetro da ferramenta de corte, em milímetros;

n Rotação da ferramenta em rotações, por minuto.

$$V_c = \frac{\pi \times 89 \times 420}{1000} \Leftrightarrow V_c = 117,43 \text{ m/min} \quad (2b)$$

$$f_n = \frac{\text{Avanço}}{n}, \quad (3a)$$

$$f_n = \frac{30,5}{420} \Leftrightarrow f_n = 0,073 \text{ mm/rot} \quad (3b)$$

O cálculo do K_c não é direto, uma vez que depende da forma da apara formada, da profundidade de corte, da forma da pastilha de corte e do material. Para calcular o K_c é necessário conhecer outros fatores, como as forças atuantes no processo de remoção da apara e os esforços resultantes dessas forças.

Na figura 17 estão representados os valores de K_c para vários materiais de acordo com a espessura da apara.

Material group	Strength [N/mm ²]	Material		Specific cutting force k_c [N/mm ²] depending on cutting thickness h [mm]											
		Material no.	Material designation according to DIN	$k_{c1.1}$	m	0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5
12.0 Spring steel	up to 1500	1.5023	38Si7	1.800	0.27	4.042	3.847	3.352	2.952	2.617	2.305	2.170	1.912	1.585	1.405
		1.8159	50GV4	2.220	0.26	4.925	4.697	4.113	3.639	3.241	2.868	2.706	2.395	2.000	1.781
13.0 Stainless steel, sulphured	up to 700	1.4104	X14CrMnSi17	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
		1.4301	X5CrNi18 10	2.350	0.21	4.408	4.243	3.811	3.453	3.144	2.849	2.718	2.463	2.129	1.939
13.1 Stainless steel, austenitic	up to 700	1.4401	X5CrNiMo17 122	2.600	0.19	4.594	4.437	4.027	3.683	3.383	3.094	2.966	2.713	2.378	2.185
		1.4034	X46Cr13	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
13.2 Stainless steel, austenitic	up to 850	1.4028	X30Cr13	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
		2.4631	NiCr20TiAl	2.088	0.29	4.978	4.721	4.071	3.553	3.121	2.724	2.553	2.228	1.822	1.601
13.3 Stainless steel, martensitic / ferritic	up to 1100	1.4028	X30Cr13	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
15.0 Cast iron (GG) (lamellar graphite)	up to 180 HB	0.6020	GG 20	1.020	0.25	2.157	2.061	1.814	1.613	1.442	1.283	1.213	1.079	907	811
15.1 Cast iron (GG) (lamellar graphite)	over 180 HB	0.6040	GG 40	1.470	0.26	3.203	3.055	2.675	2.367	2.108	1.865	1.760	1.558	1.301	1.158
15.2 Cast iron (GGG, GT) (spheroidal graphite, malleable cast iron)	as of 180 HB	0.7040	GGG-40	1.005	0.25	2.125	2.031	1.787	1.589	1.421	1.264	1.195	1.063	894	799
		0.8040	GTW-40	2.060	0.19	3.640	3.516	3.191	2.918	2.681	2.452	2.350	2.149	1.884	1.731
15.3 Cast iron (GGG, GT) (spheroidal graphite, malleable cast iron)	as of 260 HB	0.7080	GGG-80	1.132	0.44	4.230	3.904	3.118	2.535	2.083	1.694	1.536	1.249	921	756
		0.8165	GTS-65	1.180	0.24	2.422	2.318	2.051	1.832	1.646	1.470	1.394	1.245	1.054	947
16.1 Ti, Ti alloys	850–1200	3.7164	TiAl6V4	1.370	0.21	2.570	2.378	2.222	2.013	1.764	1.661	1.585	1.436	1.241	1.130
17.0 Al, Al alloys	up to 530	3.3535	AlMg3	780	0.23	1.554	1.490	1.325	1.189	1.073	963	915	821	700	632
		3.1325	AlCuMg1	780	0.23	1.554	1.490	1.325	1.189	1.073	963	915	821	700	632
		3.2381	G-AlSi10Mg	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745	672
17.1 Cast alumin. alloys Si<10%	up to 600	3.2581	G-AlSi12	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745	672
17.2 Cast alumin. alloys Si>10%	up to 600	3.2581	G-AlSi12	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745	672
19.1 Brass, short-chipping	up to 600	2.0380	CuZn39Pb2	780	0.18	1.337	1.294	1.181	1.085	1.001	920	884	812	717	661
19.3 Bronze, short-chipping	up to 600	2.1090	CuSn7ZnPb	640	0.25	1.353	1.293	1.138	1.012	905	805	761	677	569	509

Figura 17 - Valores de K_c para diferentes materiais [21].



Considerando um K_c de 1490 N/mm^2 podemos prosseguir com o cálculo da potência necessária para a primeira passagem.

$$P_c = \frac{V_c \times a_p \times f_n \times K_c}{60 \times 10^3} \times \left(1 - \frac{a_p}{D_c}\right) \quad (4a)$$

$$P_c = \frac{117,43 \times 1,5 \times 0,073 \times 1490}{60 \times 10^3} \times \left(1 - \frac{a_p}{D_c}\right) \quad (4b)$$

$$P_c = 0,319 \times 0,9832 \quad (4c)$$

$$P_c = 314 \text{ W} \quad (4d)$$

Visto que a potência de corte necessária para realizar esta operação é bastante baixa pode-se assumir que os problemas gerados durante a operação não estão relacionados com o grupo motor.

3.11. Caracterização das ferramentas de corte

Os insertos ou pastilhas de corte são parte essencial em todos os processos de maquinagem ou corte de material. São amplamente utilizados devido à sua facilidade de permuta e também pela flexibilidade que oferecem na realização das operações.

A vantagem principal das pastilhas de corte é o facto de serem um componente de desgaste facilmente substituível.

Para o Alargamento do Furo do *Bore* são utilizadas 4 ferramentas de corte diferentes, no entanto é apenas utilizado um tipo de pastilhas de corte. A diferença entre as passagens de alargamento do furo e os chanfros é o ângulo das pastilhas na ferramenta de corte. As pastilhas utilizadas são SPGT3252LF (Figura 18).



Figura 18 - Pastilha de corte.

O nome das pastilhas é normalizado e fornece logo algumas informações sobre as mesmas, como a forma, o ângulo de alívio e as dimensões, na figura 19 está resumizado o significado das diferentes letras e números na identificação do inserto [22].

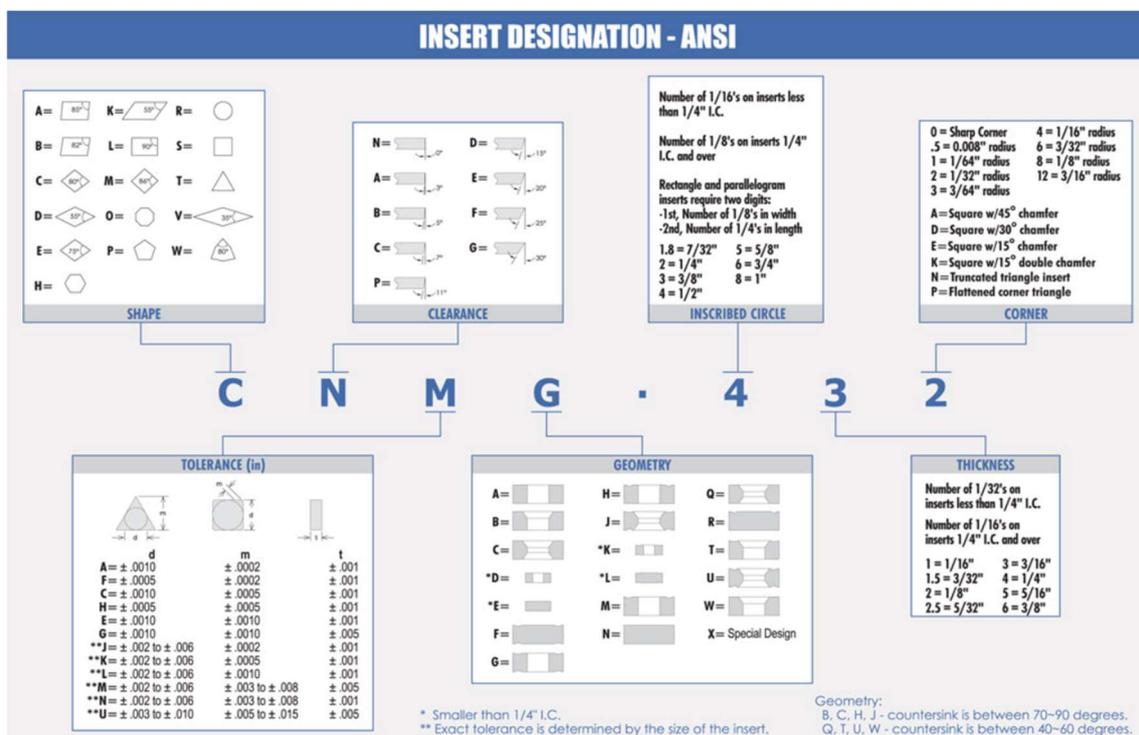


Figura 19 - Explicação da nomenclatura da norma ANSI [23].

Neste caso, a pastilha de corte utilizada possui a seguinte configuração:

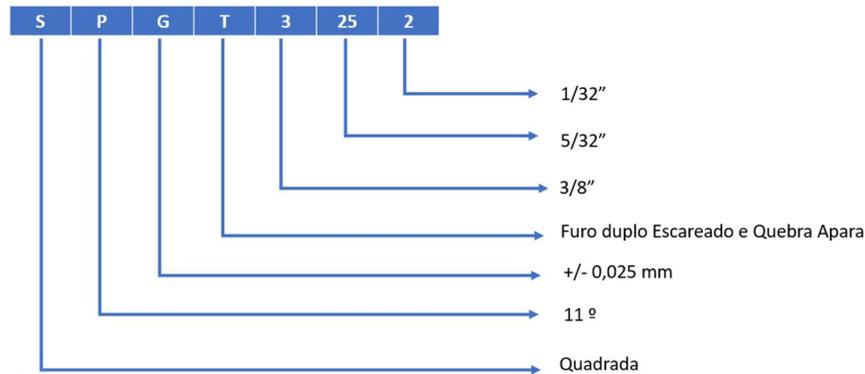


Figura 20 - Configuração da pastilha utilizada.

Estas pastilhas foram desenvolvidas com o intuito de poderem realizar vários tipos de operações, sendo indicadas para a operação de mandrilamento.

Estas pastilhas não possuem sentido de montagem, ou seja, tanto podem cortar no sentido de aproximação do mandril do torno, como no sentido oposto.

As características da pastilha de corte que mais influenciam a sua capacidade de corte no geral são:

- Ângulo de Ataque positivo de 5°;
- Ângulo de Alívio de 11°;
- Raio da ponta de 1/32".

3.12. Explicação dos ângulos das ferramentas corte

A geometria da ferramenta de corte varia consoante a operação a realizar, o tipo de material, o produto, o acabamento pretendido e ainda a potência disponível.

Tradicionalmente para realizar uma operação num torno mecânico era necessário fabricar uma ferramenta de corte, desgastado um ferro de corte, geralmente em *High Speed Steel* (HSS), até à geometria pretendida. Com a evolução natural da indústria foi necessário criar uma solução mais eficiente. A solução encontrada passou pela criação de pastilhas de corte ou insertos. Estes insertos são montados diretamente em suportes dedicados consoante a sua forma. Desta forma, é mais rápida a substituição



do material de desgaste e possibilita maior repetibilidade e consistência entre as ferramentas de corte disponíveis.

De uma forma generalizada, todas as ferramentas de corte, sejam elas insertos ou barras de HSS desbastadas para a forma desejada, existem elementos comuns na sua geometria [24].

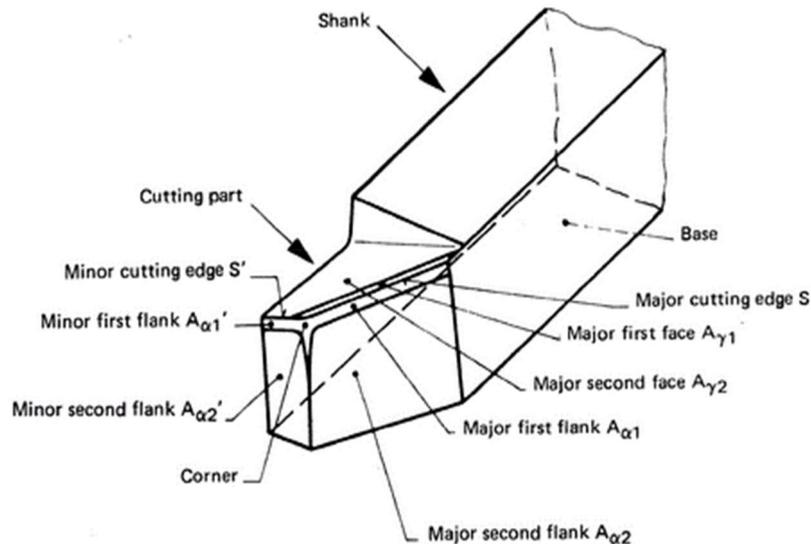


Figura 21 - Esquema das faces e arestas de uma ferramenta de corte [24].

O ângulo de Ataque é o ângulo formado pelo topo da ferramenta de corte com o plano vertical que passa pela aresta de corte. Este ângulo pode ser positivo, negativo ou neutro. Este ângulo afeta diretamente a qualidade final da superfície. Existem ângulos pré-definidos para os diferentes materiais a maquinar e para a composição da ferramenta de corte

O ângulo de alívio é o ângulo definido entre a lateral da ferramenta de corte e o plano perpendicular ao eixo de rotação da peça. Este ângulo tem de ser sempre superior a 0° . Este ângulo garante que a aresta de corte é a primeira parte da ferramenta a entrar em contacto com a peça, permitindo assim a remoção de aparas.

Por vezes, existe uma geometria na face onde é gerada a aparas, que tem a função de direccionar as aparas resultantes para fora da superfície maquinada e, também, de quebrar as aparas de forma a diminuir o risco de ficarem presas entre a ferramenta de corte e a peça.



O raio da ponta é o raio “circunscrito” entre o ângulo formado pelas arestas de corte primária e secundária. Este raio é responsável pela qualidade final da superfície e pela rugosidade final (Figura 22). De uma forma geral, podemos calcular a rugosidade esperada utilizando a equação 5a [25]:

$$R_a = \frac{f^2}{8R_e} \times 1000, \quad (5a)$$

R_a Rugosidade da superfície, em μm ;

f Avanço da ferramenta, em milímetros por rotação;

R_e Raio de ponta da ferramenta de corte, em milímetros.

Desta forma podemos estimar uma rugosidade final de:

$$R_a = \frac{0,073^2}{8 \times 0,079} \times 1000 \quad (5b)$$

$$R_a = 8,43 \mu\text{m} \quad (5c)$$

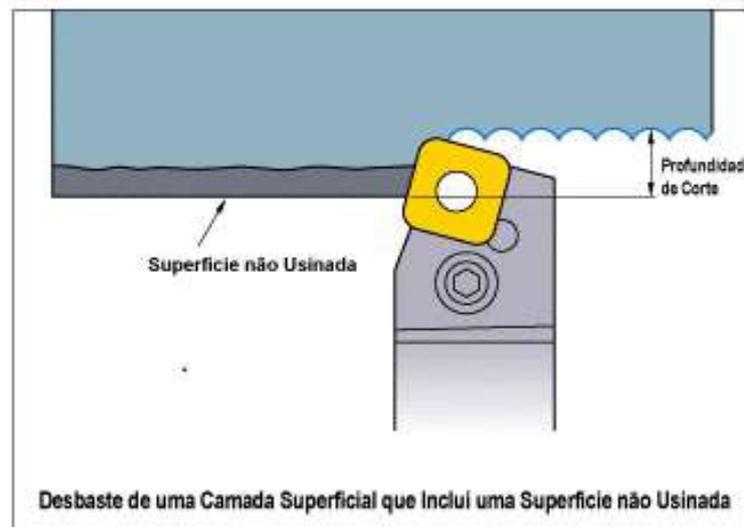


Figura 22 - Visualização da rugosidade superficial [25].

Com base na norma ISO 1302, está definido que esta rugosidade se encontra dentro da classe de acabamento após maquinagem, mais especificamente na classe N10.



O nível de rugosidade da superfície está diretamente relacionado com a sua resistência à fadiga. Por essa razão, é imperativo que a última passagem seja realizada a uma profundidade de corte reduzida, de forma a melhorar o acabamento teórico.

3.13. Ordens Anteriores

Foi realizada uma revisão de toda a biografia e documentação interna disponível sobre esta operação, bem como um levantamento dos valores finais do diâmetro do furo do *bore* das ordens anteriores.

O intuito desta revisão foi encontrar possíveis discrepâncias entre documentos complementares, simplificar as instruções fornecidas aos operadores e ainda identificar possíveis melhorias no processo.

Foram registados todos os valores obtidos nas ordens já encerradas com o intuito de serem analisados e, se possível, encontrar padrões que justifiquem, ou que, de alguma forma, prevejam a não qualidade. Este estudo foi complementado com a leitura de notas deixadas pelos operadores durante a execução das operações. É de notar que, como os valores apresentados são apenas os valores finais, nem sempre é possível avaliar a condição do furo imediatamente após a sua realização.

O facto de as quatro ferragens utilizadas na montagem do *link* serem fabricadas em Évora facilita o processo de alteração e implementação das melhorias encontradas entre cada uma das fabricações anteriores. Outros tipos de melhorias, como a alteração dos CAD's ou a alteração das tolerâncias de fabrico, têm de ser negociadas e acordadas com a Embraer, o que é um processo bastante mais demorado e com uma componente burocrática muito superior.

Entre cada operação de *boring* é testado o diâmetro do furo com o respectivo calibre. Este calibre possibilitou avaliar a condição do furo ao fazer duas passagens seguidas com a mesma ferramenta. Com este tipo de *setup*, a profundidade de corte só pode ser alterada com a alteração do *hardware*.

Foi testada a utilização de passagens adicionais com a mesma ferramenta. Na gíria de maquinagem, uma passagem sem alterar a profundidade de corte chama-se *Spring Pass*. Este método tem algumas desvantagens, como a possibilidade de piorar o acabamento final da peça. Isto faz com que o seu uso não seja consensual entre os



profissionais da área. Esta técnica é bastante utilizada quando se faz produtos de pequenas dimensões ou quando a máquina-ferramenta possui pouca rigidez.

A ideia de uma segunda passagem é limpar apenas a espessura residual derivada da componente elástica do material durante a remoção da apara.

Este fenómeno é bem visível quando se encosta um cabeçote em rotação ao material a ser maquinado. Algo bastante comum na maquinagem convencional na altura de “zerar” a máquina. Quando se encosta o cabeçote ao bloco de material para “zerar” o eixo x ou y (tradicionalmente), esta fica a fazer um barulho característico de tocar com cada uma das pastilhas na superfície de trabalho. Isto só acontece porque durante o contacto dos dois sólidos, ambos deformam elasticamente, voltando à sua posição “nominal” quando a pastilha deixa de estar em contacto com a peça.

Depois de calibrada a máquina-ferramenta e validado o diâmetro dos furos em CdP, a máquina é transferida e montada no gabarito de montagem do caixão. O gabarito possui fixadores dedicados para fixar a máquina na posição correta em relação à empenagem, que permite alargar o furo cumprindo os requisitos de GD&T de posição. Isto só é possível porque o próprio gabarito é sujeito a medições tridimensionais regulares, que aferem as suas próprias dimensões e a posição de batentes posicionais utilizados na montagem do produto.

Tabela 4 - Histórico de ordens anteriores, valores em mm.

Data	Furo Direito		Furo Esquerdo	
	Ø min	Ø max	Ø min	Ø max
05/08/2014	89,930		89,900	
27/10/2014	90,010		90,006	
20/04/2015	90,013		90,013	
24/10/2016	90,002	90,013	90,008	90,023
04/04/2017	90,019	90,019	90,009	90,012
26/09/2017	90,000	90,002	90,003	90,004
09/02/2018	90,029	90,035	90,020	90,029
04/05/2018	90,011	90,020	90,033	90,063
06/02/2019	90,046	90,056	90,017	90,025
10/09/2019	90,004	90,014	90,032	90,050
14/01/2020	90,010	90,021	90,017	90,025
15/12/2020	90,007	90,014	90,001	90,011
18/05/2022	90,084	90,094	90,068	90,080
20/01/2023	90,012	90,020	89,980	90,057
29/05/2023	90,021	90,025	89,981	90,030
30/10/2023	90,006	90,010	89,993	90,006
19/02/2024	90,002	90,014	90,002	90,016



Na tabela 4 estão os valores dos diâmetros finais dos furos de todas as ordens encerradas até ao momento.

Como se pode notar pelos valores, grande parte dos furos ficaram dentro da tolerância definida. É de notar que nesta fase do processo apenas se considera não conformidade valores acima do limite superior da tolerância.

Desta forma, podemos contabilizar que em 34 furos, 6 furos ficaram não conformes, o que representa 17,65 %, que é uma percentagem ainda considerável.

O objetivo deste estudo é reduzir a percentagem de não conformidades para um valor máximo de 5 %, que representa um furo NOK a cada 10 *Ship Set's*⁸. Atingindo este valor estipulado, será feita uma nova análise de custo-benefício para robustecer o processo para uma fiabilidade de 99 %, que representa um furo não conforme a cada 50 *Ship Set's*.

Com a análise dos dados da tabela é possível delinear alguns padrões, como por exemplo que os valores médios dos furos do lado direito ficam compreendidos dentro de um limite de tolerância mais pequeno, neste caso 0,007 mm, e que os furos do lado esquerdo tendencialmente ficam compreendidos num intervalo de tolerância de 0,019 mm, quase 3 vezes superior.

Foi realizado um estudo estatístico com os valores obtidos das ordens anteriores. A amostra avaliada corresponde a 100 % da população, não considerando a operação realizada a 18/05/2022, que foi um erro na preparação da máquina e, por essa razão, pode ser descartada desta análise.

Os dados foram separados em quatro grupos distintos, de acordo com o lado do furo e com o facto de serem registos do diâmetro máximo ou mínimo. Por esta razão, cada grupo apenas contém 13 valores, o que dificulta o processo de análise e identificação de padrões.

3.14. Análise dos Dados do Diâmetro Mínimo e Máximo dos Furos

De uma forma geral, os furos do lado direito ficam com valores de diâmetro numa faixa mais pequena, o que possibilita uma maior repetibilidade do diâmetro final dos furos; já os furos do lado esquerdo ficam tendencialmente localizados num intervalo mais amplo de diâmetros. Nesta fase do processo, não se considera diâmetros abaixo da

⁸ Conjunto completo de peças necessários para fabricar uma aeronave.



tolerância mínima como não conformes, dado que existe a possibilidade de retrabalhar ou voltar a alargar o furo.

Já o registo dos valores máximos do diâmetro dos furos indica uma clara tendência para o furo do lado esquerdo ficar com diâmetros superiores. As razões possíveis para esta discrepância irão ser discutidas no capítulo de sugestões e melhorias.

3.15. Análise dos Dados como um Conjunto

De uma forma geral, os dados recolhidos apresentam uma variação considerável em relação ao valor médio deles, uma vez que cerca de 80 % dos valores registados pertencem ao intervalo compreendido entre dois desvios padrão.

O desvio padrão calculado é de cerca de 0,0125 mm para os diâmetros mínimos e de 0,017 mm para os diâmetros máximos, o que demonstra que os dados não seguem uma distribuição normalizada. Neste caso, a grande maioria dos dados localiza-se dentro do desvio de +/- um desvio padrão, contrastando com o valor típico de 68 % dos dados.

A reduzida quantidade dos dados espalhada por um grande intervalo de tempo também dificulta a análise de alterações e melhorias implementadas no processo produtivo. Uma forma de mitigar este problema é a realização de testes de normalidade. Para a realização desse teste foram separados os dados em duas categorias distintas, diâmetro máximo e mínimo. Para a realização deste teste não foram incluídos os valores da ordem produtiva de 18/05/2022, uma vez que este resultado pode ser considerado uma anomalia estatística.

Nas figuras 23 e 24 estão representados a frequência absoluta dos valores de diâmetros mínimo e máximo, obtidos durante as operações, com base nestes gráficos é visível que os dados não seguem uma distribuição normalizada.

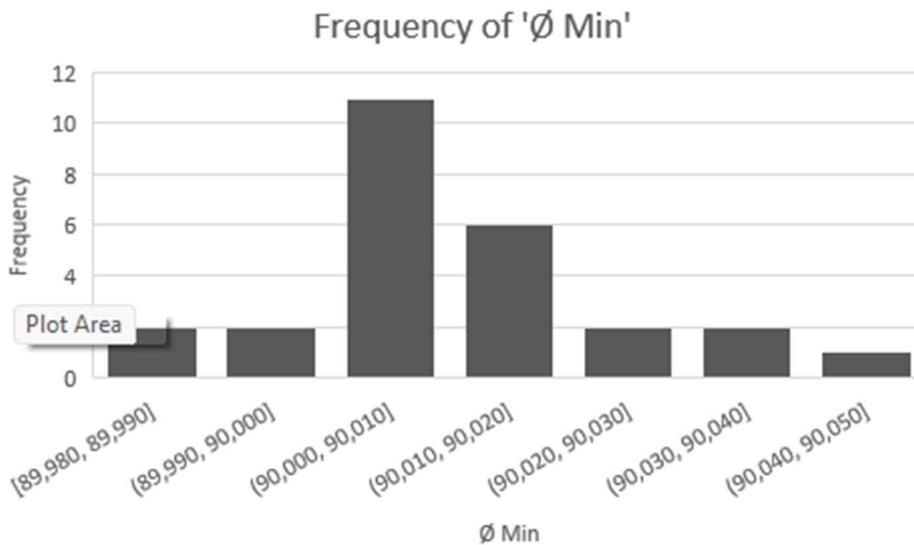


Figura 23 - Histograma da frequência dos valores de diâmetro mínimos

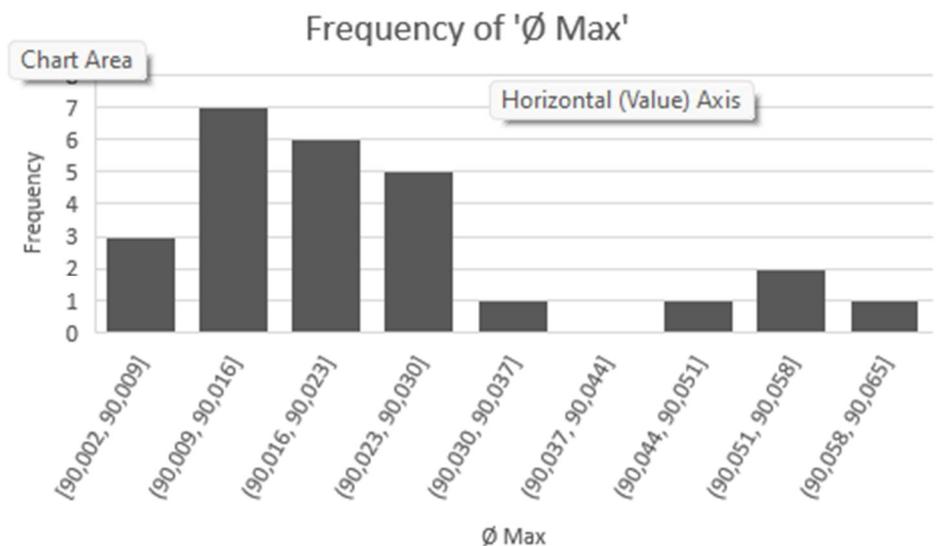


Figura 24 - Histograma da frequência dos valores de diâmetro máximos

3.16. Acompanhamento de Operações

Como já foi referido anteriormente, a principal forma de entender e quantificar as dificuldades encontradas pelos operadores durante a execução da operação é realizar o acompanhamento da mesma.

Tendencialmente, o acompanhamento deve ser realizado sem interferir nem perturbar o normal funcionamento da operação. Isto só acontece em operações mais rotinadas, em que os operadores procedem sempre da mesma forma. Como esta operação



tendencialmente era realizada com uma cadência anual de 2, os operadores não possuíam rotinas nem experiência acumulada das montagens anteriores.

Por essa razão, decidiu-se realizar um acompanhamento ativo na operação, auxiliando e instruindo os operadores sempre que necessário ou solicitado.

Durante a elaboração desta tese, tive a oportunidade de acompanhar três ordens diferentes. Em cada uma delas foram implementadas novas ações e melhorias, no entanto, por motivos de maior precessão dos impactos causados por cada uma dessas alterações, optou-se por alterar o mínimo possível de variáveis em cada uma das operações.

Em resumo, as dificuldades encontradas durante os três acompanhamentos foram:

- Complexidade das instruções da operação;
- Dificuldade na calibração das ferramentas de corte;
- Dificuldade em garantir a perpendicularidade entre o veio e o produto;
- Dificuldade na medição das passagens intermédias.

Estas dificuldades apontadas foram alvo de análise e melhorias. Algumas das ações tomadas ainda não foram totalmente implementadas à data do último acompanhamento, devido aos entraves típicos, como datas de entrega de material e a alta especificidade dos produtos a adquirir.

A complexidade da operação implica um nível de detalhe nas instruções de trabalho bastante diferente das instruções típicas. Por esta razão, foi difícil reduzir a complexidade presente na instrução. De certa forma, o facto da operação ser acompanhada eliminou este problema, porque o operador sempre que tinha uma dúvida ou sugestão, expunha-a.

Foi criada uma ordem de compra de um novo sistema para medição e conseqüente calibração das ferramentas de corte. Esta ação ainda não está terminada e pressupõe uma ação posterior: o estudo da relação entre o comprimento da ferramenta de corte e o diâmetro dos furos. Como foi referido no capítulo da análise de dados, existem diferenças notáveis entre os valores do diâmetro do lado esquerdo e direito da empenagem, mesmo tendo os dois furos sido alargados pela mesma ferramenta.

A medição da perpendicularidade entre o veio da máquina e o produto revelou-se um dos pontos mais difíceis de adereçar. O acesso para realizar a medição é bastante



limitado. Isto é uma característica do produto, logo é impossível de alterar. O método de verificação da perpendicularidade é analógico e depende da precessão e sensibilidade do operador. Foram questionados fornecedores de equipamentos de medição para esta situação, mas nenhum deles apresentou soluções sólidas para o problema.

Foram criados calibres *GoNogo*⁹ para a medição dos valores intermédios, conforme é visível na figura 25.



Figura 25 - Calibres *GoNogo*.

Além destas ações, foram também realizadas outras melhorias ao processo, como a adição de um campo para introdução da temperatura ambiente no momento da medição, e foram identificadas as ferramentas de corte de uma forma mais visível, para evitar a sua utilização pela sequência incorreta. Esta operação tinha como objetivo a criação de um sistema *poka-yoke*¹⁰, no entanto como as ferramentas são todas montadas num encaixe universal, apenas é possível aplicar um sistema de identificação por cores ou similar. Foi também alterada a condição do CdP para reproduzir de uma forma mais fiel a condição no produto, sendo que inicialmente eram utilizadas duas placas da mesma liga de matéria-prima. Foi também criado um campo para inserir os valores máximo e mínimo dos furos com indicação do lado.

⁹ Calibre passa ou não-passa.

¹⁰ Sistema anti erro.



3.17. Análise das Alterações Implementadas

É de referir que, neste momento, o processo foi otimizado com o único propósito de diminuir a não qualidade do furo. Numa fase posterior, será novamente otimizado com o intuito de reduzir o tempo de ciclo e aumentar a eficiência do mesmo.

O *feedback* dado pela produção após a realização de cada acompanhamento foi um ponto essencial para entender o impacto real das alterações ao processo produtivo, bem como os seus resultados.

De acordo com os *feedbacks* obtidos, a ação com mais impacto na melhoria dos resultados foi a implementação do uso dos calibres *GoNoGo* durante a operação. Esta ação possibilita uma perceção da condição atual do furo durante a realização de alargamento. A implementação da passagem de *Spring Pass* foi também bastante importante na obtenção de resultados mais próximos do limite inferior da tolerância.

A próxima ação a ser implementada é a alteração do processo de calibração das ferramentas de corte e a calibração de ferramentas de corte específicas para cada lado. Será também realizado um estudo sobre a relação entre o comprimento da ferramenta de corte e o diâmetro do furo.

Com o acompanhamento das operações e a implementação das ações indicadas anteriormente, foi visível uma melhoria nos resultados obtidos, que se traduz não só numa diminuição do número de não conformidades, mas também numa melhoria no valor de ovalização¹¹ do furo.

Analisando os valores do diâmetro final dos furos das ordens referentes aos três acompanhamentos efetuados, podemos verificar que todos os furos ficaram com um diâmetro compreendido entre 90,000 mm e 90,030 mm. Volto a referir que, nesta fase, todos os furos com valores de diâmetro inferiores a 90,000 mm são considerados como conformes, visto que podem ser retrabalhados até à sua medida nominal. Apenas foram registados os valores inferiores a 90,000 mm para efeitos de análise estatística e de melhor perceção das variações do sistema.

¹¹ Diferença entre o diâmetro máximo e mínimo.



4. Faceamento da Raiz

Neste capítulo será explicada a operação de faceamento da raiz, a sua necessidade e importância. É também analisado o relatório do *tap test* com o objetivo de clarificar a gama de rotações ideal para garantir que o sistema não entra em ressonância. É igualmente analisado o resultado da alteração das ferramentas de corte.

4.1. Explicação da operação

A operação do faceamento da raiz do estabilizador vertical consiste em maquinar todos os componentes da raiz para garantir que o valor do intervalo de tolerância da planeza entre eles é o mais apertado possível. O requisito de desenho a cumprir é de 0,20 mm, o que significa que todos os pontos da raiz da empenagem têm de estar compreendidos num “envelope¹²” com altura de 0,20 mm.

A correta montagem da empenagem na fuselagem do avião depende do cumprimento deste requisito, sendo uma zona crítica, a tolerância de *Gaps* na interface do EV com a fuselagem é bastante pequena. Um *gap* máximo de 0,20 mm pode ser absorvido pelo selante interface sem ser, assim, necessário o uso de calços.

A necessidade desta operação advém do tipo de posicionamento utilizado para a montagem das ferragens e longarinas. Como já foi explicado anteriormente, os *Datums* da peça são o que possibilita a sua medição e que define a sua avaliação dimensional. Ao posicionar e fixar os PN's que possuem *Datums* na sua posição de projeto, é possível garantir a melhor condição dimensional, com o inconveniente da possibilidade de nem todos os PN's poderem ser posicionados na mesma origem.

O posicionamento do bordo de ataque é feito fixando a longarina num ponto do ferramental, transferindo todo o erro dimensional dessa longarina no sentido da raiz, desta forma qualquer variação no comprimento total da longarina vai resultar numa variação do valor da planeza de toda a raiz. As ferragens fixas nos painéis do EV são posicionadas com um ferramental com um *offset* em relação à cota nominal da raiz. Este *offset* tem apenas o intuito de facilitar a montagem e de garantir a possibilidade de retrabalhar por faceamento todos os pontos.

¹² Sólido imaginário que envolve todo o PN.



O faceamento ocorre no gabarito de montagem do caixão, com uma fresadora construída no próprio gabarito, desta forma é mais fácil garantir o requisito de planeza. A fresadora está montada com o plano XY paralelo ao plano nominal da raiz.

Esta é a operação mais demorada de toda a montagem, ocupando em média 16 horas produtivas. Um dos objetivos deste projeto é também a melhoria do tempo de ciclo da operação.

4.2. Preparação da Operação

A preparação da operação é um processo igualmente crítico. É necessário garantir que a estrutura não se encontra tensionada, nem deslocada em nenhum sentido.

Após garantir-se que a estrutura está num estado livre de tensionamentos e torções, é iniciado o processo de medição das cotas no eixo Z de todas as ferragens e longarinas. Este eixo Z corresponde ao eixo perpendicular à raiz da empenagem e não ao eixo Z de coordenadas do avião.

Esta medição é a base para o cálculo da quantidade de material a remover. É necessário garantir duas condições: a espessura de todos os componentes dentro da sua tolerância de projeto e a planeza dentro do intervalo de 0,2 mm. É também necessário garantir que a cota do plano da interface da raiz fica o mais perto possível da sua cota de projeto. Qualquer alteração neste valor vai interferir diretamente com o comprimento total e com o peso da empenagem, o que, por sua vez, vai influenciar a coordenada em Z do Estabilizador Horizontal e o centro de gravidade da aeronave.

Antes de se iniciar a maquinagem no produto, é sempre realizada a calibração da ferramenta de corte e o seu teste em CdP.

A calibração da ferramenta de corte é realizada na sala de *presetter* em Primárias. Nesta etapa são verificados o estado das pastilhas de corte e a sua diferença de altura. O cabeçote (Figura 26) é colocado num projetor de perfil automatizado que lê a diferença de altura entre cada uma das pastilhas. Depois são registados os valores no próprio cabeçote e é dado o *offset* da altura da ferramenta com base no valor mais alto, que representa a primeira pastilha a tocar no produto.



Figura 26 - Cabeçote

Pela imagem anterior é possível verificar que as pastilhas 4 e 5 vão ser as primeiras a tocar no produto e, por essa razão, é necessário realizar o *offset* da ferramenta nessas mesmas pastilhas. A diferença entre a pastilha mais alta e mais baixa é de 0,029 mm, o que representa quase 15 % do intervalo de tolerância final da operação. Esta diferença tem tendência a reduzir com o desgaste das pastilhas.

4.3. Máquina-Ferramenta

Tal como já foi referido anteriormente, a fresadora está construída diretamente no gabarito e tem o seu plano de trabalho principal paralelo ao plano da interface do EV com a fuselagem. A cabeça da fresadora desloca-se em três eixos: X, Y e Z.

O controlo do movimento dos eixos X e Y é realizado eletronicamente com um comando, já a profundidade de corte é alterada manualmente. Esta limitação do eixo Z tem como principal intuito a segurança do operador durante a operação.

Esta fresadora apenas está preparada para realizar operações de faceamento a uma profundidade de corte máxima de 1 mm, uma rotação máxima de 10 000 RPM e uma velocidade de avanço máxima de 10 mm/s.

O conjunto composto pelo cabeçote e as pastilhas de corte é responsável pela remoção de material e pelo acabamento final da superfície. Como os parâmetros de corte possuem intervalos de ajuste relativamente pequenos, grande parte das ações



de melhoria passam pela alteração da geometria das arestas de corte do diâmetro do cabeçote.

Tal como na operação do alargamento do *bore*, também esta operação foi acompanhada e foram registadas possíveis melhorias e o respetivo resultado da sua implementação. Como esta operação é bastante similar a um faceamento típico, a equipa de Engenharia de Manufatura de Primárias esteve envolvida nos acompanhamentos e na proposta e implementação de melhorias.

4.4. Composição da Raiz

A raiz do estabilizador, como mostra a figura 27, é composta por duas longarinas e 14 ferragens, sendo que duas destas ferragens estão montadas no bordo de fuga.

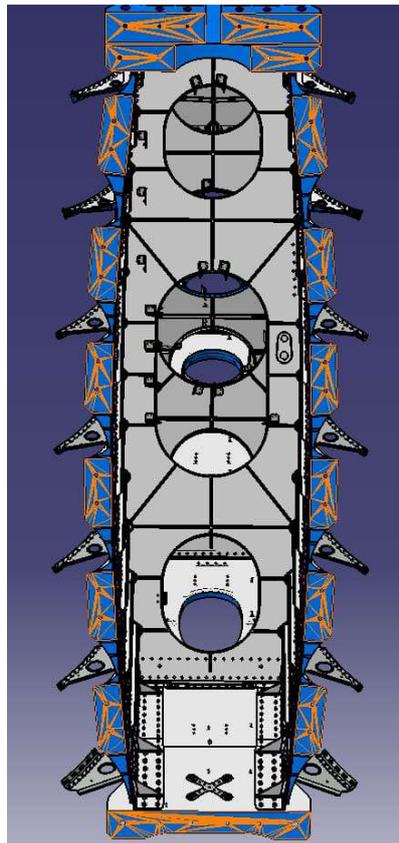


Figura 27 - Raiz da empenagem.

As bases das ferragens têm a forma aproximada de um retângulo com 270 mm por 100 mm, já as longarinas têm uma dimensão aproximada de 740 mm por 100 mm. De um ponto de vista mais simplista, podemos considerar que a área total de interface da raiz com a fuselagem equivale a 5 260 cm² ou 0,526 m².



A área total ocupada pela raiz da empenagem pode ser calculada em função da área do retângulo que a circunscreve; neste caso esse retângulo tem a dimensão aproximada de 2850 mm de comprimento por 860 mm de largura, que equivale a aproximadamente 2,45 m².

4.5. Operação padrão

Tal como já foi referido anteriormente, apenas cerca de 20 % da área da empenagem é faceada, a restante área não faz interface com a fuselagem. Esta situação possibilita também a melhoria na estratégia utilizada na maquinagem, pelo que é possível otimizar as trajetórias de corte.

O movimento de corte (Figura 28) só pode ser realizado num único eixo. Por razões de segurança, a máquina não permite o movimento automático dos eixos X e Y em simultâneo.

Na figura 28 está representada a trajetória típica utilizada na operação. Foi verificado que esta trajetória é a mais eficiente com as condições atuais, tendo em conta que o processo da alteração do eixo de deslocamento da fresadora é realizado de forma manual e é demorado. O tempo da alteração do sentido é similar ao de deixar a fresadora deslocar-se normalmente e elimina o risco de deixarmos pontos sem sobreposição de passagens e diminui também o número de ações do operador.

O diâmetro do cabeçote influencia diretamente o número mínimo de passagens necessárias. A largura total ocupada pelas ferragens é aproximadamente de 150 mm. É de notar que o diâmetro de corte efetivo depende do raio de ponta das pastilhas de corte. Geralmente o diâmetro de corte efetivo é calculado pela seguinte fórmula:

$$\varnothing_{Corte} = \varnothing_{Cabeçote} - 2 \times Raio\ de\ Ponta \quad (6)$$

Deve-se ainda utilizar uma sobreposição nas passagens, de modo a garantir a cobertura total da superfície. É também aconselhado a não realizar passagens com o cabeçote a cheio¹³, no entanto como as passagens são realizadas com uma baixa profundidade de corte e um avanço bastante reduzido, os efeitos negativos são praticamente nulos.

¹³ Cortar a 100 % da superfície de corte

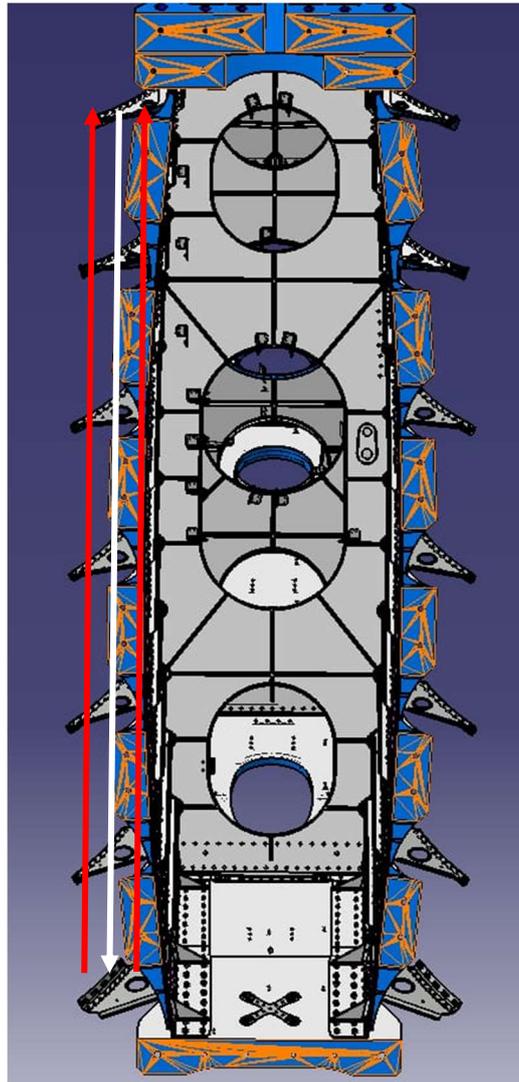


Figura 28 - Movimentos da fresadora.

4.6. Características de corte

Tal como para a operação do alargamento do furo do *bore*, é possível calcular a potência de corte necessária para esta operação de fresamento.

$$\text{Potência de Corte} = Q \times K_c \times \frac{1}{60\,000} \quad (7)$$

Q Taxa de remoção de material, em cm³ por minuto;

K_c Força de corte específica para a aplicação;

$\frac{1}{60\,000}$ Fator de conversão para kW.



$$Q = \frac{A_p \times A_e \times V_f}{1000} \quad (8a)$$

A_p Profundidade de corte, em cm;

A_e Largura de corte, em cm;

V_f Velocidade de avanço, em cm/min.

Considerando o pior caso de profundidade de corte (1 mm) e avanço (10 mm/s), temos a seguinte taxa de remoção de material:

$$Q = 0,1 \times 6,3 \times 60 \quad (8b)$$

$$Q = 37,8 \text{ cm}^3/\text{min} \quad (8c)$$

Considerando um K_c de 750, podemos calcular a potência de corte necessária.

$$\text{Potência} = \frac{37,8 \times 750}{60\,000} \quad (9a)$$

$$\text{Potência} = 0,4725 \text{ kW} \quad (9b)$$

4.7. Teste de ressonância do conjunto

Foi realizado um teste que mede a frequência natural da empenagem na condição em que é maquinada e da fresadora. Depois, o programa utilizado calcula as velocidades ideais de corte para o sistema, indicando também as velocidades críticas.

Este ensaio foi realizado utilizando dois acelerómetros: um colocado na estrutura ou na fresadora e o segundo incorporado no martelo ilustrado na figura 29.

Este martelo tem um acelerómetro incorporado e diferentes sensores permutáveis com graus de sensibilidade diferentes. O acelerómetro colocado na estrutura também é escolhido de acordo com as frequências específicas a avaliar.



Figura 29 - Martelo DYNAPULSE.

O ensaio deve ser realizado em dois vetores: X e Y, de forma a verificar se o deslocamento é homogéneo nos dois sentidos. Geralmente, se as peças possuírem dimensões similares em X e Y e forem bem fixadas, os dois eixos de deslocação são bastante similares.

Neste caso, devido à complexidade da estrutura, a impossibilidade de utilizar uma fixação mais robusta e à diferença da dimensão do comprimento e largura, o conjunto tem valores de deslocamento diferentes para X e para Y. Tal como anteriormente, foi considerado o pior caso.

O ensaio consiste em bater com o martelo na estrutura e medir a relação entre o deslocamento do sistema e a força do impacto. O ensaio consiste numa média de cinco amostras, de forma a eliminar oscilações e ruído nas medições.

Estes dados de força e deslocamento são depois registados num programa dedicado que cria uma função de transferência com estas duas entradas. Nas imagens seguintes encontram-se alguns dados de *setup* utilizados no programa (Figura 30). É de notar que o “*Input Sensors*” (Figura 31) corresponde ao sensor colocado no martelo e que o “*Output Sensors*” (Figura 32) corresponde ao sensor colocado na estrutura.

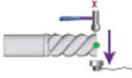
1.1 Test Conditions 1.2 Data Acquisition Device 1.3 Input Sensors 1.4 Output Sensors 1.5 Results	
 General tap test	
Frequency	
Minimum	100,000 Hz
Maximum	5000,000 Hz
Resolution	1,000 Hz
Sampling Rate	51200,000 Hz
Decimate	False
Transfer Function	
Type	Displacement - Force
Data	
Number of Readings	5

Figura 30 - Condições do teste.

1.3 Input Sensors	
General	
Channel Number	0
Source	Force
Type	Hammer
Model Name	DYNAPULSE 01
Impact Model	
Sensitivity	2,450 mV/N

Figura 31 - Sensor do martelo.

1.4 Output Sensors	
Output Sensor 1, General	
Channel Name	Channel 1
Channel Number	1
Type	Accelerometer
Model Name	DYTRAN 9.6
Sensitivity	9,600 mV/g

Figura 32 - Sensor do produto.



O programa depois devolve vários gráficos com a magnitude dos deslocamentos e as frequências naturais do sistema (Figura 33). Neste caso, concluiu-se que a fresadora possui uma frequência de ressonância na faixa dos 850 Hz, como é visível na imagem seguinte.

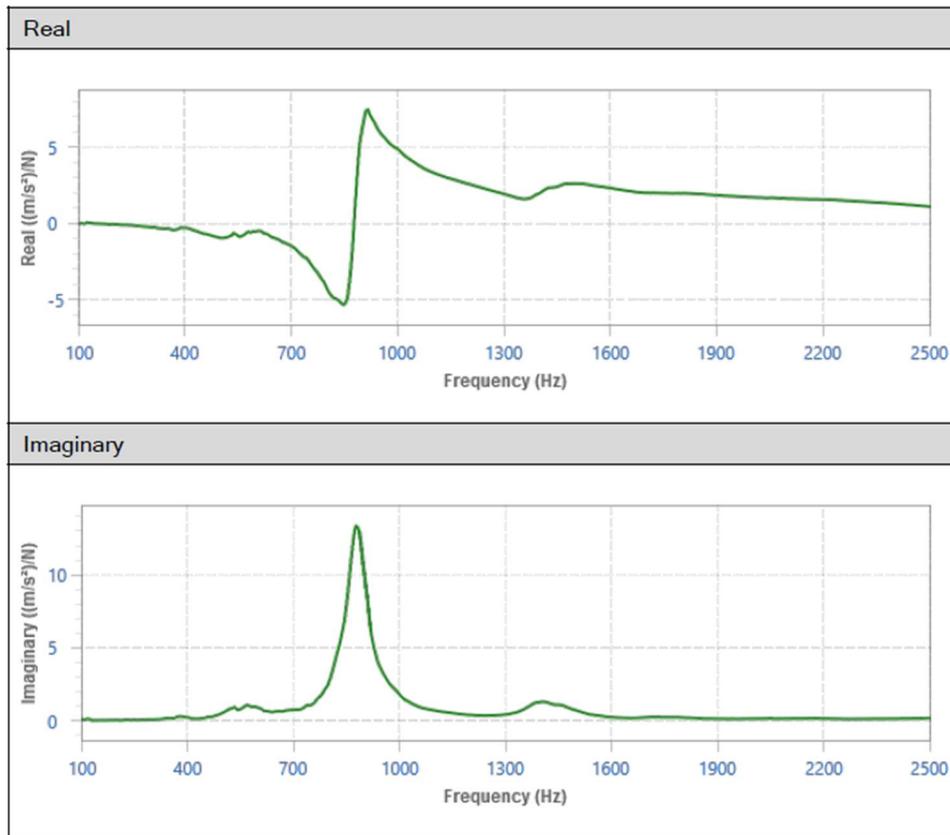


Figura 33 - Frequência de ressonância da fresadora em X.

O sistema calcula também um gráfico com os valores teóricos resultantes de aproximações. Os resultados real e imaginário são bastante similares, indicando com um elevado grau de certeza que a frequência natural está dentro da faixa de frequências entre 700 e 1000 Hz; isto acontece também no outro eixo medido (Figura 34).

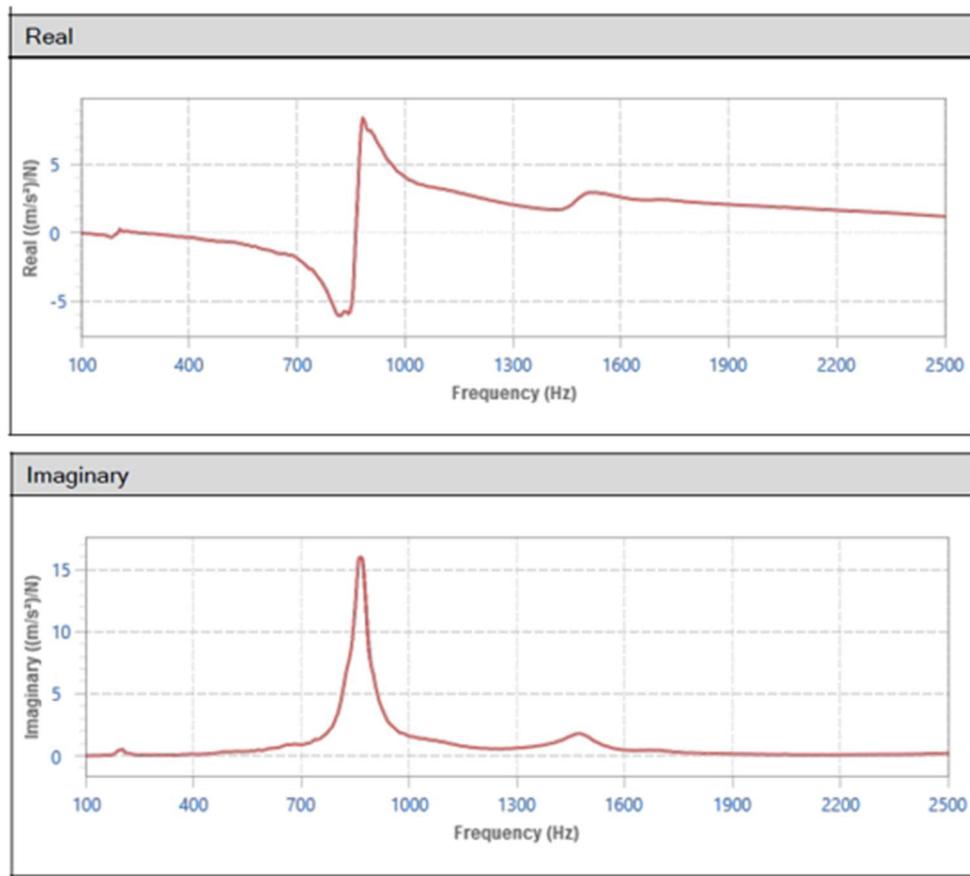


Figura 34 - Frequência de ressonância da fresadora em Y.

Já a análise do estabilizador vertical é mais delicada. Isto deve-se ao facto de possuir uma forma complexa e uma grande variação das dimensões em X, Y e Z. Os gráficos da função de transferência obtidos estão representados na figura 35. Estes gráficos demonstram que existem várias frequências de ressonância no conjunto e que todas elas são de baixa frequência, como era expectável devido à forma do produto e ao tipo de fixação possível. Para uma análise mais detalhada das frequências de ressonância deste produto é necessário avaliar os dados do gráfico que apresenta os valores de fase em função da frequência.

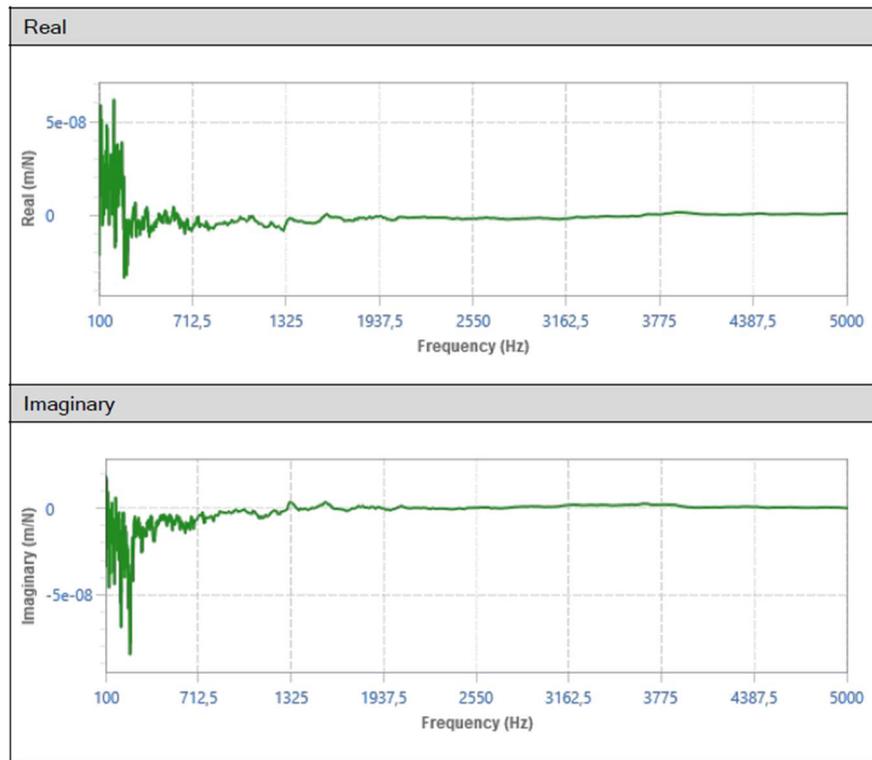


Figura 35 - Frequência de ressonância do EV.

Estes gráficos demonstram que existem várias frequências de ressonância no conjunto e que todas elas são de baixa frequência, como era expectável devido à forma do produto e ao tipo de fixação possível. Para uma análise mais detalhada das frequências de ressonância deste produto é necessário avaliar os dados do gráfico que apresenta os valores de fase em função da frequência.

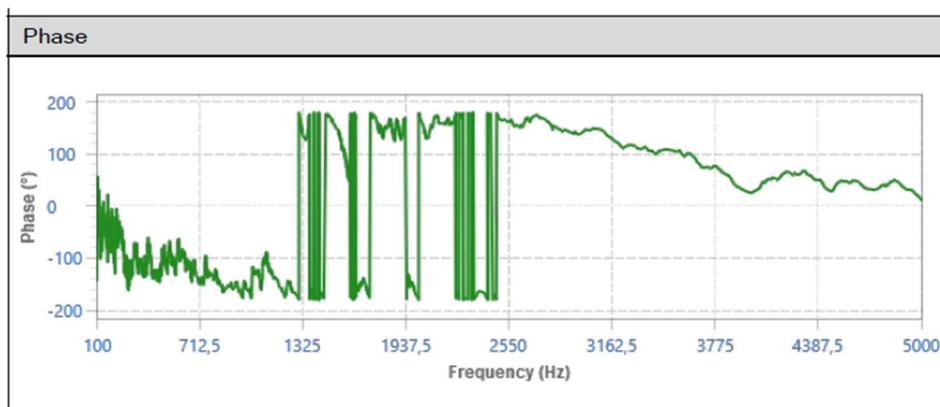


Figura 36 - Valores de fase em função da frequência.

Para facilitar a análise, vamos dividir o gráfico em três faixas de frequência, dos 100 aos 1325 Hz, dos 1325 aos 2550 Hz e dos 2550 aos 5000 Hz (Figura 36).



Na primeira faixa, o sistema tem uma tendência a aproximar-se do desfasamento de -180° com o aumentar da frequência. Na segunda faixa, os valores da fase alteram rapidamente entre $+180^\circ$ e -180° . Isto deve-se à forma como o programa mostra o gráfico: um valor de $+181^\circ$ é apresentado como -179° , ou seja, podemos considerar que toda esta faixa de frequências está desfasada 180° . A terceira e última faixa do gráfico mostra claramente que o sistema deixa de ter capacidade de responder aos impulsos externos e entra em saturação, voltando a atingir a fase de 0° a uma frequência de 5000 Hz.

O gráfico da figura 37, que representa a frequência de saída demonstra isto de uma forma mais clara.

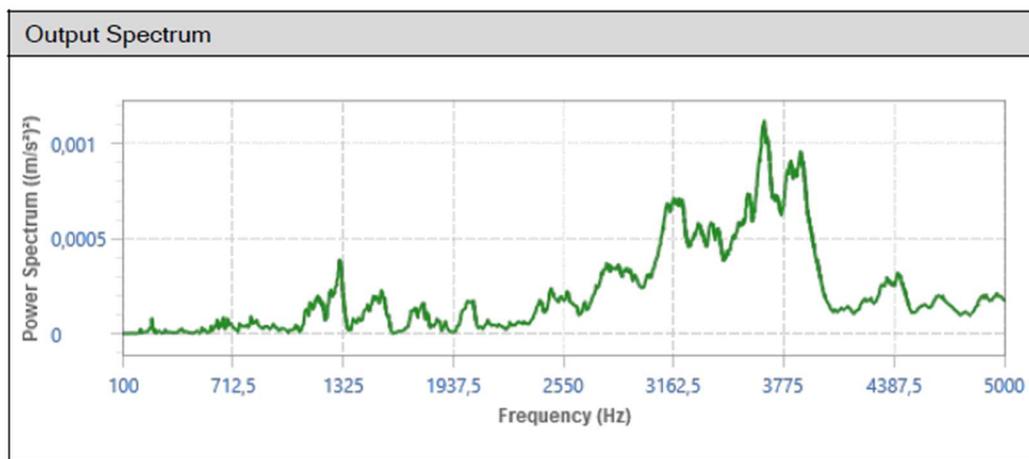


Figura 37 - Frequência de saída.

Por fim, o programa cria um gráfico com as velocidades de rotação ideais em função da geometria da ferramenta de corte.

Para a criação deste gráfico, é necessário parametrizar a ferramenta de corte quanto ao seu formato e material (Figuras 38 e 39). É também necessário caracterizar o material do produto a ser maquinado (Figura 40).

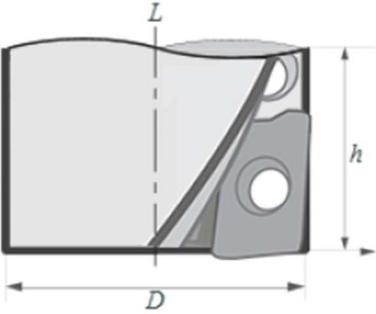
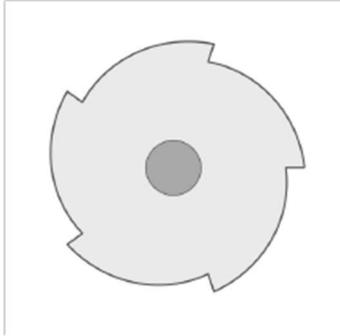
1.1 Machine and Tool			
Cutter Properties, General			
Cutter Type	Indexable	Number of Flutes	5
			

Figura 38 - Forma do cabeçote.

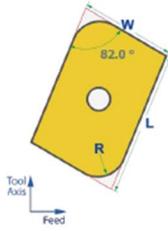
Cutter Properties, Level 1		
Type	B - Parallelogram 82°	
Length (L)	15.500 mm	
Width (W)	10.000 mm	
Clearance angle	30.000 °	
Nose angle (E)	82.000 °	
Corner radius (R)	3.000 mm	
Wiper flat	0.000 mm	
Axial rake (γ_p)	12.000 °	
Radial rake (γ_f)	8.000 °	
Cutting edge (kr)	75.000 °	
Lag	0.000 °	
Tool diameter	63.000 mm	
First bearing position	200.000 mm	

Figura 39 - Dados das pastilhas de corte.

1.2 Workpiece	
Material Properties	
Name	Aluminum 7050-T7451 (High speed 500m/min to 3000 m/min)
Standard	AISI
Category	MAL Materials

Figura 40 - Dados do material do EV.

Após a introdução de todos estes parâmetros, o programa cria um gráfico com base na função de transferência, como é possível ver na imagem 39.

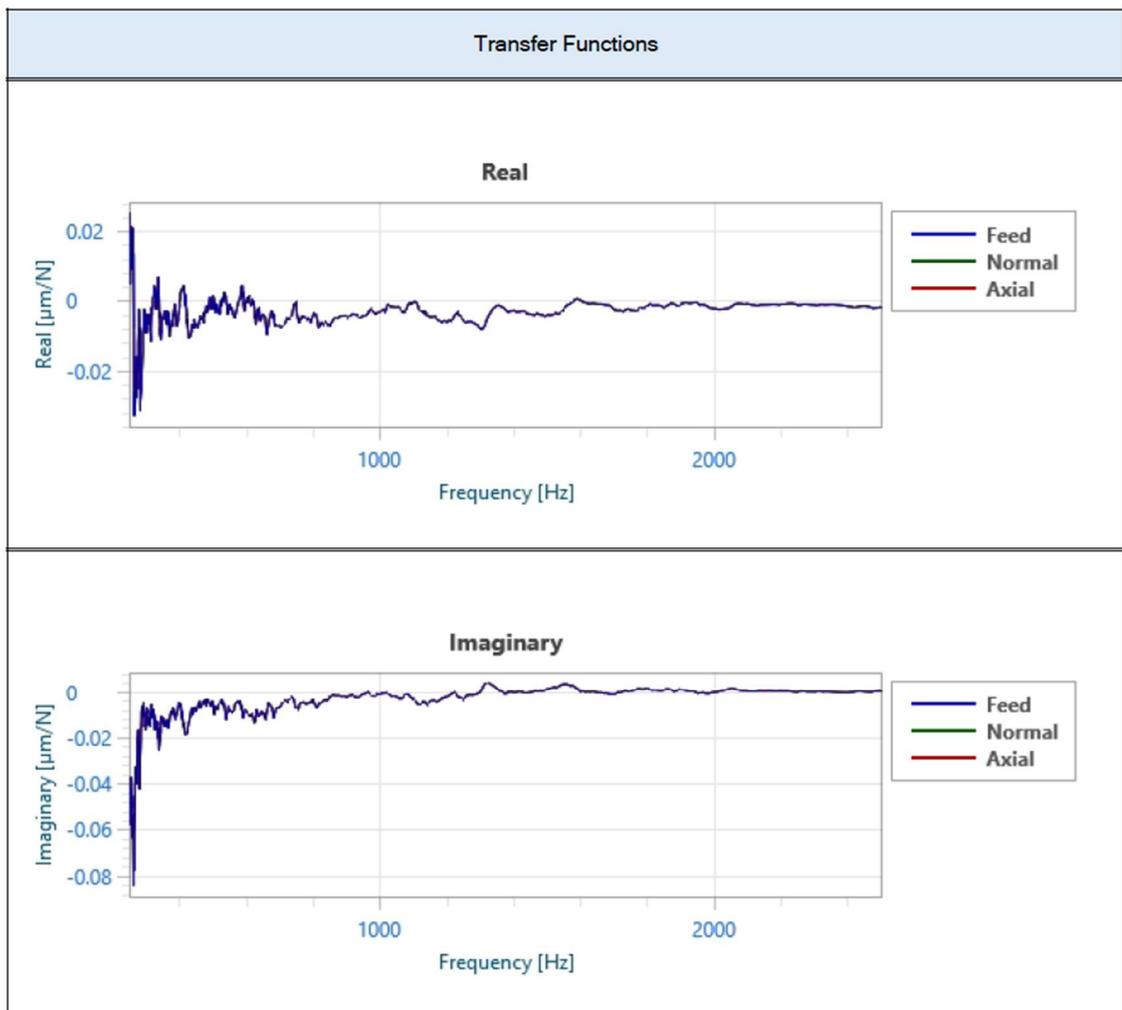


Figura 41 - Gráfico da Função de transferência com input da frequência.



Com o *input* desta função, é possível criar um gráfico que relaciona a velocidade de rotação com a profundidade máxima de corte. Este gráfico é válido apenas para uma velocidade de avanço, sendo que a sua extrapolação direta para outras velocidades não deve ser aplicada sem conhecer o comportamento do sistema.

Optou-se por construir o gráfico com base na velocidade de corte de 0,2 mm por dente, que representa uma velocidade de corte de extremamente alta. Esta decisão teve como principal objetivo a melhor delimitação das velocidades de rotação ideais, uma vez que existe um maior contraste entre os pontos mais altos e mais baixos do gráfico.

Analisando o gráfico da figura 42, é visível que com o aumento da velocidade de rotação, aumenta também a profundidade máxima de corte. No entanto, não segue uma tendência linear, por exemplo, uma rotação de 5 000 RPM alcança melhores resultados que todas as rotações até ao limite de 9 000 RPM. A rotação utilizada na operação é de 10 000 RPM, que embora não seja o ideal, aproxima-se bastante da profundidade máxima.

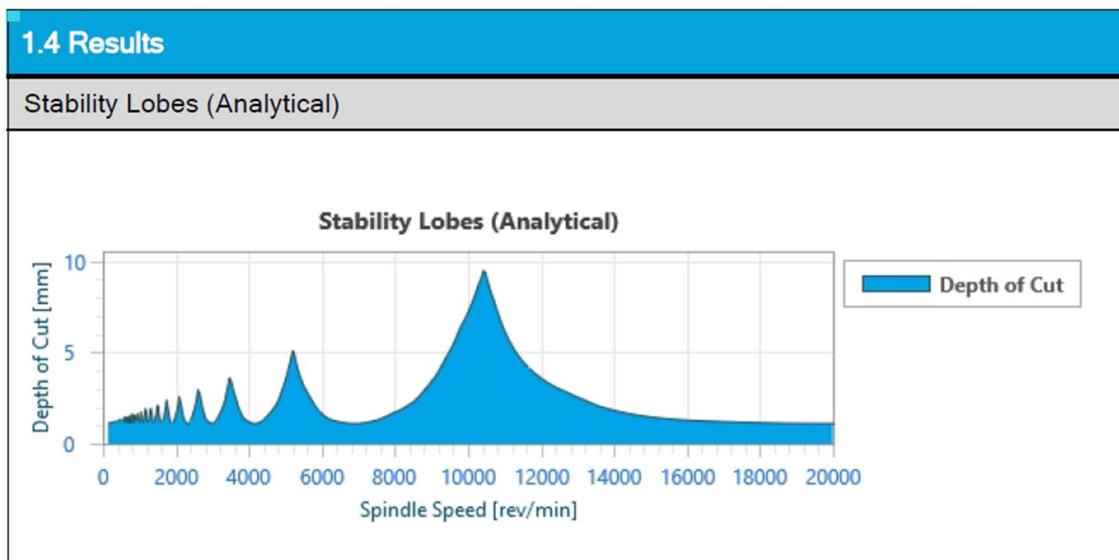


Figura 42 - Núcleos de estabilidade.

4.8. Acompanhamentos

No último acompanhamento foi testado um novo cabeçote com diâmetro superior e nova geometria das pastilhas de corte (Figura 43). Este diâmetro superior possibilitou uma redução do tempo de maquinagem, já alteração da geometria das pastilhas



permitia uma maior profundidade de corte. Por razões de segurança, optou-se por manter os parâmetros de corte inalterados.

As pastilhas de corte utilizadas possuem um raio de ponta de 3 mm e têm a forma trapezoidal com a inclinação de 82°.



Figura 43 - Pastilha de corte.

Durante a execução da operação foi, também, testado o efeito da alteração da velocidade de rotação e de avanço, foi criada uma tabela com os valores de rotação e avanço e o respetivo resultado em função do acabamento superficial e da vibração do sistema. Estes resultados foram medidos de uma forma empírica e depois foram comparados aos obtidos no teste. As conclusões foram idênticas, validando assim as observações e notas obtidas durante a realização da operação.

4.9. Melhorias ao processo

Ao contrário do que acontece com o furo do *bore*, as melhorias nesta operação têm como objetivo principal a redução do tempo de execução da mesma, uma vez que é um processo que oferece um resultado mais repetitivo.



A melhoria que pode trazer um maior benefício em termos de tempo de execução é a modificação do sistema de controlo da fresadora para um sistema CNC. Neste momento as ferragens são faceadas com três passagens verticais, sem alterar a profundidade de corte. Na ordem anterior, como foi utilizado um cabeçote com um diâmetro inferior, foram necessárias quatro passagens. Cada uma destas passagens tem uma duração aproximada de 15 minutos. Se for utilizada uma trajetória elíptica que mantenha o diâmetro de corte radial constante em todas as ferragens, é possível reduzir para duas passagens. Esta medida é particularmente importante na etapa de acabamento em que a velocidade de avanço é metade da velocidade utilizada nas etapas de desbaste.

Outra melhoria apresentada passa pela alteração das pastilhas de corte para umas com um raio de ponta mais pequeno. Esta diferença de geometria diminui a quantidade de material removido, que, por sua vez, diminui o esforço da estrutura e consequentemente diminui as vibrações.

O método de lubrificação também é um assunto que pode ser melhorado. Em Primárias, nas fresadoras Makino, é utilizado um método de lubrificação por nuvem, que consiste na vaporização de óleo lubrificante para a peça e ferramenta de corte. Estas máquinas são fechadas e possuem sistemas de exaustão preparados para o efeito. Em fresadoras convencionais, por vezes, existe um sistema de lubrificação gota a gota ou, até mesmo, um sistema que expelle óleo através de orifícios na própria fresa. Tendo em conta que esta operação é realizada em chão de fábrica e num espaço aberto, este tipo de opções convencionais não pode ser utilizado. No entanto, tomou-se a iniciativa de contactar fornecedores e fabricantes do ramo a questionar possíveis soluções.



5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste último capítulo será sumarizado os resultados obtidos durante a realização do trabalho de projeto, será feita uma análise das alterações testadas e consequentemente das melhorias implementadas. Serão também apresentadas propostas de trabalhos futuros para dar continuidade à melhoria do processo.

5.1. Conclusões

O presente trabalho de projeto teve como principal objetivo aumentar a produtividade geral do processo de montagem do estabilizador vertical do KC-390. Este aumento de produtividade é medido com base na diminuição do número de não conformidades resultantes destas duas operações, bem como na redução do tempo de ciclo da produção do produto.

As duas operações estudadas neste trabalho foram analisadas de forma diferente, o objetivo das melhorias na operação de alargamento do furo do *bore* foi a redução de não conformidades e a homogeneização dos resultados obtidos. O faceamento da raiz é uma operação com um processo mais robusto que leva a resultados mais similares entre ordens, por essa razão o objetivo passou pela melhoria no tempo de ciclo da operação.

Os resultados obtidos na operação de alargamento do furo do *bore* nas ordens produtivas realizadas durante este trabalho de projeto mostram o impacto positivo das alterações realizadas ao processo. Foi adotada uma abordagem mais conservadora que garante a possibilidade de retrabalho até à condição de projeto do furo com o custo de tempo de ciclo. Foram criadas rotinas de calibração e medição das ferramentas de corte, de certa forma estas alterações em conjunto com o acompanhamento durante a operação resultaram em valores de diâmetro mais perto do seu valor teórico. Foi também identificada a necessidade de ferramentas distintas para o lado esquerdo e direito.

Em relação ao faceamento da raiz, foi bastante importante a confirmação das velocidades de rotação ideais para o conjunto. O teste de ressonância realizado durante o último acompanhamento revelou que a frequência de ressonância do conjunto é bastante baixa o que dificulta bastante a realização da operação em condições perfeitas. Foi também mitigado o problema da rigidez do sistema com a



escolha das pastilhas de corte e com o aumento do diâmetro de corte. Ficou bastante evidenciado que todo o sistema de *hardware* não possui grande margem para melhoria e que o caminho a seguir é otimizar o percurso da ferramenta de corte diminuindo o número de passagens total.

A realização deste trabalho de projeto possibilitou a criação e desenvolvimento de novos procedimentos internos utilizados durante as operações, melhorou também a qualidade e transparência dos procedimentos já existentes em chão de fábrica. Como complemento aos documentos internos que foram desenvolvidos, foi também adequado no roteiro mãe as operações mencionadas neste trabalho, o teor dessas alterações foram resultado de várias iterações entre todas as áreas envolvidas e resultaram na criação de novos documentos e *tryouts* obrigatórios para a alteação do processo produtivo.

Foi também realizado um processo de FAI parcial, para validar todas as alterações implementadas. Estas FAI's foram realizadas em todas as ordens, uma vez que foram introduzidas alteações em todas as ordens implementadas. É de notar que todos estes documentos são confidenciais e propriedade da Embraer e da Aernnova através de acordos de confidencialidade.

5.2. Trabalhos futuros

Em relação ao furo do *Bore*, como já foi referido anteriormente, já foi adquirido um novo sistema de calibração das ferramentas de corte. Quando este sistema chegar, será levado a cabo um estudo que terá em consideração a relação entre o comprimento da ferramenta de corte e o diâmetro do furo. Esta análise terá de ser realizada individualmente para cada um dos lados e ajudará, também, a entender melhor o efeito do batimento¹⁴ associado à máquina-ferramenta.

Outro trabalho futuro a ter em conta é uma solução mais fiável e que ofereça mais repetibilidade na medição de perpendicularidade do sistema máquina produto. O valor da perpendicularidade é importante em próximas montagens, possuindo um critério de avaliação por GD&T apertado.

Em relação ao Faceamento da Raiz, o próximo objetivo é testar umas novas pastilhas de corte com um raio de ponta mais pequeno a uma velocidade de rotação que

¹⁴ Desvio do eixo de rotação em relação ao eixo teórico.



produza o mínimo de vibrações. Como essa velocidade está fora do intervalo de velocidades definido pelo fabricante da fresadora, será utilizada a velocidade máxima.

A melhoria com maior margem para redução do tempo de ciclo é a criação de um sistema automático que faça o controlo da posição da ferramenta de corte, possibilitando o movimento simultâneo em X e Y, bem como alteração entre velocidade de deslocação e de corte.



UNIVERSIDADE
DE ÉVORA



Referências

- [1] Guerreiro, D. (2022). Aumento da Vida útil de Ferramentas de Corte com minimização dos custos de não qualidade. Mestrado em Engenharia Mecatrónica, Universidade de Évora. <http://hdl.handle.net/10174/33136>
- [2] Centro histórico da Embraer. Acedido em 12 de Novembro de 2023, em: <https://historicalcenter.embraer.com>
- [3] KC-390 para C-390 MILLENNIUM: o que mudou? Acedido em 12 de Novembro de 2023, em: <https://www.defesanet.com.br/terrestre/kc-390-para-c-390-millennium-o-que-mudou/>
- [4] C-390 Millennium, A nova geração de aeronaves de transporte multimissão Embraer. Acedido em 12 de Novembro de 2023, em: <https://defense.embraer.com/br/pt/c-390>
- [5] National Museum of the United States Air Force. Acedido a 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/196252/boeing-b-29-superfortress/>
- [6] Força Aérea Portuguesa. Aeronaves. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.emfa.pt/aeronaves>
- [7] Força Aérea Portuguesa. LOCKHEED MARTIN F-16 AM. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.emfa.pt/aeronave-18-lockheed-martin-f16-am>
- [8] Força Aérea Portuguesa. Embraer KC-390. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.emfa.pt/aeronave-81-kc390#>
- [9] Belanger, J.B. (2008). History of GD&T. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://gdtseminars.com/2008/03/25/history-of-gdt/>
- [10] Groover, M. P. (2018). Principles of Modern Manufacturing. Wiley.
- [11] Domingues, A. (2023). Implementação de Metodologia para Controlo Estatístico do Processo na Inspeção Tridimensional de Peças Metálicas de Aeronaves. Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior. <http://hdl.handle.net/10400.6/14133>
- [12] Geiss, T. (2014) Feature Control Frame. Acedido a 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.gdandtbasics.com/feature-control-frame>



- [13] Norma ISO 1101. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:1101:ed-4:v1:en>
- [14] GD&T Basics, Profile of a Surface. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.gdandtbasics.com/profile-of-a-surface>
- [15] Saha, P.K. (2016). Aerospace Manufacturing Processes (1st ed.).
- [16] Subramanya, N., Kumar, A. R. S., Yadav, V., Venkatesh, R. K. Manufacturing process planning in aerospace systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1258, Fourth International Conference on Materials Science and Manufacturing Technology, ICMSMT 2022. 08/04/2022 - 09/04/2022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1258/1/012027>
- [17] HI-LOK™ and HI-LITE™ Fasteners. Composite. Acedido em 15 de Janeiro de 2024, em: <https://www.lisi-aerospace.com/en/product/hi-lok-and-hi-lite-fasteners>
- [18] MatWeb, Aluminum 7050-T7451 (7050-T73651). Acedido em 2 de Fevereiro de 2024, em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=142262cf7fbc4c83917ca5c3d17df1ed>
- [19] MatWeb, Aluminum 7475-T7351. Acedido em 2 de Fevereiro de 2024, em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=92620a0b7b9a44fcb34799eda01d2b18>
- [20] Geometrical product specifications. Norma ISO 286-2. Acedido em 2 de Fevereiro de 2024, em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:286:-2:ed-2:v1:en>
- [21] Groover, M. P. (2018). Principles of Modern Manufacturing. Wiley.
- [22] Norma ANSI B212. 4-2002. Indexable Inserts - Identification System, for Cutting Tools.
- [23] ANSI and ISO Insert Designations. Acedido em 2 de Fevereiro de 2024, em: https://littlemachineshop.com/info/insert_charts.php
- [24] ISO 3002-1. Basic quantities in cutting and grinding. Acedido em 2 de Fevereiro de 2024, em: <https://www.iso.org/standard/8052.html>
- [25] Mitsubishi Materials (2024). Efeito das condições de corte para o torneamento. Acedido em 2 de Fevereiro de 2024, em: https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/turning_effects.html