



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

# Algoritmo de validação de testes de *pen marking*

(Versão Revista Após Discussão)

**Sara Moreira Alves**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Aeronáutica**

(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

Co-orientador: Eng. Alexandre Miguel Rúbio do Amaral

Covilhã, dezembro de 2018



# Dedicatória

Aos meus pais, Rui e Clara, por toda a dedicação, constante apoio e acima de tudo por todos os esforços que fizeram e continuam a fazer para que eu consiga alcançar os meus objetivos. São e serão sempre a minha fonte de inspiração e motivação!

Ao meu irmão, Martim, que me motiva todos os dias a seguir um caminho de muito esforço e dedicação, a fim de me tornar um exemplo para ele.

A toda a minha família que sempre me incentivou e apoiou.

Ao meu namorado e melhor amigo, Alexandre, o meu pilar ao longo destes anos.

**“Genius is one percent inspiration and  
ninety-nine percent perspiration.”**

Thomas A. Edison



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, tenho de agradecer aos meus pais por tudo aquilo que fazem por mim, sem o seu esforço e constante apoio não teria conseguido chegar onde cheguei. A pessoa que sou hoje, a eles o devo. Pela contante força, determinação e amor que sempre me transmitiram.

Ao meu irmão, pela sua amizade e amor que me motiva e inspira todos os dias.

A toda a minha família, pelo constante apoio e carinho ao longo da minha vida e deste percurso.

Um especial agradecimento ao meu orientador, professor Francisco Brójo pela sua disponibilidade e ajuda ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Um grande agradecimento ao meu co-orientador, engenheiro Alexandre Amaral pela oportunidade que me deu em integrar a equipa de automação, possibilitando o desenvolvimento deste trabalho. Pelo seu apoio, por me guiar e transmitir todos os conhecimentos sobre a área de automação e também pela sua amizade.

Um agradecimento às equipas de automação, qualidade e Engenharia de Manufatura da Embraer, bem como à equipa da Gemcor, que estiveram sempre dispostas a ajudar-me e a tirar todas as minhas dúvidas.

Obrigada ao meu amor, Alexandre, que esteve sempre ao meu lado em todos os momentos. A sua ajuda, apoio e carinho foram essenciais ao longo do meu percurso não só académico, mas também pessoal.

Por último, muito obrigada a todos os meus amigos, que me acompanharam e apoiaram ao longo da minha vida. Aos que a Covilhã me trouxe, que foram como uma segunda família para mim. Especialmente a Andreia e a Inês, pela sua amizade e ajuda nestes cinco anos.



# Resumo

Esta dissertação resultou de uma parceria entre a Universidade da Beira Interior e a Embraer Portugal S.A. e teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo que permite a validação de forma automática dos testes de *pen marking* efetuados nas máquinas rebitadoras utilizadas nas instalações da empresa. Estas consistem no modelo E6390 da Electroimpact e no modelo GRS6010SX-163/G86 Drivmatic Riveting System produzido pela Gemcor e têm como principal objetivo efetuar as funções de furação e cravação dos painéis das asas das aeronaves E-Jets E2.

Esta validação é feita através da comparação das coordenadas reais e programadas retiradas dos dados da máquina, com recurso ao *software* Visual Basic for Applications®. Com este algoritmo, pretende-se que a validação seja efetuada de uma forma muito mais rápida, fácil, ergonómica e segura do que a validação manual que tem vindo a ser feita.

Para atingir este objetivo, a autora acompanhou todas as etapas de fabricação e montagem dos revestimentos das asas desta família de aeronaves, de forma a compreender quais as variantes que influenciam o processo de furação e cravação, permitindo assim descobrir a causa raiz que está por trás dos erros decorridos nos testes de *pen marking*.

## Palavras-Chave

Embraer, E-Jets E2, Rebitadora, Electroimpact, Gemcor, Automação, *Pen marking*, VBA.



# Abstract

This dissertation as resulted from a partnership between the University of Beira Interior and Embraer Portugal S.A. and aimed to develop an algorithm that allows automatic validation of the *pen marking* tests performed on the riveting machines used in the company's facilities. These consist of the Electroimpact E6390 model, and the GRS6010SX-163 / G86 Drivmatic Riveting System produced by Gemcor, and have as their purpose the drilling and fastening function of E-Jets E2 wing panels.

This validation is done by comparing the actual and programmed coordinates taken from the machine data, using Visual Basic for Applications® software. With this algorithm, it is intended that the validation be carried out in a much faster, easier, ergonomic and safe way than the manual validation that has been done.

In order to achieve this objective, the author followed all the stages of fabrication and assembly of the aircraft panels of this aircraft family, in order to understand the variants that influence the drilling and fastening process, thus allowing the root cause behind of errors in *pen marking* tests.

## Keywords

Embraer, E-Jets E2, Riveting Machine, Electroimpact, Gemcor, Automation, *Pen marking*, VBA.



# Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	ix
Índice .....	xi
Lista de figuras .....	xv
Lista de tabelas .....	xix
Lista de Acrónimos.....	xxi
Capítulo 1: Introdução .....	1
1.1- Motivação .....	1
1.2- Objetivos.....	1
1.3- Estrutura da dissertação .....	2
Capítulo 2: Estado da Arte .....	5
2.1- Revisão Histórica .....	5
2.2- Revisão Teórica .....	8
2.2.1- Diferença entre automação e robótica .....	8
2.2.2- Leis fundamentais da robótica .....	8
2.2.3- Níveis de automação .....	9
2.2.4- Exemplos de aplicações de automação e robótica na indústria aeronáutica .....	10
2.2.4.1- Furação e cravação.....	10
2.2.4.2- Inspeção .....	11
2.2.4.3- Soldadura .....	12
2.2.4.4- Selagem e Pintura .....	12
2.2.4.5- Colocação de fibra .....	13
2.2.4.6- Transporte e armazenamento de cargas pesadas.....	14
2.2.4.7- Maquinação através de CNC .....	15
2.2.5- Constrangimentos inerentes à automação na fabricação de aeronaves .....	15

2.3-	Contextualização do problema.....	19
2.3.1-	Cadeia de abastecimento na indústria aeronáutica .....	19
2.3.2-	Estado da arte Embraer S.A. ....	20
2.3.2.1-	Breve história .....	20
2.3.2.2-	Embraer Portugal S.A. ....	22
2.3.3-	Parceria Embraer Portugal S.A. ....	23
2.3.4-	Programa E-Jets E2.....	24
Capítulo 3: Fabricação e montagem das aeronaves E-Jets E2 na Embraer Metálicos S.A.....		27
3.1-	Materiais utilizados nos painéis da asa .....	27
3.2-	Fabricação primária dos painéis .....	28
3.2.1-	Maquinação em CNC da matéria-prima.....	28
3.2.2-	Ajustagem .....	29
3.2.3-	Tratamentos de Superfície.....	30
3.2.4-	Inspeção por Líquidos Penetrantes .....	31
3.2.5-	Granalhagem .....	33
3.2.6-	Medição Tridimensional .....	33
3.3-	Montagem dos componentes da asa.....	34
3.3.1-	Componentes da asa .....	35
3.3.2-	Ferramental .....	36
3.3.3-	Linha de Montagem .....	39
3.3.4-	Furação e Cravação .....	40
3.3.4.1-	Tipos de fixadores.....	43
3.3.5-	Selagem .....	46
3.3.6-	Especificações rebitadoras inseridas nas linhas de montagem.....	48
3.3.6.1-	Rebitadora Gemcor .....	49
3.3.6.1.1-	Descrição geral da máquina .....	50
3.3.6.1.2-	Ferramentas de processo .....	51
3.3.6.2-	Rebitadora Electroimpact.....	56
3.3.6.2.1-	Descrição geral da máquina .....	56
3.3.6.2.2-	Ferramentas de processo .....	59
3.3.6.3-	Principais diferenças.....	65

3.3.6.4- Operações efetuadas nas rebitoras.....	65
Capítulo 4: Caso de estudo: testes de <i>pen marking</i> .....	69
4.1- Diagrama de causa efeito (Ishikawa).....	69
4.2- Testes de <i>pen marking</i> e sua validação manual.....	72
4.3- Conceito.....	74
4.4- Algoritmo.....	75
Capítulo 5: Resultados .....	81
5.1- Resultados obtidos .....	81
5.2- Verificação dos resultados obtidos .....	86
Capítulo 6: Conclusões .....	89
6.1- Conclusões .....	89
6.2- Trabalhos futuros .....	91
Bibliografia.....	93
Anexo A- Dados Técnicos Máquina Gemcor.....	97
Anexo B- Dados Técnicos Máquina Electroimpact.....	98
Anexo C- Norma NE 03-071 - Detalhes de maquinação de metais - Tolerância da linha de centro do furo .....	99
Anexo D- Norma NE 03-006- Tolerância das distâncias de passo e borda.....	100
Anexo E- Normas Embraer de montagem de fixadores - Seleção da pega .....	101
Anexo F- Algoritmo de validação dos testes de <i>pen marking</i> .....	102



# Lista de figuras

Figura 1- Revoluções industriais e suas palavras-chave.....	7
Figura 2- Robô de furação integrado nas instalações da Embraer Metálicos S.A. ....	10
Figura 3- Configuração de um equipamento LASER para realização de testes de ultrassons ..	11
Figura 4- Robô de soldadura por arco modelo ARC Mate 100iC/12 da Fanuc .....	12
Figura 5- Robô de pintura modelo Paint Mate 200iA da Fanuc .....	13
Figura 6- Máquina de colocação automática de fibra, modelo TORRESFIBERLAYUP da MTORRES .....	13
Figura 7- Automated Guided Vehicle utilizado na Embraer Metálicos S.A. para transporte de cargas pesadas .....	14
Figura 8- CNC de 20 m integrada nas instalações da Embraer Metálicos S.A. ....	15
Figura 9- Ilustração dos conceitos de precisão e repetibilidade .....	18
Figura 10- Três níveis da cadeia de abastecimento da indústria aeronáutica .....	19
Figura 11- Mapa de localização de unidades Embraer.....	21
Figura 12- Instalações Embraer Portugal S.A. ....	22
Figura 13- Planta da Embraer Metálicos S.A. ....	23
Figura 14- Aeronave E190-E2 .....	25
Figura 15- Peça a ser maquinada no interior da fresadora CNC .....	29
Figura 16- Ecrã da máquina CNC para visualizar o seu interior.....	29
Figura 17- Exemplo de uma descontinuidade encontrada num painel na Embraer Metálicos S.A. ....	32
Figura 18- Após avaliação, foi reportada a descontinuidade.....	33
Figura 19- Máquina de medição por coordenadas modelo Crysta-Apex S da Mitutoyo .....	34
Figura 20- Pormenor do revestimento do extradorso com os <i>stringers</i> e junta de tração da aeronave E195-E2.....	36
Figura 21- Revestimento do intradorso com os <i>stringers</i> da aeronave E195-E2 .....	36
Figura 22- Parte traseira do gabarito de montagem.....	40
Figura 23- Parte frontal do gabarito de montagem.....	40
Figura 24- Ilustração do caso em que a distância do passo é inferior à especificada .....	41
Figura 25- Ilustração do caso em que a distância do passo é superior à especificada .....	42
Figura 26- Ilustração de carga estática .....	42
Figura 27- Ilustração de carga cíclica .....	43
Figura 28- Ilustração rebite sólido .....	44
Figura 29- Ilustração rebite <i>briles</i> .....	44
Figura 30- Ilustração da instalação de pinos <i>Hi-Lok</i> ™ .....	45
Figura 31- Ilustração da selagem aerodinâmica .....	47
Figura 32- Ilustração da selagem da cabeça do fixador.....	47

Figura 33- Ilustração da selagem de interface entre superfícies.....	48
Figura 34- Ilustração da selagem de <i>filete</i> .....	48
Figura 35- Ilustração rebitoradora Gemcor .....	49
Figura 36- Ilustração dos eixos da máquina Gemcor .....	51
Figura 37- Ilustração dos sensores de normalidade da máquina da Gemcor .....	53
Figura 38- Ilustração do tracer da máquina da Gemcor .....	54
Figura 39- Principais componentes da máquina.....	54
Figura 40- Principais componentes da máquina.....	55
Figura 41- Principais componentes da máquina.....	55
Figura 42- Sistema E6390 da Electroimpact.....	56
Figura 43- Eixos principais da máquina Electroimpact.....	57
Figura 44- <i>V-Side Anvil</i> e <i>U-Side Anvil</i> a efetuar a força de <i>clamp</i> sobre o revestimento.....	58
Figura 45- Eixo C da máquina no <i>V-Anvil</i> .....	59
Figura 46- Ilustração da localização das duas brocas de furação e sua nomenclatura .....	59
Figura 47- Ilustração de uma das brocas de furação .....	60
Figura 48- <i>U-driver</i> .....	60
Figura 49- Injetor de fixadores.....	61
Figura 50- Aplicador de selante .....	61
Figura 51- Resync Camera.....	62
Figura 52- Imagem obtida através da <i>Resync Camera</i> .....	62
Figura 53- <i>Hole Probe</i> .....	62
Figura 54- Collar Anvil .....	63
Figura 55- <i>Rivet anvil</i> .....	64
Figura 56- <i>Tracers</i> .....	64
Figura 57- Ilustração da distância alcançada pelos <i>tracers</i> .....	65
Figura 58- Diagrama de causa efeito (Ishikawa) para garantir o processo de furação da rebitoradora.....	70
Figura 59- Validação com recurso a paquímetro .....	72
Figura 60- Exemplo das condições pouco ergonómicas da validação manual.....	73
Figura 61- Exemplo de condições pouco ergonómicas .....	74
Figura 62- Validação do pen marking com auxílio do cronaflex .....	74
Figura 63- Dados necessários para efetuar todos os cálculos .....	76
Figura 64- Tolerância de posicionamento do <i>tack</i> .....	77
Figura 65- Diferença entre o passo real e programado visível no cronaflex .....	78
Figura 66- Gráfico obtido através do algoritmo .....	81
Figura 67- Identificação das coordenadas dos pontos no gráfico .....	82
Figura 68- Separadores Excel .....	82
Figura 69- Caso 1: Todos os pontos se encontram dentro dos requisitos.....	83
Figura 70- Caso 2: Falha na tolerância do passo e bordas.....	83
Figura 71- Caso 2: Falha de todos os requisitos .....	84

Figura 72- Exemplo de zona de difícil acesso na máquina da Gemcor .....	84
Figura 73- Exemplo de zona onde não é possível efetuar furação e cravação identificado com a fita vermelha .....	84
Figura 74- Caso 3: Falha na tolerância da borda em Y .....	85
Figura 75- Caso 4: Falha no posicionamento do <i>tack</i> e borda em X .....	85
Figura 76- Localização do <i>tack</i> e respectiva linha de furação do caso 4.....	87



# Lista de tabelas

Tabela 1- Especificações aeronaves E-Jets E2 .....	24
--	----



# Lista de Acrónimos

AFP	Automated Fiber Placement
AGV	Automated Guided Vehicle
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Machining/Manufacturing
CDP	Corpo De Prova
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CMM	Coordinate Measuring Machines
CNC	Computer Numerical Control
CPU	Central Process Unit
IADS	International Alloy Designation System
ISR	Intelligence, Surveillance & Reconnaissance
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission Radiation
LASP	Limpeza Após Shot Peening
MACRO	Macroinstrução
MCU	Machine Control Unit
NC	Numerical Control
OEM	Original Equipment Manufacturer
PLC	Programmable Logic Controller
PMAC	Programmable Multi Axis Controller
TSA	Tartaric Sulphuric Anodizing
UV	Ultra-Violeta
VBA	Visual Basic for Applications



# Capítulo 1: Introdução

Este capítulo tem como objetivo introduzir o tema desta dissertação, bem como a sua estrutura e objetivos. É ainda apresentada a motivação que permitiu a elaboração da mesma.

## 1.1- Motivação

Os processos de fabricação de aeronaves, especialmente operações de montagem, têm sido feitos manualmente [1]. Isto acontece devido ao facto de a indústria aeroespacial ser bastante conservadora. As empresas têm preferência por métodos de montagem bem-sucedidos, cujo funcionamento já foi comprovado no passado [2].

No entanto, o mercado aeronáutico está a crescer. De facto, a Embraer prevê uma procura de 6,4 mil jatos comerciais no segmento de 70 a 130 assentos ao longo dos próximos 20 anos, no valor estimado de US\$ 300 mil milhões [3].

De forma a assegurar que essa procura é atingida, a indústria aeronáutica está a implementar novos processos de automação na fabricação de componentes e operações de montagem [4], de modo a reduzir pedidos em atraso, aumentar a produtividade, reduzir custos de produção, trazer flexibilidade, melhorar a qualidade, além de tirar pessoas de trabalhos perigosos e repetitivos e torná-las em operadores de máquinas, em vez de operadores de trabalhos manuais [5].

## 1.2- Objetivos

A presente dissertação, desenvolvida na Embraer Metálicos S.A., tem como principais objetivos:

- Estudar exemplos de automação aplicados na indústria aeronáutica;
- Acompanhar os processos de fabricação e montagem dos painéis das asas da família E-Jets E2 da Embraer, compreendendo os métodos e técnicas utilizados;
- Elaborar um caso de estudo prático que consiste na abordagem da aplicação de um sistema de automação na indústria aeronáutica. O seu principal objetivo é desenvolver um algoritmo recorrendo ao software Visual Basic for Applications® (VBA), através das coordenadas disponíveis em Excel® nos dados da máquina, de forma a efetuar a validação dos testes de *pen marking*;

-Estudar e elaborar um resumo do funcionamento e constituintes das rebitadoras sobre as quais o caso de estudo incide.

O cumprimento de todos estes objetivos irá permitir à Embraer Metálicos S.A. ficar com um pequeno manual em português do modelo da Gemcor, que ainda se encontra em integração na empresa, pelo que este tipo de dados ainda não foi disponibilizado. Este manual poderá ser facilmente consultado, permitindo uma compreensão geral do seu funcionamento e constituintes.

Para além disso, irá também permitir o acesso a uma ferramenta que irá reduzir tempos de espera na linha de montagem, evitando que os revestimentos fiquem parados para a validação manual dos testes de *pen marking*, conseguindo assim aumentar a produtividade nesta linha.

### **1.3- Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos.

No presente capítulo foram apresentados os objetivos deste trabalho. É também apresentada a motivação para a elaboração do mesmo, bem como a sua estrutura.

No 2º capítulo é apresentado o estado da arte, com o propósito de introduzir teoricamente vários aspetos relevantes que irão ser abordados ao longo da dissertação, de forma a permitir uma melhor compreensão da mesma. Estes aspetos são também considerados como pontos de partida para o início deste trabalho, dando o conhecimento teórico necessário para a compreensão do caso de estudo prático. É também apresentada uma contextualização do problema, onde é feita uma breve introdução à Embraer, empresa onde foi permitido à autora realizar um estágio de seis meses, com o intuito de melhor obter conhecimentos teóricos e elaboração de um caso de estudo prático numa das maiores empresas da indústria aeronáutica.

No 3º capítulo são apresentados os processos de fabrico e montagem que os painéis das aeronaves E-Jets E2 sofrem, desde a sua chegada como material bruto à empresa, até ao momento em que chegam à rebitadora, de forma a se adquirirem as bases para uma melhor compreensão do capítulo seguinte.

No 4º capítulo é apresentado o caso de estudo prático elaborado na empresa Embraer Portugal S.A., que consiste num algoritmo para validação de *pen marking* dos painéis.

Os resultados deste caso de estudo são em seguida explicados no 5º capítulo. É também feita uma confirmação dos resultados obtidos através do algoritmo, com a verificação manual de cada um dos casos.

Por último, são apresentadas no 6º capítulo as conclusões, onde estão também apontados os problemas que foram surgindo no decorrer deste trabalho. São também propostos trabalhos que poderão ser elaborados no futuro, dando um seguimento a este trabalho.



# Capítulo 2: Estado da Arte

Um dos objetivos do presente capítulo é rever historicamente o aparecimento da automação e registar a sua evolução ao longo dos anos. Pretende-se também introduzir todos os conceitos teóricos que são pertinentes no decorrer desta dissertação, tornando mais fácil a compreensão do conteúdo da mesma. Por último, é apresentada uma contextualização do problema, sendo explicado ao leitor como surgiu a oportunidade para a elaboração deste trabalho.

## 2.1- Revisão Histórica

A palavra automação está associada ao controlo automático, cujo objetivo é o de simplificar ou até mesmo substituir o trabalho do homem, trocando a força humana por mecanismos. Pode-se então afirmar que os seus primórdios tiveram origem na época de 3500 a.C. com a invenção da roda [6].

Em meados do século XVIII, começou em Inglaterra a primeira revolução industrial, que posteriormente se expandiu pelo resto da Europa, América e Ásia. Desta revolução surgiu a máquina a vapor, que funcionou como uma fonte de energia eficiente para movimentar as pesadas máquinas existentes na indústria têxtil, permitindo um aumento da produtividade e da qualidade e uma redução dos custos de produção [7].

A descoberta da sincronia de funcionamento entre a eletricidade e o eletromagnetismo permitiu, em meados do século XIX, o desenvolvimento do relé eletromecânico, que consiste num interruptor, servindo para ligar ou desligar dispositivos. Isto acontece quando ocorre a sua movimentação física onde a corrente elétrica percorre a bobine, criando um campo eletromagnético, que por sua vez atrai a alavanca responsável pela mudança de posição dos contactos [8].

Em 1909, Henry Ford (1863-1947) idealizou a Linha de Montagem, que contribuiu para o início da segunda revolução industrial, dando assim origem a novos conceitos como a produção em massa, estações de montagem (onde os operadores se especializavam nas tarefas inerentes a cada estação) e *stocks* intermediários [7].

Aliando a ideia de Henry Ford com a descoberta do relé eletromecânico, foram desenvolvidas máquinas automatizadas por relés, que permitiam efetuar pontos de montagem, capacitando as indústrias para uma produção em massa.

No entanto, a programação destas máquinas era extremamente complexa, pois eram constituídas por centenas de dispositivos, o que requeria muita energia e interconetividade.

Um outro problema era a vida útil limitada dos relés. Então, posteriormente estes foram substituídos pelo Controlador Lógico Programável, PLC (do Inglês, *Programmable Logic Controller*), que tornava todo o sistema mais flexível, económico e eficiente [7]. De facto, com o PLC, era apenas necessário alterar a programação de forma a efetuar alterações, enquanto os relés implicavam alterar a montagem dos equipamentos e, muitas vezes, substituir os *hardwares* [9].

PLC consiste num dispositivo digital que permite controlar o processo de uma fábrica graças a uma memória programável que reúne as instruções que devem ser repassadas para as máquinas responsáveis pela produção industrial [9]. Mais concretamente, uma unidade central de processamento recebe informações através de uma unidade de entrada de dados, processa estas informações segundo as especificações de um programa armazenado numa unidade de memória e devolve os resultados através de uma unidade de saída. Os sistemas de entrada e saída são conectados fisicamente nos dispositivos de campo (interruptores, sensores, etc.).

Os programas são normalmente realizados numa linguagem própria e são colocados na memória da Unidade Central de Processamento, CPU (do inglês, *Central Process Unit*) em forma de operações. Finalmente, baseado no programa, o PLC escreve ou atualiza as saídas atuando nos dispositivos de campo. Este processo continua na mesma sequência sem interrupções, ou mudanças. As mudanças são realizadas apenas através de alterações efetuadas nos comandos do programa [7].

As principais diferenças que se verificam na evolução do PLC ao longo dos anos, são a diminuição do seu tamanho, capacidade de desempenhar um maior número de funções e maior capacidade de processamento dos dados [9].

Paralelamente foram desenvolvidas as máquinas de montagem hidráulica e as máquinas de torneamento e fresagem numericamente controladas, também chamadas de máquinas NC, na década de 1950. A primeira máquina NC avançada foi apresentada no MIT em Boston em 1951 [10].

Controlo numérico (NC) consiste num método que permite o controlo dos movimentos de máquinas, posicionando a ferramenta no local pretendido. Isto acontece através da interpretação direta de instruções codificadas, gerando depois o sinal de saída que controla os componentes da máquina [11].

Nesse sentido, a máquina NC foi um avanço técnico e, a partir daí, foi possível trabalhar com projetos mais avançados. Com o início da terceira revolução industrial veio o aparecimento e desenvolvimento dos computadores, que por sua vez contribuíram para o desenvolvimento do CNC, do inglês *Computer Numerical Control* que significa Controlo Numérico Computorizado, cujas características são explicadas mais à frente nesta dissertação [10]. O seu aparecimento trouxe vantagens como o aumento da flexibilidade, precisão e versatilidade no que diz respeito ao controlo do movimento de máquinas [11].

A partir dos conhecimentos aplicados no CNC, foi possível criar máquinas que contribuíssem com um feedback, isto é, com capacidade para se adaptar ao programa, medindo, rastreando e corrigindo as suas operações, garantindo assim a saída desejada.

Assim, em 1961 foi instalado o primeiro robô para executar funções num ambiente industrial, nas instalações da General Motors [12], impulsionando o aparecimento da terceira revolução industrial, onde foram desenvolvidas técnicas de eletrónica e de tecnologia de informação para automação dos processos de produção [13] .

A partir de 1990, houve um incremento de princípios mecânicos, elétricos e eletrónicos para a inteligência artificial no contexto de fábrica, dando assim origem à quarta revolução industrial. Esta revolução onde agora nos encontramos consiste na interconectividade, onde se pretende que uma fábrica tenha os seus sistemas conectados entre si, tornando-se numa fábrica inteligente. Nesta, os meios físico e virtual fundem-se, conectando sistemas físicos complexos com o mundo digital, permitindo assim um melhor desempenho e eficiência. Isso é conseguido principalmente através da utilização da internet, onde os dados são armazenados e a informação é partilhada [13].

Estas quatro revoluções podem ser resumidas através das palavras-chave apresentadas na figura 1, em que a principal característica referente à primeira revolução diz respeito à mecanização, a da segunda é a produção em massa, da terceira é a automação e, por fim, da quarta é a interconectividade, pelos motivos acima referidos.

Concluindo, a automação tem vindo a evoluir ao longo dos anos, fazendo a ligação entre conhecimentos antigos e as novas conquistas tecnológicas, sendo que a sua evolução nunca terá um término, já que todos os dias surgem novas ideias e novas tecnologias, que podem ser implementadas, de forma a aumentar a produtividade, qualidade e segurança dos processos de produção das mais variadas indústrias, onde se inclui a aeronáutica.



Figura 1- Revoluções industriais e suas palavras-chave [43]

## 2.2- Revisão Teórica

### 2.2.1- Diferença entre automação e robótica

Os termos automação e robótica podem ser facilmente confundidos, principalmente porque há cruzamentos entre os dois. Robôs são utilizados para automatizar algumas tarefas físicas, tal como na fabricação de aeronaves. No entanto, vários tipos de automação nada têm a ver com robôs físicos.

De facto, a principal diferença pode ser vista nas suas definições.

Automação significa utilizar um *software* de computador, máquinas ou outras tecnologias, de forma a realizar uma tarefa que poderia ser feita por um humano. Automação industrial refere-se ao controlo físico de processos e envolve a utilização de máquinas físicas e sistemas de controlo para automatizar tarefas num processo industrial, como acontece por exemplo nas máquinas de CNC, que são bastante comuns na fabricação de componentes aeronáuticos [14].

Robô é um mecanismo programável em dois ou mais eixos, com um determinado grau de autonomia, movimentando-se no seu ambiente, de forma a realizar as tarefas pretendidas [15].

Já robótica é considerada como um ramo da engenharia que incorpora múltiplas disciplinas para projetar, fabricar, programar e aplicar robôs [14],[15].

Num meio industrial, pode então considerar-se que a robótica é um sistema de aplicação da automação nos processos industriais, uma vez que os robôs podem efetuar tarefas como pintar, soldar, furar, cravar, inspecionar, etc., sendo os seus eixos controlados simultaneamente através de um computador, criando assim uma sequência detalhada de todos os movimentos [16].

### 2.2.2- Leis fundamentais da robótica

As leis da robótica foram definidas por Isaac Asimov, um professor de bioquímica e escritor de ficção científica e são elas [17]:

- 1-Um robô não deve ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra danos;
- 2-Um robô deve obedecer às ordens dadas pelo ser humano, exceto quando essas ordens entram em conflito com a primeira lei;

3-Um robô deve proteger a sua própria existência sempre que esta proteção não entre em conflito com as leis anteriores.

Resumindo estas leis num único princípio, pode ser escrito “Pessoas antes dos robôs” e este mesmo princípio poderia ser dividido em duas componentes que devem ser respeitadas por aqueles que trabalham com robótica:

1-Células robotizadas devem ser seguras para os humanos;

2-Robôs devem ser ferramentas que podem ser usadas por todos.

### 2.2.3- Níveis de automação

A automação pode dividir-se em vários níveis, como por exemplo [18]:

-Completamente manual (*Fully Manual*), em que uma pessoa é totalmente responsável por executar toda a função, com o possível auxílio de ferramentas manuais simples, como acontece por exemplo na ação de apertar parafusos;

-Supervisão (*Supervisory*), em que uma pessoa é responsável por executar tarefas de alto nível, enquanto o computador ou uma máquina controla tarefas de baixo nível, como por exemplo definir a uma temperatura constante na cura de um compósito;

-Alocação flexível (*Flexible Allocation*), em que tanto as pessoas como as máquinas podem executar uma função, tendo de ser estabelecido quem fica encarregue para executar cada ação, como acontece por exemplo no piloto automático em operações de voo e numa máquina de furação e cravação, por exemplo quando há erros de programação, o operador tem de intervir de forma a evitar problemas que danifiquem o produto. Resumidamente, pode ser alterado entre completamente manual e completamente automático. Pode também acontecer quando os sensores falham, quando se efetua a calibração do sistema e na formação de operadores;

-Completamente automático (*Fully Automatic*), em que uma máquina, geralmente com um computador embutido, executa toda a função previamente programada, como acontece por exemplo na maquinação de material através de uma máquina CNC.

Cada um destes níveis é apropriado para cada função em cada sistema, não havendo por isso uma estratificação.

## 2.2.4- Exemplos de aplicações de automação e robótica na indústria aeronáutica

### 2.2.4.1- Furação e cravação

Os processos de furação e cravação são considerados como a maior área de aplicação da automação na indústria aeronáutica. Isto acontece devido ao facto de a furação manual de milhares de furos necessitar de gabaritos complexos e, por vezes, de grandes dimensões, bem como ferramentas potentes capazes de realizar a furação em materiais titânio e alumínio. Um outro entrave que se coloca é o facto de este se tratar de um trabalho muito repetitivo e cansativo para os operadores, que poderá acarretar problemas de saúde aos mesmos [2].

Então, através da automação, a máquina utiliza um sistema previamente programado para fazer os furos e cravar os fixadores nos locais desejados, permitindo uma poupança de tempo, aumentando assim a produtividade e ainda retirar os operadores desse tipo de trabalhos.

De facto, há várias formas de efetuar furação e cravação de forma automática. Por exemplo, nas instalações da Embraer S.A. estas operações são efetuadas através de robôs, como o apresentado na figura 2, e através de máquinas rebitoras, como as utilizadas no caso de estudo desta dissertação, cujo funcionamento e especificações são a seguir explicados.



Figura 2- Robô de furação integrado nas instalações da Embraer Metálicos S.A. [32]

#### 2.2.4.2- Inspeção

O processo de inspeção na fabricação de qualquer componente aeronáutico é bastante exigente, uma vez que as tolerâncias associadas são apertadas e os pedidos de inspeções das empresas são bastante elevados. Diversos procedimentos de inspeções podem ser realizados por máquinas automatizadas [2].

Em alguns casos, a própria máquina é equipada com um *laser scanner* e/ou sondas de medição. Em primeiro lugar pode ser verificado o diâmetro e profundidade do furo após a sua furação através de uma sonda, que primeiro é calibrada num anel de calibração. Esta inspeção tem lugar conforme definido pela Engenharia de Qualidade e programado na máquina, mas por norma efetuam-se medições numa primeira amostra de furos e depois é escolhido um intervalo de medição, por exemplo, de 10 em 10 furos. É ainda possível, através de um *laser scanner* medir a qualidade do escareado e as características da superfície em detalhe.

Ensaio não destrutivo são feitos com o intuito de avaliar as propriedades dos materiais e inspecionar a formação de fissuras (na superfície e internas) durante os processos de fabricação e montagem. Para tal são utilizados vários métodos, como é o caso de testes por ultrassons, como o representado na figura 3, por raios-x e inspeção através de vídeo. Neste momento, são projetados métodos de automação para desenvolver essas funções, de forma a proporcionar uma inspeção mais fácil, precisa e eficiente de grandes estruturas, que por vezes apresentam um acesso difícil e limitado aos operadores, retirando-os assim de trabalhos potencialmente perigosos e pouco ergonómicos [6], [19].



Figura 3- Configuração de um equipamento LASER para realização de testes de ultrassons [5]

### 2.2.4.3- Soldadura

Embora a popularidade dos materiais compósitos nas aeronaves tenha vindo a aumentar, as estruturas metálicas ainda têm lugar em muitas aplicações na indústria aeronáutica. Para a montagem de algumas partes metálicas, tal como as turbinas, torna-se necessário soldar. No entanto, esta soldadura precisa de ser elaborada com elevada precisão. Quando são utilizados materiais como Titânio e Ligas de Níquel, em motores, os robôs industriais são uma opção viável para realizar soldas efetivas e precisas, uma vez que estas máquinas apresentam vantagens como a repetibilidade, rigidez e alcance de tolerâncias apertadas, que são requisitos obrigatórios nesta indústria [2]. Um exemplo de robô utilizado neste processo está representado na figura 4.



Figura 4- Robô de soldadura por arco modelo ARC Mate 100iC/12 da Fanuc [45]

### 2.2.4.4- Selagem e Pintura

Tarefas como pintar ou aplicar selante em grandes componentes como fuselagens ou peças integrantes da estrutura da aeronave são difíceis para um operador efetuar manualmente, devido ao tamanho das peças. Esta é uma das principais razões para utilizar robôs neste tipo de tarefas [2].

Um outro motivo que torna a utilização de robôs bastante viável neste tipo de operações é o facto de atingir uma maior precisão. É importante aplicar apenas a quantidade necessária de tinta ou selante, uma vez que em excesso fará aumentar o peso total da aeronave, que se irá tornar uma desvantagem. Então, através de robôs, a quantidade aplicada será controlada,

sendo apenas aplicada a quantidade necessária. Já o operador aplicando manualmente a tinta ou o selante, não conseguirá medir a quantidade com tanta facilidade, acabando por colocar tinta ou selante em excesso ou até em quantidades insuficientes. Um exemplo de robô utilizado para estas tarefas está representado na figura 5.



Figura 5- Robô de pintura modelo Paint Mate 200iA da Fanuc [46]

#### 2.2.4.5- Colocação de fibra

Este processo utiliza robótica guiada por computadores para colocar uma ou várias camadas de fibras de carbono num molde, de forma a criar uma estrutura em compósito.

O processo de colocação automática de fibras tem de ser conseguido através da combinação de tecnologias de um sistema robótico articulado preciso com uma cabeça de um AFP (do inglês, *Automated Fiber Placement*). Esta combinação de tecnologias resulta num sistema que tem alta precisão na trajetória e flexibilidade do processo a um custo mais baixo do que máquinas tradicionais de colocação de fibras. Um exemplo de uma máquina de colocação de fibras automática está representado na figura 6.



Figura 6- Máquina de colocação automática de fibra, modelo TORRESFIBERLAYUP da MTORRES [47]

#### 2.2.4.6- Transporte e armazenamento de cargas pesadas

Carregar e armazenar componentes grandes e pesados ao longo das fábricas é algo que deve ser evitado pelo ser humano e que deve ser feito em segurança.

Através de sistemas de armazenamento automático, controlados remotamente a partir de computadores, como as estantes apresentadas na figura 7, o armazenamento de *stock* é muito mais fácil. Este sistema de armazenamento pode trabalhar em sinergia com sistemas de transporte de carga automáticos, sendo todo o processo controlado de forma exata, evitando assim quaisquer problemas e danos [6].

Com veículos automaticamente guiados (AGV, do inglês *Automated Guided Vehicles*) e robôs móveis, pode ser reduzido o tempo perdido nas movimentações através de pontes ou guias, para além de retirar o ser humano de trabalhos perigosos e pouco ergonómicos [4].

Um robô móvel é um dispositivo que consegue movimentar-se de forma autónoma de um lugar para outro, de forma a alcançar um conjunto de objetivos. No entanto, não necessita de nenhuma infra-estrutura, uma vez que todo o planeamento do sensor e da trajetória é feito a bordo pelo robô. É capaz de contornar obstáculos e é bastante flexível, uma vez que remapeia e adiciona novos destinos com facilidade.

Um veículo automaticamente guiado (AGV), como o exemplificado na figura 7, é guiado através de sistemas de orientação, tais como marcas ou fios elétricos no chão, visão artificial, sistema magnético ou lasers [21]. Contudo, quando há obstáculos um AGV pára. De facto, não é tão flexível, uma vez que é susceptível a alterações no ambiente em que está inserido e em alguns casos terão de ser instaladas novas infra-estruturas, de forma a criar rotas.



Figura 7- Automated Guided Vehicle utilizado na Embraer Metálicos S.A. para transporte de cargas pesadas [32]

#### 2.2.4.7- Maquinação através de CNC

A operação eficiente de máquinas-ferramentas convencionais, como tornos, fresadoras e engenhos de furar, depende da habilidade e do treino do operador. Também se consome muito tempo na configuração da peça de trabalho, configuração da ferramenta e controlo dos parâmetros do processo (alimentação, velocidade e profundidade de corte). Assim, a maquinação convencional é lenta e dispendiosa para enfrentar os desafios de alterar frequentemente a forma e o tamanho do produto / peça [22].

Máquinas-ferramentas controladas através de CNC são agora amplamente utilizadas na indústria aeronáutica. De facto, o CNC permite operar uma máquina-ferramenta através de instruções codificadas que a unidade de controlo da máquina (MCU, do inglês *Machine Control Unit*) pode entender. Essas instruções são convertidas em impulsos de corrente elétrica que os motores e controlos da máquina seguem para realizar operações de maquinação numa peça de trabalho [23].

A programação deste sistema é feita através de ferramentas CAD (do inglês, *Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e pode ser feita remotamente. Desta forma torna-se possível simular o programa antes deste ser efectuado pela máquina, para verificar e corrigir eventuais problemas que possam surgir no processo [11].

Resumindo, o CNC guia automaticamente os movimentos axiais das máquinas-ferramentas com a ajuda de computadores [23]. Um exemplo de utilização deste tipo de máquinas nas instalações da Embraer Metálicos S.A. está representado na figura 8.



Figura 8-Fresadora CNC de 20 m integrada nas instalações da Embraer Metálicos S.A. [32]

#### 2.2.5- Constrangimentos inerentes à automação na fabricação de aeronaves

Montagem de aeronaves é um trabalho considerado artesanal, no entanto muitos progressos foram feitos nos últimos anos, com aplicações como as indicadas acima. No entanto, há também

aspectos negativos, que impedem a implementação de automação e robótica. Entre eles, podemos referir [24]:

1-Conservadorismo. A indústria aeronáutica é possivelmente a indústria mais conservadora, uma vez que a segurança é um requisito essencial. Então, os engenheiros e projetistas têm preferência em utilizar *designs*, processos, componentes e sistemas cujo funcionamento já foi provado no passado.

2-Regulamentação governamental. A aeronave e os seus sistemas são rigorosamente regulamentados e certificados. Mudar qualquer componente de uma aeronave envolve muito tempo e custos elevados, uma vez que as pessoas responsáveis pela regulamentação aeronáutica não são muito aptas a mudanças, já que de cada vez que algum componente que foi alterado é aceite, é o seu próprio nome que está em jogo.

3-*Design* para fabricação. Devido aos dois fatores acima referidos, projetos para novas aeronaves tendem a ser extensões ou modificações de projetos antigos, adaptados para uma nova aplicação. Consequentemente, eles não são projetados com vista à automação do processo de produção.

4-Questões de escala. As aeronaves abrangem um conjunto de escalas muito grande, ou seja, a montagem de componentes requer precisão a uma escala muito reduzida, numa montagem de centenas de metros de comprimento. Esta realidade dá muito relevo ao desempenho de ferramentas automatizadas, em que a principal preocupação é manter a precisão localmente. De facto, a precisão local destas máquinas é 10-15 vezes menor que a repetibilidade, o que significa que o desafio de automatizar uma aplicação aeroespacial é muito grande. No entanto, soluções estão a ser desenvolvidas de forma a alterar esta realidade.

5-Investimento inicial. Integrar um novo sistema de automação numa empresa é um processo que requer um investimento inicial muito elevado. Então, este torna-se num grande constrangimento.

Podem ainda ser apontadas algumas desvantagens no que toca à implementação da automação a uma empresa, como por exemplo [25]:

-Inflexibilidade. Um robô ou máquina automatizada é desenvolvida para realizar apenas uma função. Ora, tudo que sejam funções diferentes, a máquina não conseguirá concretizar. Quando comparamos com o ser humano, este é muito mais flexível pois apresenta uma maior capacidade de adaptação;

-Torna-se rapidamente obsoleto. Este é um problema de todas as tecnologias em geral, pois em pouco tempo surgem novos modelos, com capacidades e funcionalidades diferentes;

-Difícil operação. Estas são máquinas muito complexas, que requerem pessoas qualificadas para as conseguirem programar e operar;

-Espaço. Uma máquina automatizada requer muito espaço para ser colocada, o que se torna um inconveniente pois muitas empresas não têm o espaço necessário para a implementação da mesma;

-Erro humano. Por exemplo, quando o programador comete algum erro acidentalmente, isso poderá resultar em danos irreparáveis no produto;

-Problemas Técnicos, que decorrem da utilização de grandes máquinas utilizadas para trabalhar peças de grande volume com a elevada precisão posicional e são devidos principalmente a [26]:

-Temperatura ambiente;

-Desalinhamento dos eixos;

-Não linearidade dos eixos;

-Não retangularidade dos eixos.

De forma a prevenir estes problemas, as soluções mais adotadas são as de controlar este ambiente e efetuar manutenções com frequência, de forma a calibrar as máquinas, por exemplo. No entanto, estas são soluções que requerem custos iniciais e recorrentes, bem como tempos de inatividade significativos, não havendo assim produtividade nesses tempos mortos [26].

Porém, são vastas as vantagens em automatizar um processo, que tornam esta solução muito apelativa, entre elas [26,27,28]:

-Boa repetibilidade, permitindo realizar uma mesma tarefa várias vezes, obtendo sempre resultados muito semelhantes;

-Maior eficiência de produção, sendo até possível trabalhar de forma ininterrupta, eliminando assim tempos mortos e aumentando assim os lucros efetivos;

-Remover pessoas de ambientes e tarefas perigosas e pouco ergonómicas, aumentando assim a segurança;

-Acesso a lugares inacessíveis ao ser humano.

É ainda importante distinguir dois aspetos fundamentais que servem de constrangimentos relativamente à posição, que já foram abordados anteriormente [28]:

Repetibilidade: proximidade de concordância entre as posições alcançadas pela máquina para a mesma posição controlada, repetida várias vezes sob as mesmas condições. Traduz a

diferença de posição geralmente linear (poderá também ser angular), com que a máquina automatizada volta a recolocar-se num ponto visitado anteriormente.

Precisão: traduz a diferença entre uma posição realmente atingida e a posição desejada pela programação.

Estes dois aspetos encontram-se representados na figura 9 para uma melhor compreensão.

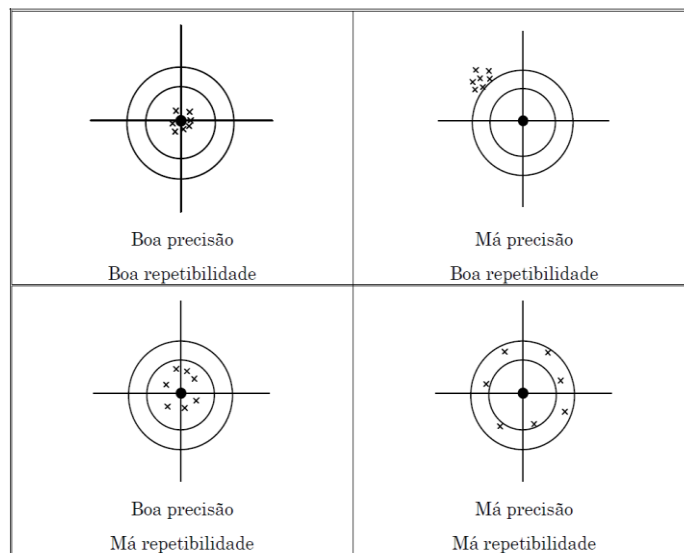


Figura 9- Ilustração dos conceitos de precisão e repetibilidade [28]

De facto, qualquer máquina automatizada, principalmente os robôs, possui uma boa repetibilidade, mas falha quanto à precisão. No entanto, várias soluções estão a ser estudadas e implementadas pelos fornecedores, de forma a combater este problema, que se coloca como um grande entrave à automação na indústria aeronáutica, tal como referido anteriormente.

Por exemplo a FANUC desenvolveu uma solução para os robôs, que consiste em colocar um codificador secundário, que gera sinais elétricos em função do deslocamento angular do seu eixo, apresentando as seguintes vantagens:

- Níveis ultra-elevados de precisão e repetibilidade;
- Melhor controlo da vibração;
- Redução da deflexão do robô;
- Compensação da flexão devido ao binário;
- Características de deteção ótica confiável.

## 2.3- Contextualização do problema

### 2.3.1- Cadeia de abastecimento na indústria aeronáutica

Existem atualmente vários modelos da cadeia de abastecimento na indústria aeronáutica, mas todos eles contêm o mesmo princípio, que consiste na estratificação e hierarquização dos vários tipos de empresas que atuam neste setor, tal como pode ser verificado na figura 10 [26].

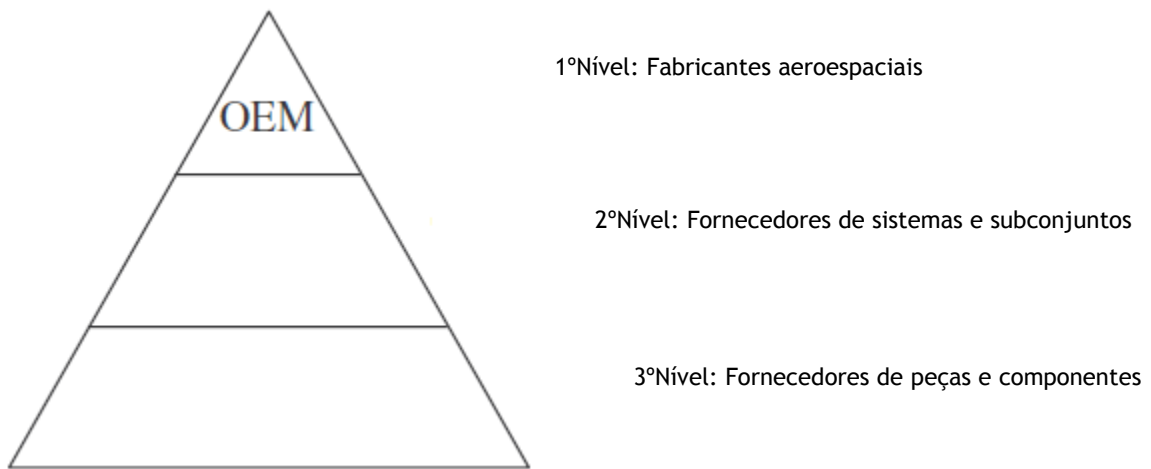


Figura 10- Três níveis da cadeia de abastecimento da indústria aeronáutica [26]

No topo da pirâmide encontram-se os OEMs (*Original Equipment Manufacturer*), como é o caso da Embraer, que tem como missão projetar aeronaves, explorar mercados e encomendar subconjuntos às empresas que se encontram no segundo nível. Neste segundo nível, são encontrados fabricantes de sistemas de propulsão, como é o caso da Pratt & Whitney, Honeywell, General Electric ou Rolls-Royce, bem como fabricantes de aviônicos, onde a Rockwell Collins [29] e a Honeywell são exemplos, fabricantes de estruturas de fuselagem e subconjuntos, tais como trens de aterragem, ailerons, etc. Já no terceiro nível, encontram-se fabricantes de peças e componentes que são montados por empresas dos níveis superiores. Este é um nível que se encontra muito disperso, com centenas de empresas competindo entre si.

## 2.3.2- Estado da arte Embraer S.A.

### 2.3.2.1- Breve história

Criada em 1969 com o apoio do governo brasileiro e privatizada em 1994, a Embraer é considerada como o terceiro maior fabricante de jatos comerciais do mundo e líder absoluto no segmento até 130 assentos, com cerca de 18.000 empregados e mais de 8.000 aeronaves entregues, transportando cerca de 145 milhões de passageiros por ano [30].

A Embraer começou a sua história com o Bandeirante, um turbo-hélice bimotor, destinado ao uso civil e militar, com capacidade para transportar entre 15 a 21 passageiros. Nos anos seguintes, muitos projetos foram desenvolvidos, apresentando hoje a seguinte oferta:

Aviação Comercial:

1-Família E-Jets E2 corresponde à nova geração da família E-Jets, cujas principais diferenças consistem em melhorias no sistema propulsivo, aviônicos, arquitetura e redução dos custos operacionais. Estão disponíveis os seguintes modelos: E195-E2; E190-E2; E175-E2.

2-Família E-Jets consiste em aeronaves de 70 a 130 lugares que enfatizam a alta eficiência, economia operacional superior e engenharia inovadora. Os modelos disponíveis são os seguintes: E195; E190; E175; E170.

3-Família ERJ 145 consiste em jatos de 37 a 50 lugares, que já transportaram mais de 700 milhões de passageiros, resultante da entrega de mais de 1000ERJs, distribuídos por cerca de 70 operadores. Estão também disponíveis os seguintes modelos: ERJ 145; ERJ 145 XR; ERJ 140; ERJ 135.

Aviação Executiva:

-Lineage 1000E é uma aeronave da categoria *ultra large*, com um alcance de voo até 4600mn.

-Legacy 650E é uma aeronave da categoria *large*, que oferece o menor custo operacional da categoria e alcance intercontinental.

-Legacy 500 é uma aeronave de categoria *midsized*, e é o jato mais rápido da sua classe, apresentando ainda um excelente desempenho de pista e alcance de 3.125mn.

-Legacy 450 corresponde a um jato de categoria *mid-light*.

-Phenom 300E é o jato executivo mais entregue no mundo nos últimos 4 anos, principalmente por apresentar uma melhor performance da categoria *light*.

-Phenom 100EV é uma melhoria do jato Phenom 100 e consiste num projeto da categoria *entry-level* de alto desempenho, para até sete passageiros.

Defesa e Segurança:

-KC-390: Corresponde a uma aeronave de transporte militar multimissão, desenvolvido para estabelecer novos padrões de capacidade e desempenho na sua categoria, combinando flexibilidade a um baixo custo de ciclo de vida.

-Super Tucano é uma aeronave que oferece eficiência operacional com baixos custos de aquisição.

Apresenta ainda serviços pertinentes, como é o caso dos sistemas ISR, que consistem em soluções integradas de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento, projetadas para responder a procuras operacionais e logísticas das forças de defesa por todo o mundo.

A Embraer é uma empresa cujos valores de ética e integridade formam uma base sólida, a partir da qual a empresa desenvolve a ciência e tecnologia, criando valor para todos os seus intervenientes.

De forma a responder a toda a procura global, a Embraer estabeleceu unidades industriais, escritórios e centros de distribuição de peças e serviços nos continentes da América do Norte, América do Sul, África, Ásia e Europa, tal como pode ser visto na figura 11.



Figura 11- Mapa de localização de unidades Embraer [30]

### 2.3.2.2- Embraer Portugal S.A.

Em Setembro de 2012 foram inauguradas as unidades de Estruturas Metálicas e Materiais Compósitos em Évora. Já em 2015 foi inaugurado um Centro de Engenharia e Tecnologia da Embraer, para o desenvolvimento de peças e estruturas em materiais compósitos, de forma a estabelecer uma relação mais próxima entre a alta competência do corpo de engenharia e a operação industrial. Estas três instalações encontram-se representadas na figura 12.



Figura 12- Instalações Embraer Portugal S.A. [32]

A Embraer Compósitos S.A. dá seguimento a uma estratégia de diversificação, que passou a fornecer um novo produto reconhecido como uma solução inovadora no mercado como é o caso dos materiais compósitos. Um dos produtos com maior visibilidade é o estabilizador horizontal do jato regional Embraer E175-E2, que é o primeiro na história da empresa elaborado com este material.

Por outro lado, a Embraer Metálicos S.A., cuja planta se encontra representada na figura 13, tem como missão a fabricação em série de aeroestruturas críticas em alumínio para as aeronaves Legacy 450, 500, 600 e 650, E-Jets E2, E175 e por fim a aeronave militar KC-390. As mesmas aeroestruturas integram peças maquinadas (ou fresadas) muito complexas, unidas entre si por uma sequência de operações que têm lugar numa linha de montagem, recorrendo a tecnologias de automação capazes de assegurar o nível de qualidade adequado em regime de elevadas cadências de produção. Esta sequência de operações será explicada mais em detalhe no capítulo 3.

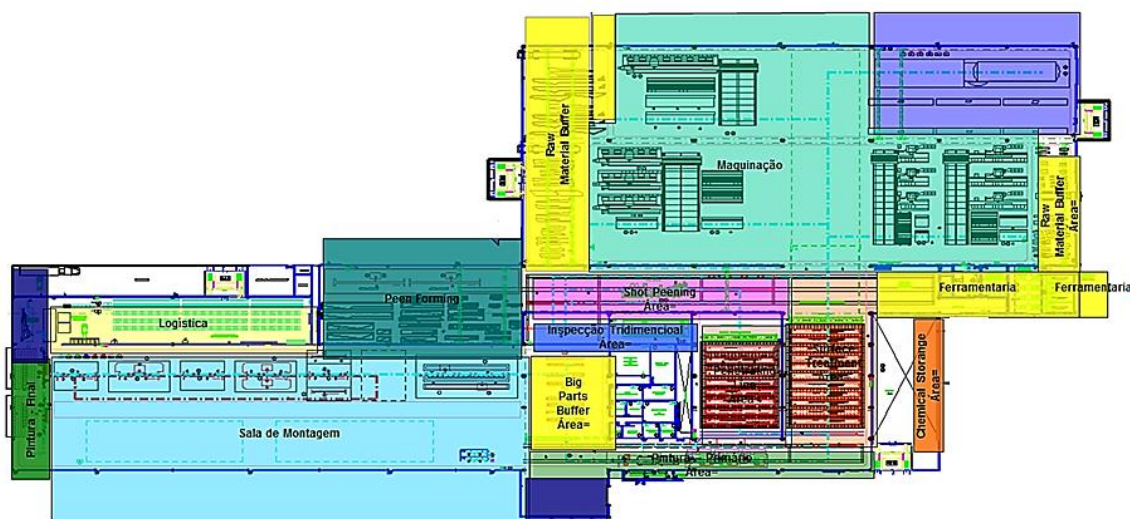


Figura 13- Planta da Embraer Metálicos S.A. [32]

### 2.3.3- Parceria Embraer Portugal S.A.

Procurando incessantemente a excelência empresarial, a Embraer aposta na melhoria contínua, tornando-se então numa empresa que aplica a metodologia e pensamento *Lean*, onde o principal objetivo consiste numa redução dos desperdícios a todos os níveis.

Adotando este pensamento, a Embraer Metálicos S.A., na pessoa do Engenheiro Alexandre Amaral da equipa de Automação, pertencente à área de Engenharia de Manufatura, idealizou uma possibilidade para a redução do tempo em que um painel se encontra parado para efetuar as medições necessárias para validação dos testes de *pen marking* na linha de montagem da família de aeronaves E-Jets E2 (atividade que não acrescenta valor, embora seja necessária), através do desenvolvimento de um algoritmo que compare as coordenadas programadas e reais de uma forma automática, dando então oportunidade para a realização desta dissertação.

De facto, esta parceria entre a Embraer Portugal S.A. e a Universidade da Beira Interior (UBI) permite aos estudantes obter um caso de estudo prático aplicado ao tema das suas dissertações, bem como consolidar conhecimentos técnicos numa empresa de prestígio internacional na indústria aeronáutica. Os estudantes, portadores de novas ideias e conhecimentos na área, podem contribuir para o desenvolvimento competitivo da empresa, como é o caso da elaboração desta dissertação, cujo objetivo é o de desenvolver um material de interesse para a instituição.

### 2.3.4- Programa E-Jets E2

Em novembro de 2011 a Embraer anunciou o desenvolvimento de versões melhoradas da família E-Jets. Os E-Jets E2 são uma família de aeronaves a jato bi-motoras que apresentam melhorias no sistema propulsivo, aviônicos, arquitetura e redução de dois dígitos nos custos operacionais. A aeronave E190-E2 encontra-se representada na figura 14.

Segundo estudos efetuados pela Embraer, a procura destes modelos irá aumentar nos próximos anos. De facto, é estimada a venda de 15 aeronaves para 2018 e 20 para 2019 dos modelos pertencentes à família E-Jets E2, daí se ter tornado imperiosa a busca de alternativas que agilizem o processo de fabrico e montagem das mesmas. Uma solução escolhida pela Embraer foi a de integrar um novo sistema automático de furação e cravação dos painéis das asas.

Entretanto, torna-se também importante compreender quais as especificações destas aeronaves, tendo sido elaborada a tabela seguinte que as apresenta de uma forma resumida:

Tabela 1- Especificações aeronaves E-Jets E2 [31]

	E175-E2	E190-E2	E195-E2
Peso máximo à decolagem	44800 kg	56400 kg	61500 kg
Peso máximo à aterragem	40000 kg	49050 kg	54000 kg
Carga útil máxima	10600 kg	13080 kg	16150 kg
Combustível máximo	8522 kg	13300 kg	13300 kg
Velocidade de cruzeiro máxima	Mach 0.82	Mach 0.82	Mach 0.82
Comprimento de pista para decolagem	1800 m	1620 m	1970 m
Teto de serviço	41000 pés	41000 pés	41000 pés
Alcance	2060 NM	2850 NM	2600 NM
Capacidade	Até 90 lugares	Até 114 lugares	Até 146 lugares



Figura 14- Aeronave E190-E2 [31]

Na Embraer Metálicos S.A. são fabricados e montados os revestimentos do intradorso e extradorso das asas dos três modelos, que posteriormente são enviados para o Brasil, de forma a ser possível a montagem final. O processo de montagem detalhado está retratado no capítulo 3.



# Capítulo 3: Fabricação e montagem das aeronaves E-Jets E2 na Embraer Metálicos S.A.

De uma forma geral e bastante simplificada, pode-se afirmar que a produção de aeronaves é constituída por duas etapas: a fabricação e a montagem [33]. Ora, este capítulo permite ao leitor compreender as operações relativas ao processo de fabrico no que diz respeito aos painéis das asas, bem como as etapas referentes ao processo de montagem destes painéis entre si e com outros componentes.

## 3.1- Materiais utilizados nos painéis da asa

Os principais critérios utilizados na escolha de materiais na indústria aeronáutica são referentes a [35,36]:

- Resistência à fadiga, pois as aeronaves estão sujeitas a um número elevado de cargas e vibrações resultantes da sua operação, o que poderá dar origem a fissuras nas estruturas e componentes;

- Resistência à corrosão, uma vez que as aeronaves se encontram sujeitas a ambientes muito agressivos (mar, poluição atmosférica, amplitudes térmicas, etc.);

- Baixa densidade, ou seja, baixa massa por unidade de volume. Esta é uma característica muito importante nesta indústria, uma vez que o peso específico de um material por volume é uma decisão importante quer no equilíbrio global da aeronave, quer no ganho energético com a redução do peso;

- Facilidade de fabrico.

Assim sendo, os materiais mais utilizados neste setor, são o Alumínio, Titânio, Fibra de Vidro, Fibra de Carbono, Madeira, Aço e Ligas Metálicas.

No caso dos painéis das asas da família de aeronaves E-Jets E2, o material predominantemente utilizado é o alumínio e suas ligas, principalmente devido às boas propriedades combinadas.

Os painéis *Upper*, que serão integrados no extradorso da asa, são compostos principalmente por ligas de alumínio da série 7xxx, cujo elemento principal da liga é o Zinco (Zn). Estas apresentam a maior tenacidade relativamente a todas as ligas de alumínio, uma elevada resistência à fadiga, apresentam ainda uma relação resistência/peso superior a muitos aços de alta resistência, no entanto são de difícil fabrico. É possível realizar tratamentos térmicos a esta série, a fim de melhorar as suas propriedades.

Já os painéis *Lower*, que serão integrados no intradorso da asa, são compostos por ligas de alumínio da série 2xxx, cujo principal elemento é o Cobre (Cu). Estas apresentam vantagens tais como: elevada resistência mecânica, alta resistência com temperatura, apta para ligações mecânicas e também é possível aplicar tratamentos térmicos. No entanto, apresentam características menos vantajosas, como é o caso de apresentar uma resistência à corrosão e conformabilidade<sup>1</sup> limitadas e soldagem por resistência[36].

## 3.2- Fabricação primária dos painéis

### 3.2.1- Maquinação em CNC da matéria-prima

CNC, tal como explicado no capítulo 2, corresponde a um sistema que permite o controlo simultâneo de vários eixos de uma máquina. No caso das fresadoras CNC, estas são capazes de produzir peças complexas, em série e de alta precisão, especialmente quando a sua programação tem o auxílio de ferramentas CAD/CAM.

No caso dos painéis, a matéria-prima chega à fresadora CNC e é colocada num dispositivo para fresar, tal como será abordado nos tipos de ferramentais na secção 3.3.2., de forma fixar a matéria-prima que vai ser maquinada na vertical, uma vez que a fresa da máquina CNC se encontra na horizontal, tal como se pode verificar nas figuras 15 e 16. Isto acontece para que se poupe espaço e para que as limalhas e rebarbas decorrentes da fresagem caiam logo numa passadeira, de forma a serem retiradas de uma forma mais rápida e eficiente.

---

<sup>1</sup> **Conformação** é o processo mecânico onde se obtém peças através da compressão de metais sólidos em moldes, utilizando a deformação plástica da matéria-prima para o preenchimento das cavidades dos moldes.



Figura 15- Peça a ser maquinada no interior da fresadora CNC [32]

Já na máquina CNC a matéria-prima vai ser maquinada, ou fresada, seguindo um programa previamente elaborado pelos engenheiros responsáveis.



Figura 16- Ecrã da máquina CNC para visualizar o seu interior [32]

É importante salientar que a diferença de medições entre uma ponta da matéria-prima e a outra nunca ultrapassa os 0,025mm, ou seja, trata-se de um processo bastante rigoroso, que cumpre todos os requisitos impostos nos projetos aeronáuticos.

Antes de passar ao processo seguinte, é efetuada uma medição por ultrassons, de forma a garantir que a espessura do material se encontra dentro das tolerâncias. Se tudo estiver conforme os requisitos, então este passará à fase seguinte, que consiste na ajustagem.

### 3.2.2- Ajustagem

Ajustagem é um processo mecânico e manual utilizado para retirar rebarbas e imperfeições e também para quebrar arestas, isto é, fazer com que estas obtenham uma forma mais arredondada. Este é um processo especialmente importante para evitar o *Roll Over*, que consiste numa deformação das arestas após o *shot peening* (por terem arestas mais pontiagudas), o que poderá criar problemas mais tarde.

Este é um trabalho que causa muito desgaste ao operador, por proporcionar poucas condições ergonómicas. No entanto, a Embraer já está a estudar uma solução de forma a proporcionar melhores condições aos trabalhadores.

### 3.2.3- Tratamentos de Superfície

Os tratamentos de superfície destinam-se a revestir os painéis com um material diferente, alterando assim as propriedades da sua superfície [37]. De facto, os painéis da asa são submetidos a ambientes agressivos e solicitações mecânicas exigentes [35]. Então, os painéis têm de ser capazes de resistir à corrosão, além de ser necessário apresentarem uma boa resistência mecânica. Desta forma, os tratamentos de superfície que lhes são aplicados previnem a corrosão, aumentando a durabilidade da vida útil dos mesmos.

A eficiência dos revestimentos protetores depende da preparação prévia da superfície a revestir, de modo a torná-la isenta de qualquer tipo de impurezas. Quanto melhor for a limpeza da superfície, melhor será a aderência entre o material de base e o material de revestimento. Para tal, na Embraer Metálicos S.A. são utilizados os seguintes métodos de limpeza:

- Banho turco 6849, onde são retiradas gorduras contidas na peça;
- Banho turco 4215, que consiste num banho alcalino orgânico para retirar impurezas, sendo mais abrasivo que o anterior;
- Decapagem ácida, com recurso a ácido nítrico, deoxalume<sup>2</sup> e água osmotizada. A decapagem ácida é um processo químico muito aplicado na indústria, uma vez que é fundamental para a remoção de camadas de óxidos dos metais e deixar a superfície quimicamente limpa;
- Lavagem osmotizada, que se trata de uma lavagem com água sem nutrientes;
- LASP (Limpeza Após *Shot Peening*), onde é realizada uma descontaminação, num banho de ácido nítrico e água osmotizada, para evitar a corrosão galvânica<sup>3</sup> após a granalhagem (*shot peening*).

Já em relação ao revestimento aplicado na superfície dos painéis após o *shot peening*, a Embraer Metálicos S.A. utiliza a anodização tartárica-sulfúrica (TSA), em que os agentes ativos

---

<sup>2</sup> **Deoxalume:** produto composto por ácido sulfúrico e fluoreto de hidrogénio, que permite a remoção de óxidos superficiais de forma eficaz [41].

<sup>3</sup> **Corrosão galvânica:** tipo de corrosão que se verifica entre dois materiais diferentes (com diferentes potenciais de corrosão) em contacto, formando assim uma pilha galvânica.

são os ácidos tartárico e sulfúrico. Esta vai criar um revestimento não metálico inorgânico, a partir de uma reação química entre o material metálico (neste caso os painéis) e o meio em que é colocado (neste caso, ácidos tartárico e sulfúrico), conferindo ao material características desejáveis, principalmente a resistência à corrosão e ao desgaste [37]. Mais concretamente, consiste num processo de tratamento superficial do alumínio em que, numa célula eletrolítica, os painéis constituem o ânodo, ocorrendo a conversão do alumínio superficial em óxido de alumínio.

Este processo traz as seguintes vantagens:

- Aumentar a resistência à corrosão, visto que o óxido de alumínio é impermeável ao ataque atmosférico e à água salgada;
- Aumentar a adesão de tintas, visto que o revestimento anódico constitui uma superfície quimicamente ativa para a maioria das tintas;
- Conferir isolamento elétrico, pois o óxido de alumínio é dielétrico<sup>4</sup> [37].

Um outro processo de revestimento que é utilizado nas instalações da Embraer Metálicos S.A. é a pintura primária, que serve essencialmente para evitar a corrosão.

### 3.2.4- Inspeção por Líquidos Penetrantes

A inspeção por líquidos penetrantes é considerada um método não destrutivo. Este consiste na aplicação de um líquido penetrante na superfície da peça, de forma a localizar descontinuidades que abram à superfície, aproveitando o fenómeno físico da capilaridade<sup>5</sup>[37].

Este processo tem várias etapas que devem ser seguidas. No entanto, em primeiro lugar é necessário garantir que foi efetuada uma limpeza antes da aplicação do líquido penetrante, de forma a evitar a presença de contaminantes, tais como lubrificantes e revestimentos.

Depois de garantida esta condição, é aplicado o líquido penetrante na superfície da peça. Na Embraer Metálicos S.A. os métodos utilizados para esta aplicação são o da imersão, em que os painéis são mergulhados num contentor com penetrante e o da aspersão, em que são utilizados *sprays*. Estes métodos são denominados A e C, respetivamente. O método A efetua-se nas primárias da fábrica, enquanto o método C já é utilizado quando se pretende a verificação de

---

<sup>4</sup> **Dielétrico:** material que não permite a passagem de corrente eléctrica.

<sup>5</sup> **Capilaridade:** fenómeno de atração e repulsão de um líquido quando se encontra em contacto com um sólido, fazendo com que esse líquido suba ou desça devido à tensão superficial [42] (força de coesão que mantém unidas as moléculas da superfície de um líquido [37]).

alguma descontinuidade quando os painéis já se encontram nas linhas de montagem, sendo portanto o método A o mais utilizado.

No entanto, há outros métodos que podem ser utilizados, como é o caso da pintura, em que é utilizado um pincel para aplicar o líquido à peça, e do derrame, em que o penetrante é vertido sobre a peça [37].

O tempo de penetração corresponde ao período de tempo em que o penetrante permanece na superfície da peça, de forma garantir a sua absorção pelas descontinuidades. Na Embraer o tempo definido é de aproximadamente 30 minutos.

Em seguida é efetuada uma limpeza, com o intuito de remover o excesso de penetrante, uma vez que o penetrante em excesso poderá resultar na omissão do defeito ou numa diminuição da visibilidade do mesmo.

Posteriormente é aplicado o revelador, de forma a melhorar a visibilidade das indicações dadas pelo líquido penetrante.

O painel é em seguida colocado numa estufa, para que o tempo de secagem seja abreviado.

E chega por fim a fase mais importante do processo, que consiste na colocação do painel numa cabine de inspeção, de forma a verificar e avaliar as descontinuidades através da fluorescência, que torna as mesmas visíveis à luz ultra-violeta.

Para tal, é utilizada uma lanterna UV numa sala completamente escura, onde as descontinuidades ficam salientes numa cor fluorescente, tal como pode ser visto na figura 17. Após verificar e apontar todas as fissuras, é feita uma avaliação. As fissuras são reprovadas quando a sua dimensão é superior a 0.5mm, como é o caso do sucedido na figura 18.

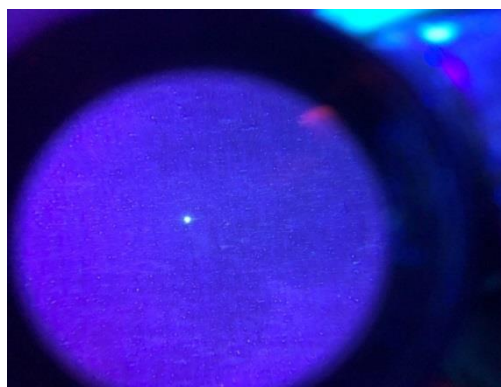


Figura 17- Exemplo de uma descontinuidade encontrada num painel na Embraer Metálicos S.A. [32]

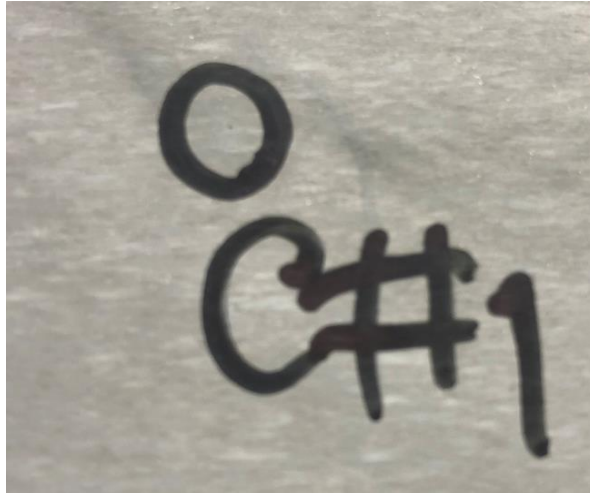


Figura 18- Após avaliação, foi reportada a descontinuidade [32]

Por último, é efetuada uma limpeza final, uma vez que os resíduos de penetrante e revelador podem ter efeitos nocivos, podendo assim afetar e comprometer o comportamento em serviço dos painéis [37].

### 3.2.5- Granalhagem

Granalhagem é um processo que induz tensões de compressão, para atrasar (muitos anos) o aparecimento de fissuras e imperfeições, ou seja, aumenta a vida à fadiga.

Podem ser distinguidos três tipos diferentes, sendo eles:

- 1- Saturação, em que as características mecânicas são melhoradas;
- 2- Desempeno, em que são "desempenadas" as peças, havendo zonas em que se incide o jato de esferas;
- 3- *Peen forming*, em que um painel vem plano e através da granalhagem, vai criar forma aerodinâmica do perfil. É um método bastante vantajoso, uma vez que vai poupar bastante material, evitando o desperdício.

### 3.2.6- Medição Tridimensional

Esta fase consiste numa inspeção automatizada através de máquinas de medição por coordenadas (CMM, do inglês *Coordinate Measuring Machines*), tal como o exemplo apresentado na figura 19. Estas máquinas comparam de forma automática as coordenadas de vários pontos através de um modelo CAD com a peça real, verificando se esta se encontra dentro do

toleranciamento imposto no projeto, aferindo aspetos dimensionais no que diz respeito à forma, tamanho e posição geométrica de uma peça, de forma a minimizar os erros, garantindo assim a qualidade do produto. As vantagens associadas a este processo consistem num aumento da precisão das medidas, redução do tempo de medição e facilidade de operação.



Figura 19- Máquina de medição por coordenadas modelo Crysta-Apex S da Mitutoyo [34]

### 3.3- Montagem dos componentes da asa

Os pré-requisitos do produto para a montagem da estrutura da aeronave são desafiadores, uma vez que esta é uma indústria que requer altos níveis de qualidade, segurança e fiabilidade. A montagem pode ser separada em diferentes níveis, desde a montagem de pequenos subconjuntos até à montagem estrutural final das aeronaves [33].

Nas operações de montagem são comumente utilizados ferramentais, de forma a garantir o posicionamento no espaço durante a montagem, garantindo as condições de projeto dos produtos montados e a compatibilidade com peças de montagens posteriores [34,26].

### 3.3.1- Componentes da asa

As asas desta família de aeronaves consistem numa estrutura semi-monocoque, que é constituída por revestimentos (conjunto de painéis), tensores longitudinais (*stringers*), duas longarinas, junta de tração (que se encontra apenas no revestimento do extradorso), nervuras e bordos de ataque e de fuga. No entanto, a Embraer Portugal apenas está encarregue dos revestimentos, *stringers* e junta de tração, que podem ser vistos nas figuras 20 e 21. São também fabricadas as longarinas, no entanto a sua montagem não é efetuada em Portugal. Será efetuada posteriormente nas instalações da Embraer Brasil.

A asa é considerada uma estrutura primária da aeronave, pois contribui significativamente para a resistência às cargas de voo e solo. Esta é uma estrutura crítica para a segurança da aeronave, isto é, a sua falha compromete a integridade estrutural do veículo [38].

Como tal, deve ser resistente e flexível, de forma a suportar as elevadas cargas aerodinâmicas geradas, que apresentam intensidades que variam ao longo do tempo. É também importante atender à colocação de outras cargas relevantes, como é o caso do combustível e dos motores [38].

A asa é então uma estrutura de extrema importância, já que está diretamente associada à força de sustentação responsável pela manutenção da aeronave no ar.

O revestimento do extradorso da asa (*Upper*) é constituído por um conjunto de 2 painéis, enquanto o revestimento do intradorso da asa (*Lower*) por 3 painéis. Estes têm como função resistir ao corte (suportam parte dos esforços da asa). De facto, durante o voo, as cargas impostas à estrutura da asa atuam primeiramente sobre o revestimento. Este transmite as cargas para as nervuras, e das nervuras passam para as longarinas [20].

Tal como referido, estas aeronaves são constituídas por duas longarinas, sendo estas responsáveis por suportar os esforços de flexão da asa [20].

Já os *stringers*, ou tensores longitudinais, que se encontram representados nas figuras 20 e 21, têm como função resistir a esforços axiais, ou seja forças de tração/compressão, cargas aerodinâmicas, além de conferirem maior rigidez à asa [20].

Por último, a junta de tração, que também se encontra representada na figura 20, está localizada no revestimento do extradorso da asa e tem como objetivo reforçar a raiz da asa, pois é através desta que a maioria das cargas passam para a fuselagem.

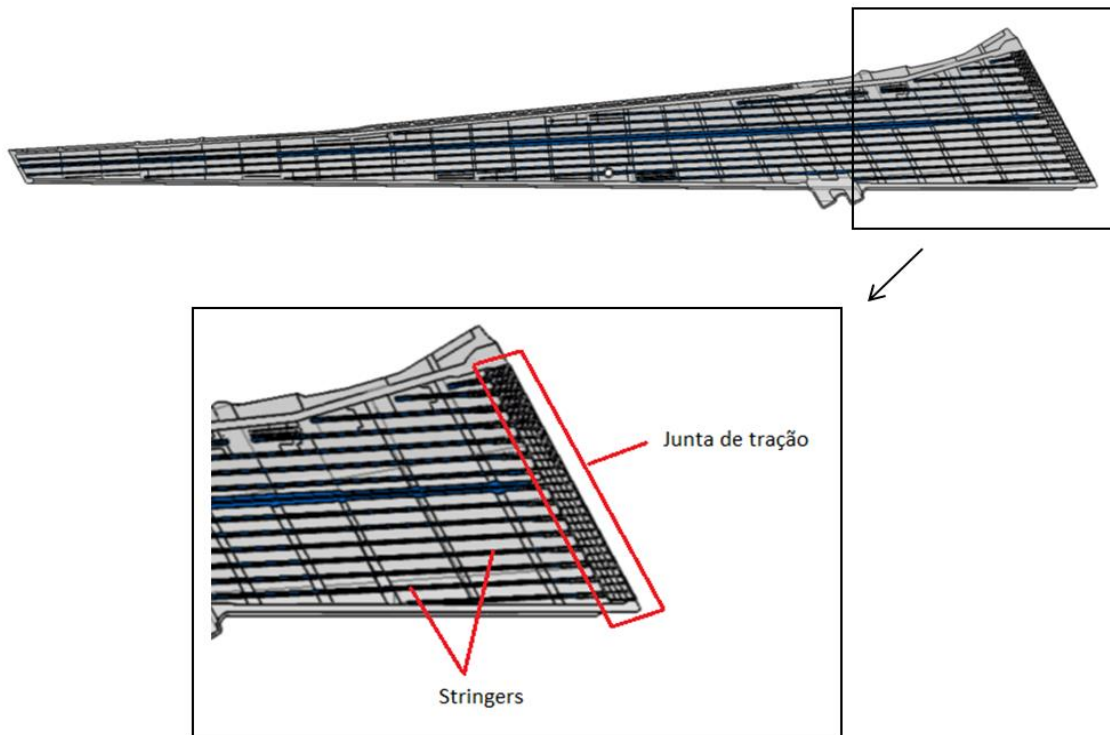


Figura 20- Pormenor do revestimento do extradorso com os *stringers* e junta de tração da aeronave E195-E2 [32]

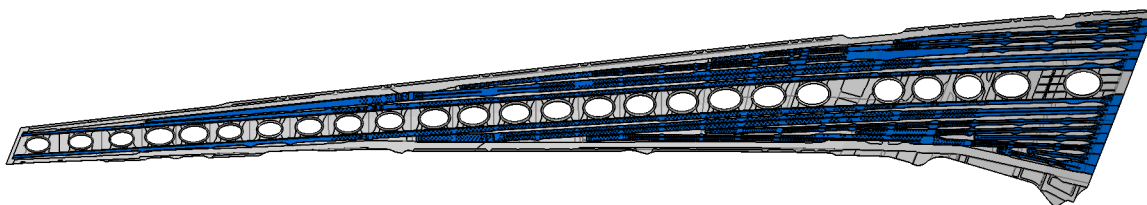


Figura 21- Revestimento do intradorso com os *stringers* da aeronave E195-E2 [32]

### 3.3.2- Ferramental

Ferramentais são estruturas que se destinam a prestar auxílio nas operações de fabricação e montagem de componentes.

Segundo o Manual Normativo de Ferramental MNF21002 da Embraer, há vários tipos de ferramentais mediante a funcionalidade pretendida. Entre eles podem ser distinguidos os *templates*, moldes, gabaritos, matrizes, apoios, dispositivos e miscelâneas. Em seguida são dados exemplos de cada um deles.

*Templates* são considerados um tipo de ferramental e permitem efetuar a marcação, verificação e posicionamento do produto. Alguns exemplos são referidos em seguida:

-Guia de posicionamento para efetuar corte por arrombamento, que é utilizada para posicionar o produto em relação ao punção e à matriz que vai executar o corte em questão. Ou seja, estabelece a geometria e posicionamento de furos e outros detalhes executados através deste processo, como por exemplo furos padronizados num painel de instrumentos, furos especiais, oblongos, difíceis de obter por outros meios;

-*Template* de marcação em maquinação química, que transfere os contornos e ilhas que vão sofrer ataque químico para a chapa a ser maquinada;

-*Template* para *drafting*/ furação/ posicionamento de peças primárias é utilizado para obter o contorno, ajuste, furação, ou posicionamento de peças primárias metálicas ou não metálicas. É utilizada em peças de metal, quando o contorno e furação não requerem uma tolerância fechada e em materiais compósitos, quando há necessidade de posicionamento de chapas de metalização;

-*Template* para pintura é usado para marcação da região a ser pintada ou metalizada e funciona como proteção para tratamentos químicos superficiais.

Moldes são utilizados para conformar o material, ou seja, dar-lhe uma forma. Há vários exemplos deste tipo de ferramental, sendo alguns deles:

-Molde para conformação manual é usado para conformar, dar acabamento em peças que não podem ser conformadas por outros meios, estabelecendo assim a geometria da peça;

-Molde para conformação em prensa de borracha é usado para conformar e desempenar peças em forma de chapa numa prensa de borracha, permitindo assim estabelecer a geometria da peça acabada, ou semi-acabada;

-Molde para conformação de peças de plástico e materiais compósitos é utilizado para conformar peças termoendurecidas e termoplásticas, estabelecendo assim a forma e contorno do produto;

-Molde de estampagem para conformação em prensa hidráulica são usados para conformar peças em forma de chapa ou obtidas por extrusão, estabelecendo também a geometria da peça.

Em seguida é abordado um outro tipo de ferramental, os Gabaritos. Estes têm como função servir de guias para efetuar montagem, furação, colagem ou *drafting*. Então, para tal, são em seguida dados alguns exemplos, bem como é descrita a sua função:

-Gabaritos para furação de peças funcionam como guias para as brocas de furação, estabelecendo o posicionamento dos furos em peças primárias ou subconjuntos, garantindo a qualidade e perpendicularidade da furação;

-Gabaritos de montagem permitem o posicionamento de peças, subconjuntos, furações, recortes, etc. para posterior furação e cravação, selagem, recorte, ajustes e verificação. O seu objetivo é o de aumentar a repetibilidade, produtividade e precisão onde requerido;

-Gabaritos de *drafting*/furação de peças metálicas após conformação são utilizados para definir contornos ou furar peças já conformadas;

-Gabaritos de colagem são usados para posicionar peças que serão unidas por meio de colagem a quente ou a frio;

-Gabaritos de *drafting* e/ou furação de peças plásticas, tal como o nome indica, são utilizados como guias para executar o *drafting* e furação de peças em material plástico;

-Gabaritos para furação ou *drafting* de tubos são usados como guia para cortar, ajustar ou traçar tubos;

-Gabaritos de instalação são utilizados para prender a peça ou montagem de maneira que ela possa ser ajustada e/ou instalada num conjunto maior ou na própria aeronave. São então usados para localizar peças, subconjuntos, furações, cortes, etc., permitindo efetuar ajustes, furação, cravação, selagem e verificação, de forma a obter repetibilidade, flexibilidade e produtividade onde requerido;

-Gabaritos para rebtagem automática são utilizados para posicionar o produto na máquina para furação e cravação automática, tal como os das máquinas referidas nesta dissertação.

Em seguida são abordados os Dispositivos, outro tipo de ferramental, que tem como função auxiliar tarefas como soldar, maquinar e furar. Entre eles podem ser distinguidos os seguintes:

-Dispositivo para soldar é utilizado para posicionar peças que serão unidas através da soldadura;

-Dispositivo para fresar e toronar é utilizado para fixar a matéria-prima que vai ser maquinada em máquinas convencionais ou em CNC.

Apoios são também considerados um tipo de ferramental, e tal como o nome indica destinam-se a prestar apoio nas tarefas de fabricação e montagem de componentes. Em seguida são distinguidos os vários tipos utilizados na Embraer:

-Dispositivos de elevação são usados para elevar o produto através de cintas, traves, esticadores, cabos, correntes, ganchos, etc.;

-Carros de transporte ou movimentação de produto são utilizados para armazenar, apoiar e transportar peças ou conjuntos na linha de montagem;

-Plataformas são usadas para facilitar o acesso ao produto ou aeronave, quando se pretende por exemplo aceder a locais de difícil acesso;

-Dispositivos de proteção usuário/ produto/ ferramental e/ou armazenamento de produto/ ferramental são usados para proteger o usuário, ferramental e/ou aeronave durante as operações de montagem final, proteção de peças/ conjuntos durante a fabricação ou armazenamento de peças de conjunto e/ou ferramental na linha de montagem. Permite também o acondicionamento do produto durante o transporte da empresa para o cliente.

Há também outros tipos de ferramental que são inseridos numa categoria denominada Miscelâneas, por não se identificarem em nenhum dos grupos anteriores, sendo eles:

-Dispositivo e/ou gabarito de controlo do produto usado para verificação dimensional de peças ou conjuntos;

-Máscara de furação ou *drafting* e verificação é usada para localizar e permitir o *drafting*, verificação ou execução de furação num conjunto. Normalmente está associada a um gabarito de montagem.

### 3.3.3- Linha de Montagem

Na linha de montagem destas aeronaves na Embraer Metálicos S.A. efetua-se a união dos painéis dos revestimentos, respetivos *stringers* e junta de tração (no caso do revestimento do extradorso), através da furação e cravação permanente dos fixadores.

As peças têm 6 graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação), podendo assim mover-se livremente no espaço. É então importante fixá-las, de forma a ser possível o correto posicionamento, para posterior montagem de acordo com o pré-estabelecido. Para tal são utilizados os gabaritos de montagem, que se encontram representados nas figuras 22 e 23. Estes funcionam como elementos de referência externos à peça, os *datums*, que permitem fixar os seis graus de liberdade.

Com o auxílio do referencial representado na figura 22, podemos analisar como são fixados os seis graus de liberdade. Quando os painéis são encostados ao ferramental são fixados 3 graus de liberdade, 1 de translação em y e 2 de rotação em x e z. Quando se encontram os painéis junto da raiz, são fixados mais 2 graus de liberdade, um de translação em x e outro de rotação em y. Por último, quando se apoia o painel nos batentes (que estão indicados na figura 22), o último grau de liberdade do painel é fixado, que corresponde ao da translação em z.

Após este posicionamento dos painéis, é em seguida colocada a junta de tração (no caso do revestimento do extradorso), com recurso também a este gabarito e, por último, são colocados os *stringers*, sendo estes também encostados a uns batentes próprios existentes no gabarito.

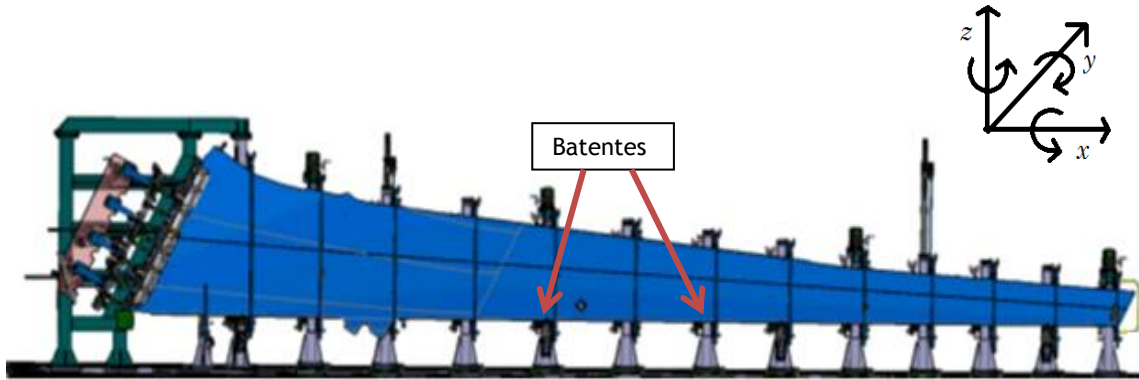


Figura 22- Parte traseira do gabarito de montagem [32]

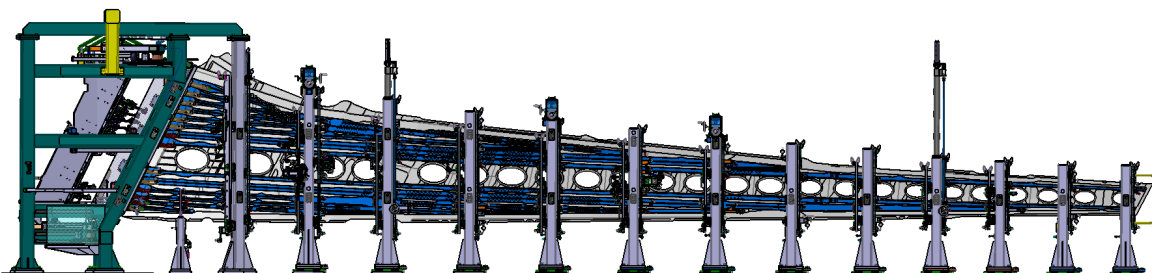


Figura 23- Parte frontal do gabarito de montagem [32]

Após o correto posicionamento, através dos pré-furos que vêm já efetuados nos *stringers* pelo fornecedor (os *stringers* não são fabricados na Embraer, vêm de um fornecedor exterior), faz-se uma pré-montagem através de fixadores temporários, unindo os painéis, os *stringers* e a junta de tração.

Esta pré-montagem consiste na furação e cravação manual de uns fixadores temporários, denominados *tacks*, que posteriormente serão retirados e substituídos por fixadores definitivos.

A união definitiva dos *stringers*, bem como de parte da junta de tração ao revestimento será efetuada através das rebitadoras sobre as quais o caso de estudo presente nesta dissertação incide.

### 3.3.4- Furação e Cravação

As exigências de instalação dos fixadores têm uma importância fundamental para a ausência de vazamentos, para o cumprimento dos requisitos de resistência e prolongamento da vida útil da aeronave. Desta forma, a preparação dos furos para que os mesmos permitam um perfeito alojamento dos fixadores é uma das características mais importantes na concepção da aeronave,

devido à grande quantidade de furos que obrigatoriamente devem ser feitos no produto. Como tal, são impostas exigências relativamente à dimensão e acabamento dos mesmos, uma vez que se trata de um processo que fragiliza o material a nível estrutural, por reduzir a quantidade de área resistente a uma força atuante.

Sendo um dos processos mais utilizados ao longo da linha de montagem e de uma extrema importância, existem ferramentas, como por exemplo tripés, gabaritos e máscaras de furação, que auxiliam os operadores, garantindo a posição e perpendicularidade da furação. O toleranciamento relativamente ao deslocamento angular da linha de centro do furo é de  $\pm 1^\circ$  e de  $\pm 1$  mm relativamente ao deslocamento linear, segundo a norma NE 03-071 (Detalhes de maquinação de metais - Tolerâncias gerais) apresentada no anexo C.

Para garantir o posicionamento de determinada furação, é necessário assegurar dois aspetos importantes: o passo e a borda. Estas distâncias vêm sempre especificadas nos desenhos ou outros documentos oficiais da empresa para aplicações nas montagens.

O passo é a distância que deve haver entre um fixador e o outro imediatamente mais próximo. De facto, quanto mais perto ficar um furo do outro, as linhas de tensão irão interseccionar-se, tal como pode ser visto na figura 24, aumentando assim a tensão média entre eles.

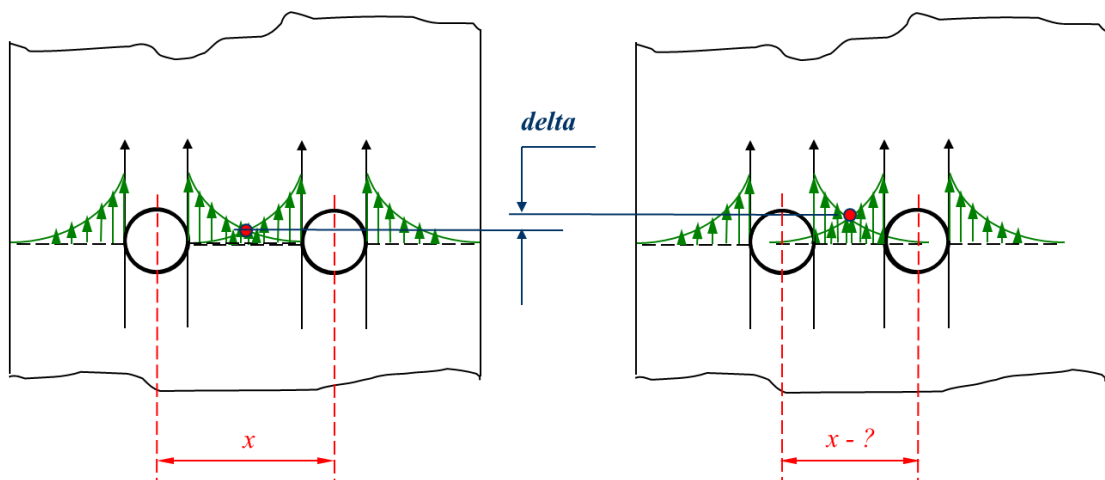


Figura 24- Ilustração do caso em que a distância do passo é inferior à especificada [32]

No caso de o passo ser maior do que o especificado, poderá ocorrer flambagem entre os componentes unidos, tal como pode ser visto na figura 25.

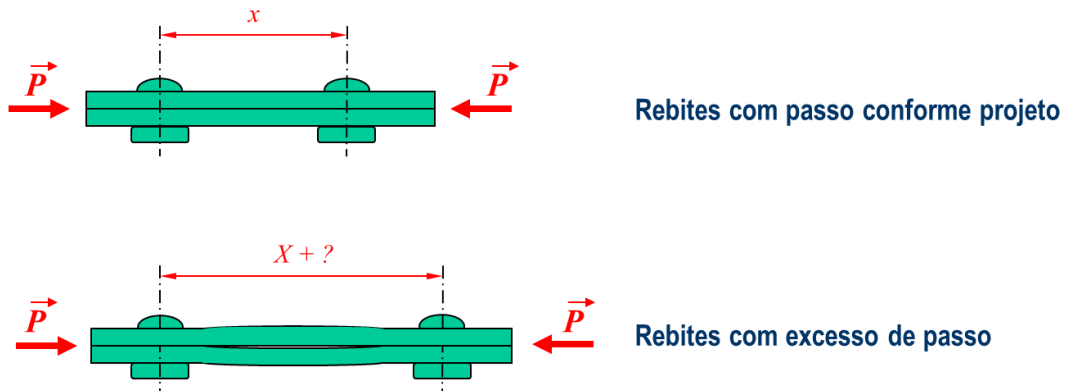


Figura 25- Ilustração do caso em que a distância do passo é superior à especificada [32]

A borda consiste na distância entre o centro do furo e a borda da peça, e varia de acordo com o diâmetro do furo, tipo de material, espessura da peça e tipo de esforços recebidos. A distância de borda deve ser garantida, uma vez que esta vai ter influência sob as cargas de fadiga (carregamentos cíclicos) e as cargas estáticas (carregamento único).

O carregamento único corresponde a uma carga que é aplicada de uma só vez na estrutura. Tal como pode ser visto na figura 26, quanto menor for a distância 'x', menor será a força resistente ao fissuramento de uma peça numa situação de carregamento  $\vec{P}$ .

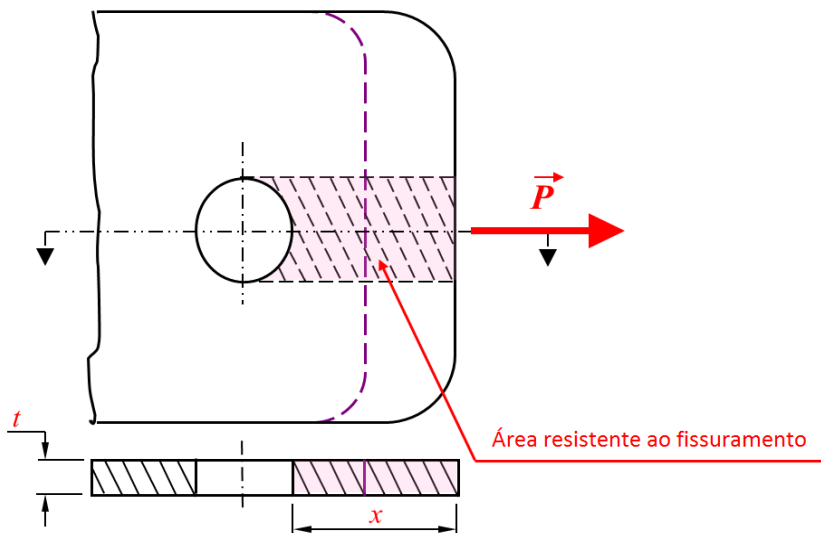


Figura 26- Ilustração de carga estática [32]

Em relação às cargas de fadiga, a estrutura deve ser projetada para resistir a estas durante toda a sua vida. De facto, se a borda for diminuída, esta ficará mais próxima das linhas de

tensão do furo, tal como pode ser visto na figura 27, e isso fará com que ocorram falhas num ciclo mais curto do que o projetado.

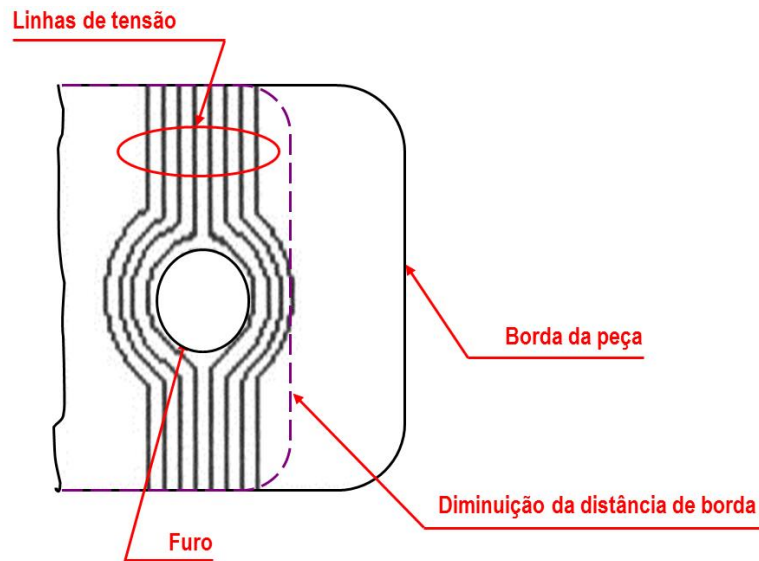


Figura 27- Ilustração de carga cíclica [32]

Segundo a Norma Embraer NE 03-006 (Rivets and Pins-Drilling, Countersinking and Dimpling) que se encontra no anexo C, a tolerância associada ao passo considerando o primeiro furo como um furo de referência, ou seja, um *datum* e sempre em relação a este *datum* é de  $\pm 1$  mm. Já a tolerância da distância até à borda é de  $\pm 0,8$  mm.

Já a cravação consiste na união de dois ou mais componentes, através de fixadores. Esta pode causar deformações e torções na própria peça, devido aos momentos fletores gerados pelo procedimento, pelo que requer uma especial atenção, por exemplo na ordem de cravação.

A cravação depende do tipo de fixador utilizado (o tipo de fixador é escolhido mediante o tipo de carga a que vai estar sujeito, tal como é explicado a seguir) podendo ser feita através da compressão, de forma a expandir o rebite e podendo ser feita através da torção ou compressão do colar do fixador.

#### 3.3.4.1- Tipos de fixadores

Nas operações de montagem são utilizados vários tipos de fixadores. Entre eles podemos referir os pinos, rebites, parafusos, cavilhas, contrapinos, etc.

Em seguida são enumerados e explicados alguns tipos de fixadores utilizados na Embraer Metálicos S.A.:

Rebites Sólidos: são fixadores constituídos por uma única peça, de uso comum. Na figura 28 podem ser vistas a cabeça original do fixador, feita pelo fornecedor, e a contra-cabeça formada após a instalação do fixador. A sua instalação depende do acesso para o encontrador conformar adequadamente a contra-cabeça. Este tipo de fixador é utilizado onde há esforços de corte.

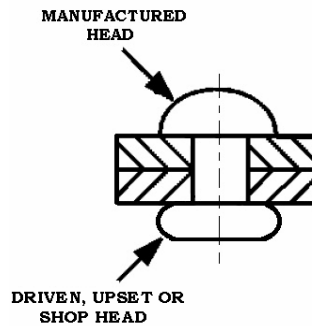


Figura 28- Ilustração rebite sólido [32]

Rebites *Briles*: tipo de rebite sólido, cuja característica mais relevante é a sua cabeça escareada a 120°, com uma área lateral à sua volta e anel protuberante na sua superfície, tal como pode ser visto na figura 29. Este anel achata-se durante o processo de cravação, expandido a sua cabeça e causando interferência com a estrutura. São projetados para utilização em estruturas onde o nivelamento com a superfície, resistência à fadiga, resistência estática em junta, resistência à corrosão e vedação são requisitos exigidos.

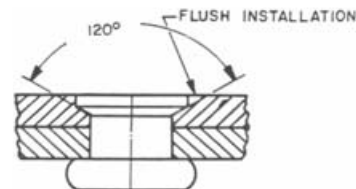


Figura 29- Ilustração rebite *briles* [32]

Rebites cegos: são chamados rebites cegos a todos os fixadores que permitem a sua instalação através do acesso apenas a um dos lados da estrutura a ser unida. Estes devem ser sujeitos apenas a cargas de corte e quando utilizados em aplicações estruturais, a cabeça rebitada deve ser visível para inspeção. Não devem ser utilizados em juntas onde é requerida impermeabilidade a fluidos e partes sujeitas a vibração. Concluindo, os rebites cegos devem ser colocados apenas quando não houver a possibilidade de cravar rebites convencionais.

Pinos *Hi-Lok™*, *Hi-Lite™* e *Hi-Tigue™*: são fixadores constituídos por um pino de alta resistência ao corte e um colar, ambos roscados, com características similares às de um

parafuso e uma porca. Na montagem, ao se atingir o binário de aperto necessário, uma parte do colar destaca-se e outra fica retida no pino.

Mais concretamente, os pinos *Hi-Lok*<sup>TM</sup> permitem uma instalação rápida e baixo peso (quando comparado com o pino rosqueado/parafuso e porca), melhorando a vida em fadiga devido à pré-carga uniforme através do binário automático (corte do colar), e permite obter uma junta fixa com instalação de um lado só, após o pino ter sido posicionado. A sua instalação pode ser vista na figura 30, mas resumidamente consiste na colocação do pino no furo, colocação do colar e através de uma ferramenta que realiza o binário necessário para o aperto do colar no pino e separação da parte superior do colar. Esta instalação é feita de uma forma manual, por operadores qualificados. Numa máquina automática, são preferencialmente utilizados os pinos *lockbolt*, que são descritos a seguir.

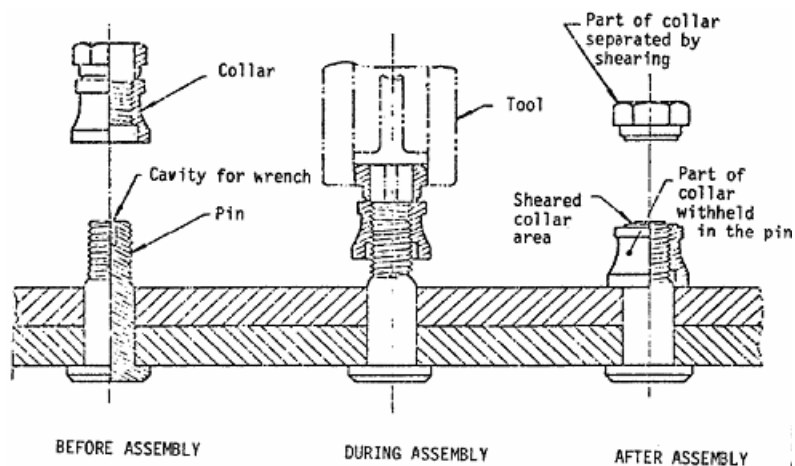


Figura 30- Ilustração da instalação de pinos *Hi-Lok*<sup>TM</sup> [32]

Os pinos *Hi-Lite*<sup>TM</sup> são análogos aos *Hi-Lok*<sup>TM</sup>, mas apresentam uma economia de peso devido ao menor comprimento do pino e menor altura do colar.

Já os pinos *Hi-Tigue*<sup>TM</sup>, que são também análogos aos *Hi-Lok*<sup>TM</sup>, apresentam um acréscimo do ciclo de vida em fadiga devido à interferência controlada resultante do trabalho a frio durante a introdução do pino.

Por último, os pinos *Lockbolt* são fixadores constituídos por um pino com ranhuras anulares e um colar de encaixe, utilizados em aplicações estruturais sujeitas a esforços elevados de corte. Possuem as mesmas características de resistência que os *Hi-Lite*<sup>TM</sup>, mas com menor peso, maior rapidez de instalação e maior resistência à vibração.

Em relação aos fixadores, podem ser ainda abordadas as seguintes características:

Pacote (*stack*), que corresponde à espessura das chapas de um conjunto, como é o caso por exemplo da soma da espessura do painel do revestimento com a espessura do stringer.

Pega (*grip*), corresponde ao espaço que o fixador vai ocupar dentro do furo. Para tal, temos valores máximos e mínimos para a pega, de forma a determinar a espessura máxima e mínima do pacote, respetivamente, permitida para o traço do fixador.

Então, a seleção da pega (*grip*) do fixador deve ser feita em função da espessura da junta, ou seja, do pacote (*stack*), de acordo com a tabela D.1 em anexo.

Na rebitadora sobre a qual esta dissertação incide, a seleção da pega do fixador é efetuada em projeto, tendo sido em conta na parte da programação. Então, quando o material chega à rebitadora, já é estimado qual o fixador a utilizar. Caso a rebitadora verifique que o pacote (*stack*) apresenta uma espessura ligeiramente diferente da especificada, segundo as Normas Embraer de instalação de fixadores, é possível escolher o fixador de pega imediatamente superior ou inferior, consoante a diferença entre as espessuras teórica e real, desde que se mantenha o tipo de fixador (*Hi-Lite*, *Lockbolt*, etc.) e o mesmo diâmetro. Exatamente por este motivo a máquina da Electroimpact apresenta duas brocas de furação, para diferentes *stacks*, tal como explicado na secção 2.3.5.2.2.

### 3.3.5- Selagem

Este é um processo que também apresenta bastante importância, uma vez que permite um bom isolamento, não permitindo a passagem de qualquer fluido e evita a corrosão. Por exemplo na zona do tanque de combustível, este processo apresenta uma importância extrema, de forma a evitar o vazamento de combustível.

Um aspeto de extrema importância no que trata o processo de selagem é a limpeza da superfície onde se pretende aplicar o selante, de forma a garantir que este adere corretamente. A limpeza evita a presença de contaminantes como por exemplo oleosidade da pele, lubrificantes de ferramentas, sujidades, limalhas e humidade. No caso de a superfície a ser selada conter alguma pintura, ela deve ser lixada suavemente, de forma a permitir uma melhor adesão do selante.

Há vários tipos de selagem, consoante o objetivo pretendido. Podem ser referidos os seguintes exemplos, que são usados na Embraer Metálicos S.A.:

-Selagem Aerodinâmica, consiste na aplicação de selante em superfícies aerodinâmicas, como é o caso dos revestimentos das asas, que devem estar livres de irregularidades,

descontinuidades, falhas, bolhas, arranhões e perda de aderência, pois isso irá criar arrasto de forma, o que vai afetar diretamente a eficiência aerodinâmica que está associada a essa superfície. Uma ilustração está representada na figura 31, para uma melhor compreensão.

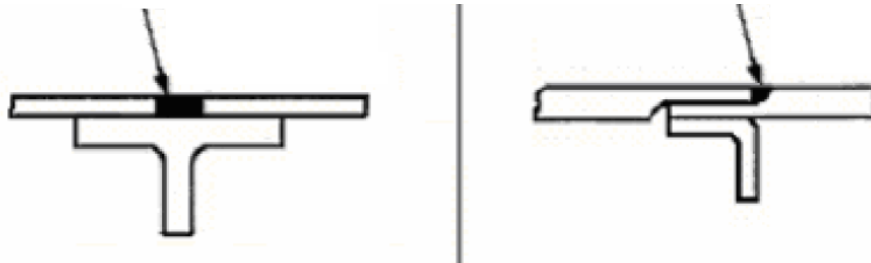


Figura 31- Ilustração da selagem aerodinâmica [32]

-Selagem de fixadores consiste na aplicação de selante nas cabeças e contra-cabeças dos fixadores, tal como pode ser visto na figura 32 respectivamente na figura da esquerda e da direita, para conferir um bom isolamento e criar uma proteção. Este tipo de selagem é utilizado na união dos revestimentos com os *stringers* na zona onde estarão os tanques de combustível, exatamente para evitar o vazamento.



Figura 32- Ilustração da selagem da cabeça do fixador [32]

-Selagem de interface entre peças é necessária quando se pretende unir duas superfícies, garantindo que há um bom isolamento entre estas, como é o caso da figura 33. No caso da selagem de interface na montagem de fixadores, o selante é colocado no furo, imediatamente antes de ser inserido o fixador, garantindo um bom isolamento entre estes. Este tipo de selagem também é aplicado na união dos revestimentos e dos *stringers*.

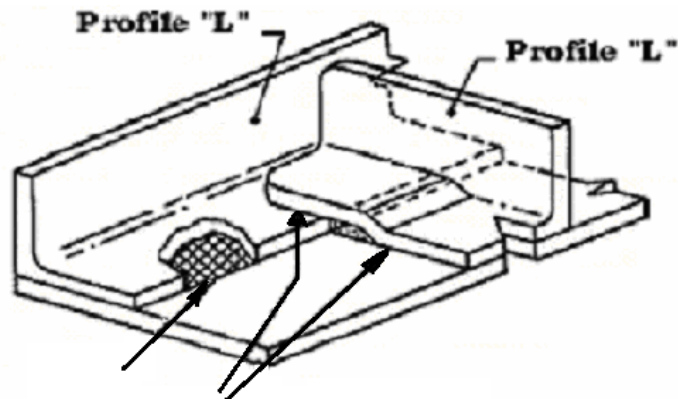


Figura 33- Ilustração da selagem de interface entre superfícies [32]

-Selagem de *filetes*, folgas, vãos, vazios e drenos, consiste num tipo de selagem em que o selante é aplicado como se fosse um fio, ao longo da junção entre duas peças, tal como pode ser visto na figura 34. Esta selagem é utilizada novamente na união dos revestimentos com os *stringers*.



Figura 34- Ilustração da selagem de *filete* [32]

### 3.3.6- Especificações rebitadoras inseridas nas linhas de montagem

Nas instalações da Embraer Metálicos S.A. estão presentes duas máquinas rebitadoras, uma que se encontra 100% funcional e integrada, o modelo E6390 da Electroimpact e outra que ainda se encontra em fase de integração, o modelo GRS6010SX-163/G86 Drivmatic Riveting System produzido pela Gemcor. Esta segunda máquina tornou-se extremamente necessária uma vez que a da Electroimpact atende também linhas de montagem de outras aeronaves e a procura dos E-Jets E2 irá ser bastante elevada, sendo que apenas uma máquina não consegue atender à produtividade exigida.

Na generalidade, ambas as máquinas têm o mesmo objetivo, que é o de efetuar a furação e cravação dos painéis, embora contenham características e funcionamento ligeiramente diferentes. Estes são em seguida explicados, para uma melhor compreensão.

Tal como referido anteriormente, a procura da família E-Jets E2 irá ser bastante elevada, pelo que se tornou imperativo encontrar uma segunda solução para automatizar os processos de furação e cravação dos painéis, de forma a aumentar a produtividade. Para a escolha da melhor solução, foram definidos os seguintes requisitos [32]:

- Alta taxa de furação/cravação;
- Atingir o menor tempo de ciclo possível;
- Obter alto índice de qualidade;
- Alta confiabilidade e disponibilidade do equipamento;
- Capacidade de efetuar furação e cravação de forma mais eficiente, reduzindo os desperdícios;
- Equipamento de operação relativamente simples;
- Programação Offline;
- Garantir integridade das partes da aeronave;
- Aspectos de segurança e ergonomia de acordo com os padrões Embraer.

### 3.3.6.1- Rebitadora Gemcor

Após uma análise e estudo detalhados, verificou-se que o modelo GRS6010SX-163/G86 Drivmatic Riveting System produzido pela Gemcor, representado na figura 35, cumpria todos os pré-requisitos, tendo por isso sido escolhido para a execução das operações requeridas.

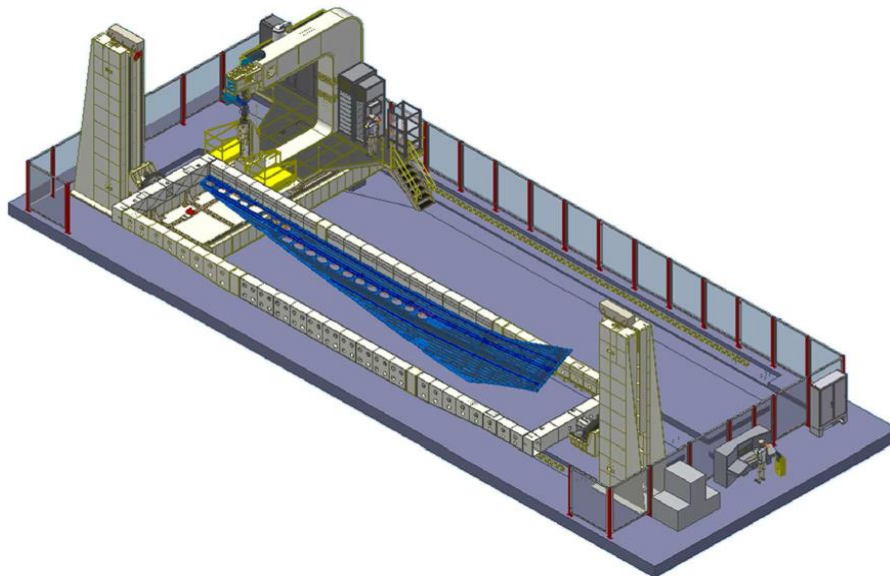


Figura 35- Ilustração rebitadora Gemcor [39]

### 3.3.6.1.1- Descrição geral da máquina

Este modelo consiste numa Rebitadora *C-Frame* (com estrutura em forma de C) de 5 eixos controlados através de uma CNC, numa *upper head* multi-posições, numa *lower head* rotativa, num sistema de alimentação de fixadores e por um o gabarito de rebitagem automática, onde está assente a peça a trabalhar, que é aqui denominado *workframe*. As suas especificações detalhadas encontram-se nas tabelas A.1 e A.2 em anexo.

Este equipamento tem como função efetuar a furação e cravação de fixadores entre os painéis que constituem o revestimento (*skin*), entre o revestimento e o tensor longitudinal (*stringer*), bem como entre o revestimento do extradorso e a junta de tração, de forma a unir estes componentes de forma permanente.

As principais funções que esta máquina é capaz de executar consistem em fixar o painel através da aplicação de uma força (*clamp*), instalar automaticamente fixadores nos locais predefinidos, efetuando as operações de furação, criação do escareado, aplicação de selante e cravação. Tem ainda incorporado um sistema de alimentação de fixadores, denominado F2C2, que fornece automaticamente os tipos de fixadores necessários à máquina, através de um injetor. A máquina também tem a capacidade de efetuar testes em CDPs (Corpos De Prova), para verificação e validação dos processos.

A máquina possui os seguintes eixos, cuja ilustração e orientação podem ser verificadas na figura 36:

Eixo X: Movimento lateral da *C-frame*

Eixo Y: Movimento longitudinal dos pedestais

Eixos Z/W: Movimento vertical da *workframe*

Eixo "A": Rotação da *workframe* sobre o Eixo X

Ângulo "B": Rotação da *workframe* em relação ao Eixo Y, causada pelo movimento do Eixo Z numa direção e do Eixo W na direção oposta. Este não é um eixo CNC, mas funciona como um eixo implícito.

Este sistema de 5 eixos é configurado com uma rebitadora Drivmatic e com um posicionador de trabalho CNC G86 com dois pedestais fixos (que correspondem às colunas que contêm os eixos Z e W).

O sistema de posicionamento permite o movimento dos eixos X, Y, Z/W e "A", bem como do ângulo "B", de forma a alinhar o processo de cravação a qualquer ponto na peça de trabalho dentro das limitações de deslocamento do sistema. Estas limitações e precisões relativas a cada eixo também podem ser consultadas na tabela A.2 em anexo e também na figura 39.

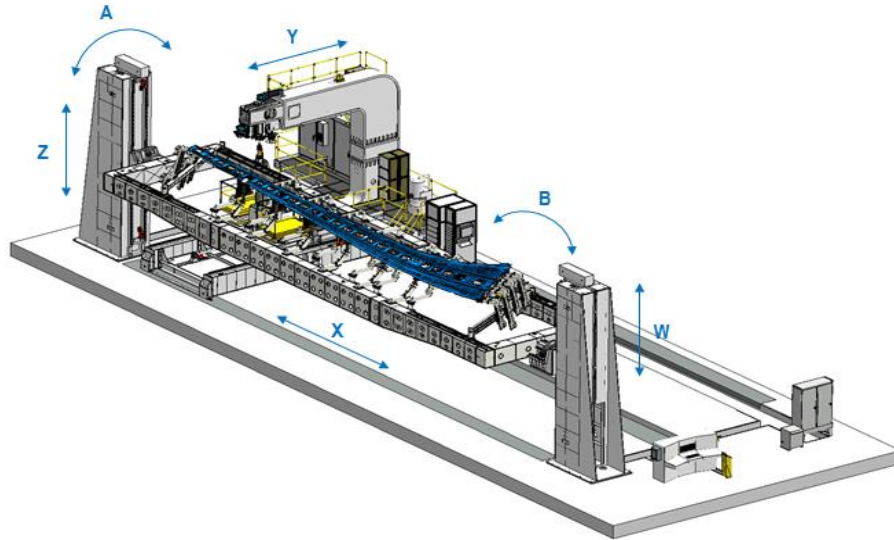


Figura 36- Ilustração dos eixos da máquina Gemcor [39]

O controlo do processo do ciclo da rebitadora é obtido utilizando um PLC e um sistema de controlo de movimento através de um Controlador Multi-Eixo Programável, PMAC<sup>6</sup> (do inglês, *Programmable Multi Axis Controller*). O controlo dos eixos do posicionador é fornecido por um CNC. Estes sistemas controlam as operações da rebitadora e os movimentos do posicionador, conforme indicado pelos controlos do operador ou pelas etapas pré-programadas (programas de peças).

### 3.3.6.1.2-Ferramentas de processo

A rebitadora consiste numa máquina automática para instalar fixadores e encontra-se representada nas figuras 40 e 41.

Esta é constituída pela estrutura *C-frame* e pelos conjuntos *upper head* e *lower head*, tal como representado na figura 40. A *C-frame* é uma estrutura feita em aço soldada, na qual os conjuntos *upper head* e *lower head* são montados. Estes conjuntos têm como objetivo fornecer e manter um alinhamento vertical entre as suas ferramentas e a linha de centro de trabalho. Um PMAC executa todas as operações da rebitadora executando os comandos de um Controlador Lógico Programável, PLC.

-Conjunto da *upper head*: Este conjunto está localizado na ponta superior da *C-frame*, tal como pode ser observado na figura 40, e contém uma placa onde é feita a mudança de ferramentas.

<sup>6</sup> PMAC é um controlador projetado especialmente para aplicações de controlo de movimento de múltiplos eixos de alta precisão [48].

As ferramentas que são utilizadas, e que serão a seguir explicadas, consistem na broca de furação e ferramenta para inserir os fixadores, denominada *buck ram*. As posições são dadas por uma câmara que resincroniza o posicionamento dos *tacks*, denominada *Resync Camera*, sonda ótica que faz a medição através de *lasers* dos furos, denominada *hole probe* e uma outra sonda que faz uma medição da altura do fixador, relativamente à superfície do painel, para verificar se este se encontra nivelado, denominada *flushness probe*;

-Broca de furação: O movimento rotativo da broca de furação é dado por um motor elétrico de frequência variável. Este motor recebe dados da velocidade de furação sob a forma de um sinal analógico a partir do PMAC. O controlador do motor dá a ordem de rotação da broca à velocidade desejada. Esta é bastante semelhante à representada na figura 47 da Electroimpact;

-*Buck ram*: É a ferramenta que insere os fixadores nos furos e consiste num pistão que está montado no *upper anvil*. Quando o pistão faz o movimento de descida, o fixador que se encontrava até agora numa cavidade do *upper anvil* é inserido no furo, ou seja, o *buck ram* serve como um membro sólido que coloca o fixador no furo. Funciona também de forma semelhante ao *u-driver* da Electroimpact, que se encontra representado na figura 48;

-*Upper anvil*: durante a operação de furação, os fixadores são injetados numa cavidades do *upper anvil*, (através de um sistema de fornecimento automático, em que os fixadores são colocados numa mesa giratória manualmente e esta mesa coloca os fixadores em cassetes. Estas cassetes irão fornecer os fixadores necessários para a cravação através de um sistema de injeção, que os irá colocar nas cavidades do *upper anvil*). Quando o *buck ram* é forçado para baixo em direção à peça de trabalho, as cavidades abrem-se, deixando cair o fixador no furo. Após isto, o *upper anvil* pressiona o fixador, de forma a este ficar totalmente inserido no furo;

-*Pressure foot*: consiste numa placa que contém dois cilindros localizada na parte inferior da *upper head*, que baixa e exerce pressão no painel enquanto é efetuada a furação, de forma a segurá-lo firmemente, prevenindo assim qualquer deformação que possa ocorrer;

-Aplicador de selante: aplicador de selante está montado na placa do *pressure foot* e este aplica selante no furo efetuado imediatamente antes de ser inserido o fixador. Este é também bastante semelhante ao representado na figura 50 pertencente à máquina da Electroimpact;

-*Flushness probe*: consiste numa sonda que está instalada na *upper head* e tem como função medir automaticamente a altura da cabeça do fixador relativamente à superfície do painel, para verificar se esta se encontra nivelada com o mesmo;

-*Resync Camera*: consegue encontrar automaticamente pontos onde é feito um reposicionamento, neste caso os *tacks*, entre a peça real e o CAD. Esta câmara é também bastante semelhante à representada na figura 51 da Electroimpact;

-Sensores de normalidade: consistem em 4 *lasers* que medem a distância nos eixos Z,W e A relativamente ao próprio revestimento, e não em relação ao stringer, garantindo a perpendicularidade entre a *lower head* (e conseqüentemente da *upper head*) e o revestimento, tal como representado também na figura 37. Desta forma, consegue assegurar-se que a linha de centro dos furos se encontra dentro das tolerâncias referidas acima.

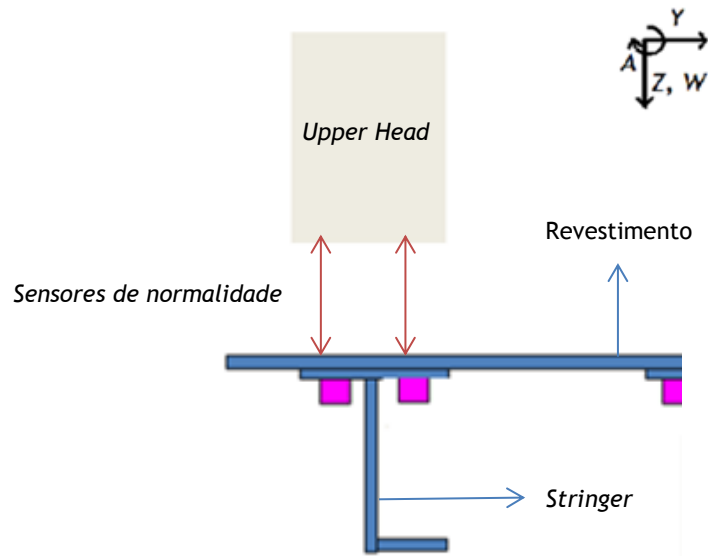


Figura 37- Ilustração dos sensores de normalidade da máquina da Gemcor [39]

Conjunto *lower ram*: este conjunto está montado na ponta inferior da *C-frame*, tal como pode ser visto na figura 40, e tem como objetivo exercer pressão para segurar o painel. É constituído por:

-*Clamp/turntable*: exerce uma força constante na parte inferior do painel, para que este não se mova, esta operação é denominada *clamp* e está situada no topo da *lower ram*;

-*Lower ram encoder*: é um controlador situado na *lower ram* e é utilizado para determinar a espessura dos dois materiais que se pretende furar em conjunto;

-*Lower anvil*: é montado no topo da *lower ram*. Este entra em contacto com a parte interior do painel, de forma a criar um apoio e entra em contacto com a parte inferior dos fixadores, instalando os colares;

-*Tracer*: consiste num *laser* capaz de medir a distância no eixo Y, desde a *lower head* até às abas do *stringer*, tomando como referência o *tack*, e é aplicada a toda a linha de furação. Então, se houver algum erro na posição do *tack*, esse erro será propagado durante toda a linha de furação. Esta distância foi previamente programada pelo Engenheiro de Automação, de forma a evitar colisões entre o *lower anvil* e o produto. A sua ilustração está representada na figura 38.

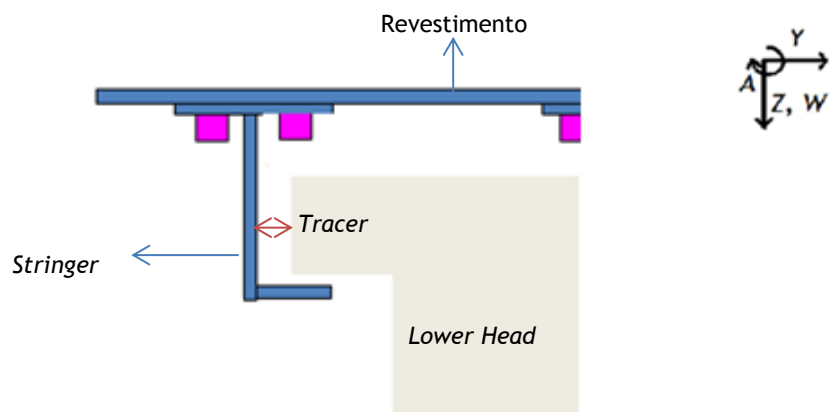


Figura 38- Ilustração do tracer da máquina da Gemcor [39]

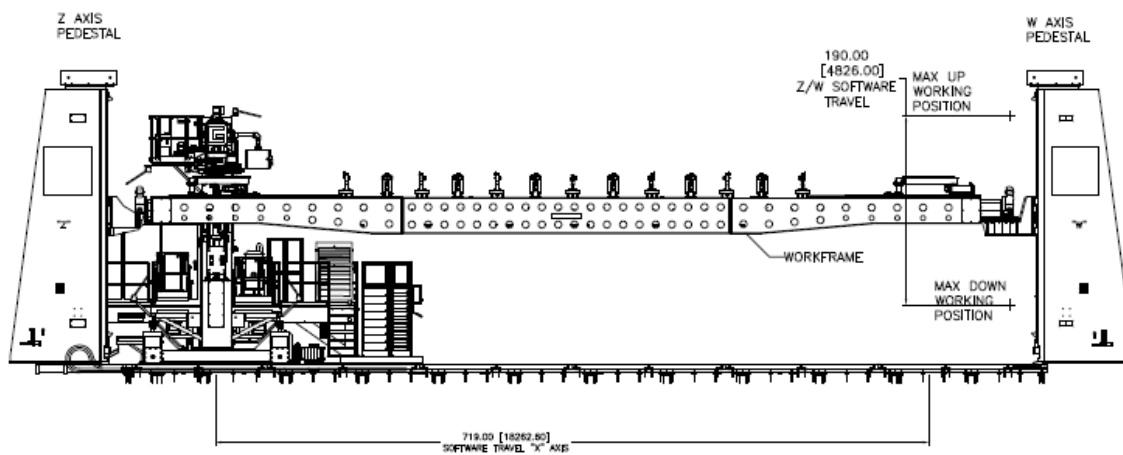


Figura 39- Principais componentes da máquina [39]

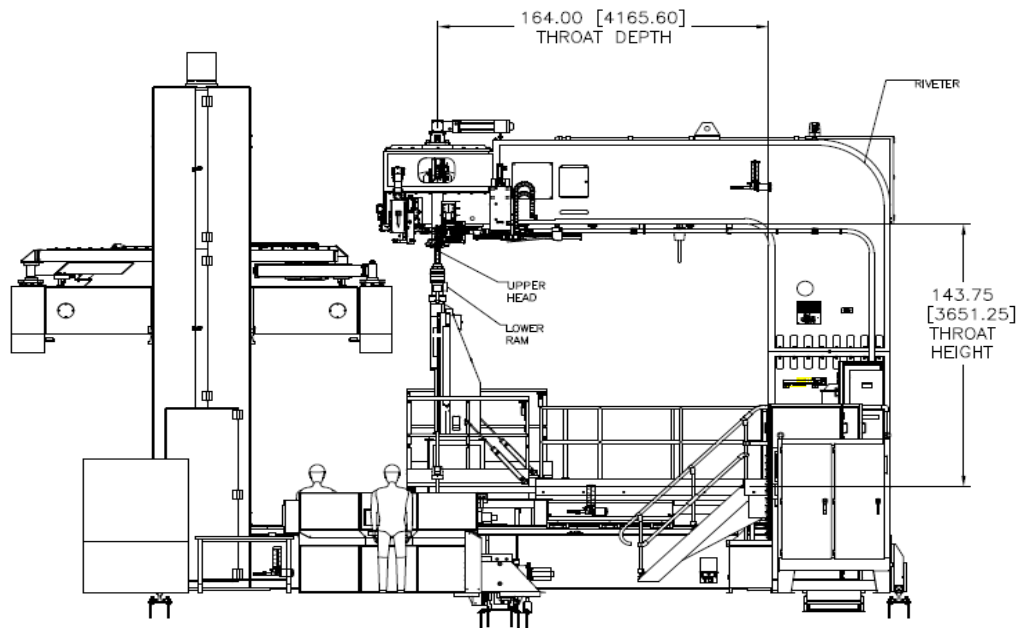


Figura 40- Principais componentes da máquina [39]

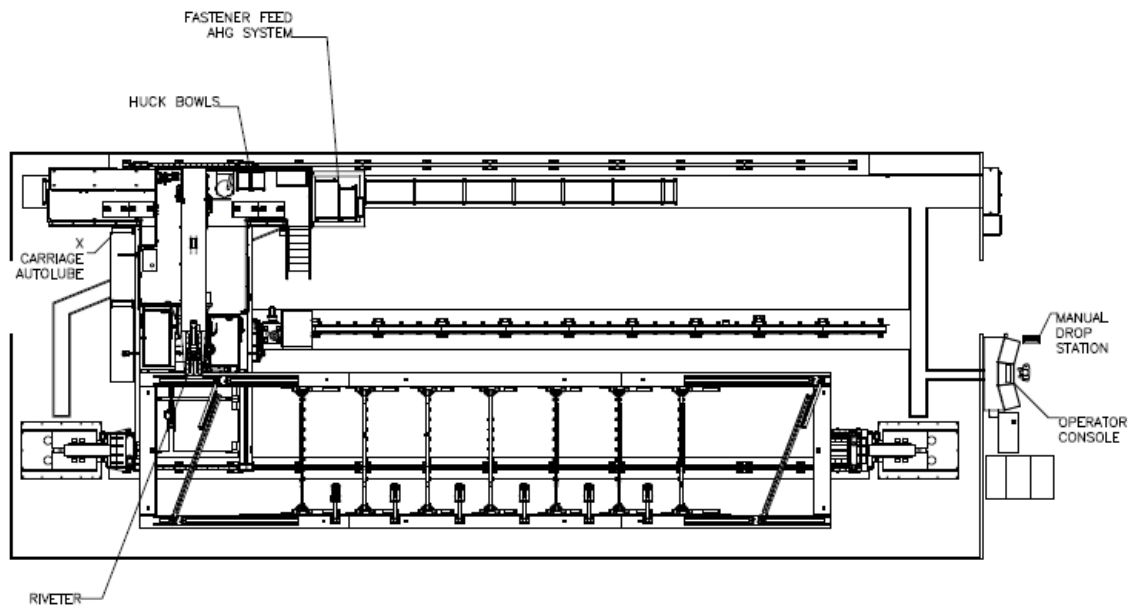


Figura 41- Principais componentes da máquina [39]

### 3.3.6.2- Rebitadora Electroimpact

Uma outra rebitadora encontra-se já integrada e em trabalho nas instalações da Embraer Metálicos S.A. e neste momento atende não só a linha das aeronaves E2, mas também outras linhas. A sua função é exatamente a mesma da da Gemcor, ou seja, efetuar a furação e cravação de fixadores entre os painéis que constituem o revestimento, *stringers* e junta de tração (no caso do revestimento do extradorso) de forma permanente. A sua constituição é semelhante à da máquina da Gemcor, no entanto apresenta algumas diferenças, que são a seguir explicadas.

#### 3.3.6.2.1- Descrição geral da máquina

O modelo E6390 produzido pela Electroimpact, cujos dados técnicos estão disponíveis no anexo B, é constituído por um gabarito flexível assente no chão e um pórtico que contém a rebitadora, tal como pode ser observado na figura 42.

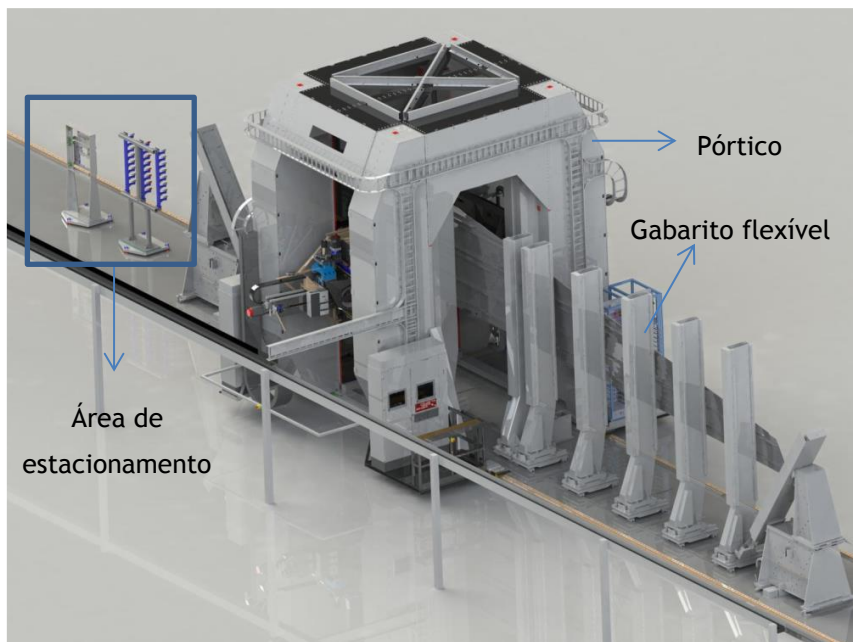


Figura 42- Sistema E6390 da Electroimpact [40]

O gabarito flexível representado permite uma fácil adaptação às diferentes envergaduras das asas. Este é utilizado para posicionar painéis da aeronave na orientação correta e dar contorno aerodinâmico, permitindo que a rebitadora efetue a furação e cravação dos fixadores. Após a correta colocação dos componentes a serem cravados no gabarito, a máquina irá seguir os comandos NC, de forma a seguir as posições de trabalho, em relação aos pontos de referência, sendo assim capaz de efetuar a furação e instalar os fixadores de forma permanente.

Dois trilhos paralelos encontram-se de cada lado do gabarito, de forma a possibilitar o deslocamento do pórtico ao longo da extensão do gabarito, sendo este envolvido pelo próprio pórtico, tal como pode ser visto na figura 42.

O comprimento adicional (ao longo do eixo X, tal como vai ser explicado a seguir) além da extensão do gabarito fornece uma área de estacionamento e manutenção da máquina, bem como uma zona onde é possível efetuar testes em corpos de prova (CDPs), de forma a testar a máquina sempre que é alterada alguma ferramenta.

O pórtico, para além de conter a rebitadora (sistema que é a seguir explicado), carrega todas as ferramentas necessárias aos processos, tendo também alocada a si a plataforma do operador, de forma que este possa acompanhar os mesmos.

A figura 43 ilustra os principais eixos da máquina, para uma melhor compreensão dos mesmos.

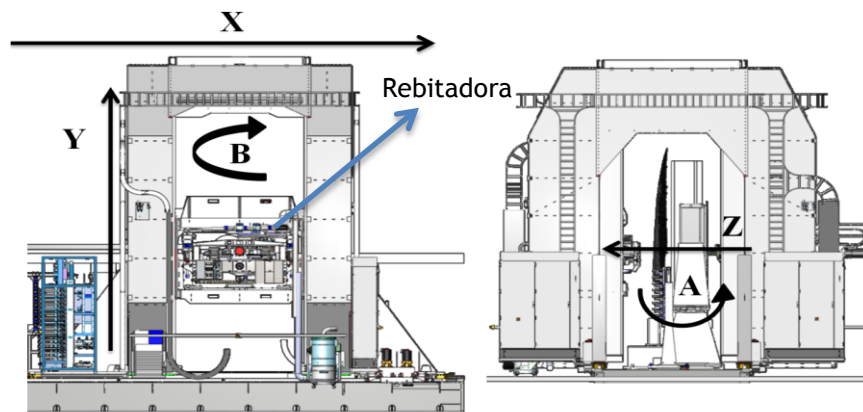


Figura 43- Eixos principais da máquina Electroimpact [40]

Em termos do movimento da máquina, o eixo X indica o movimento horizontal da máquina, ao longo do gabarito onde está assente o painel. O ponto zero encontra-se a meio do gabarito flexível.

O eixo Y indica o movimento vertical da rebitadora e suas ferramentas, ao longo da extensão vertical permitida pelo pórtico, de forma a alcançar todos os pontos necessários no painel.

As operações de furação e cravação têm de ser executadas com os dois *anvils* (*U-anvil* e *V-anvil*, que são em seguida explicados) paralelos, um relativamente ao outro, orientados sempre perpendicularmente à superfície do painel, tal como o demonstrado na figura 44. Ora, como os painéis possuem uma curvatura inconstante ao longo da envergadura, então a máquina foi projetada de forma a criar rotações nestes *anvils* de forma a se obter a orientação correta. Estas orientações são configuradas com os eixos A e B, que se movem de forma independente. Então, o eixo A consiste numa rotação em torno do eixo X, enquanto o eixo B consiste numa rotação em torno do eixo Y.

Assim sendo, os *anvils* movem-se segundo as rotações acima referidas. No entanto, é também possível que eles se aproximem ou afastem do painel. Estes movimentos são efetuados exatamente segundo os eixos U e V, estando sempre dependentes das rotações impostas segundo A e B, pois caso contrário poderá haver risco de colisão entre os componentes da máquina e o produto.

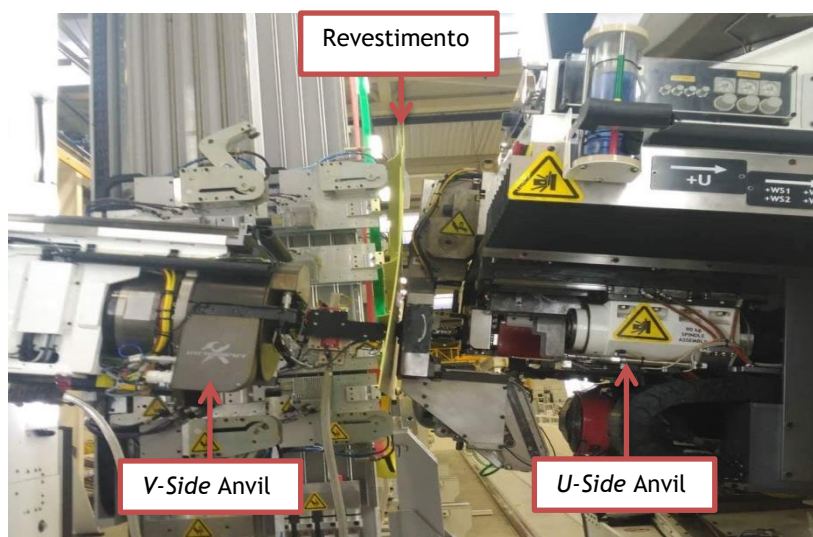


Figura 44- *V-Side Anvil* e *U-Side Anvil* a efetuar a força de *clamp* sobre o revestimento [40]

O eixo Z indica o movimento horizontal das ferramentas da rebitadora, e é perpendicular aos eixos X e Y. Quando as rotações A e B são zero, os movimentos em U e V são perpendiculares a X e Y. Nesta orientação, um movimento do eixo Z é realizado simplesmente movendo os *anvils* U e V na mesma direção. Para orientações nas quais a rotação A ou B é diferente de zero, movimentos corretivos em X e/ou Y são feitos simultaneamente com U e V, para manter as ferramentas numa posição X e Y constante. Este é um eixo “virtual”, uma vez que a sua posição é calculada segundo a posição de outros eixos.

O eixo C encontra-se representado na figura 45 e consiste na rotação do *V-anvil*, de forma que este fique posicionado perpendicularmente aos *stringers*.

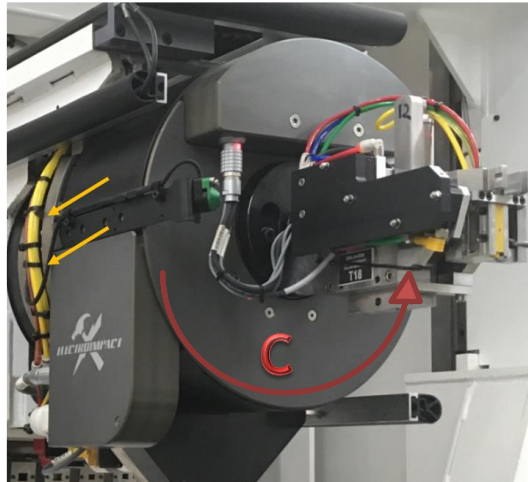


Figura 45- Eixo C da máquina no V-Anvil [40]

### 3.3.6.2.2-Ferramentas de processo

Esta rebitadora tem disponível no lado U, o *U-side anvil* (também chamado de *U-Anvil*), que se encontra representado na figura 44, e é bastante semelhante ao *upper anvil* da Gemcor. Este contém as seguintes ferramentas:

-Duas brocas de furação, denominadas *spindles*, que se encontram localizadas em cada extremidade do *U-Anvil*. Ambas as brocas apresentam o mesmo diâmetro, no entanto diferem no seu comprimento, devido ao facto de poder ser necessária uma broca de comprimento maior, por haver uma espessura do material a furar (*stack*) maior do que a esperada. Todo o conjunto pode ser tratado como uma unidade modular e trocado com relativa facilidade. O seu funcionamento é muito semelhante à da Gemcor e encontram-se representadas nas figuras 46 e 47;

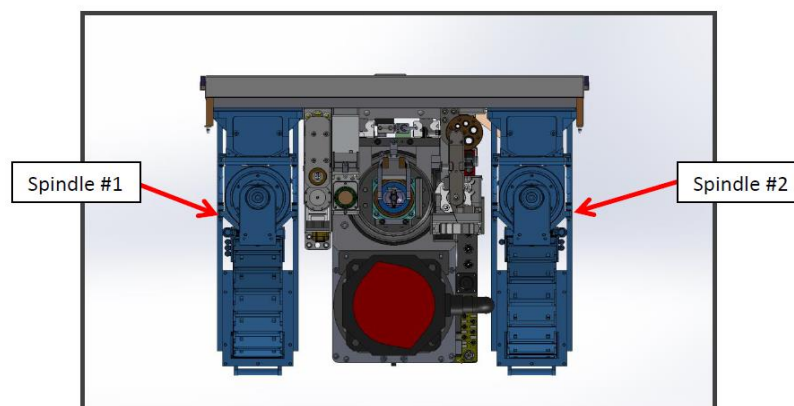


Figura 46- Ilustração da localização das duas brocas de furação e sua nomenclatura [40]

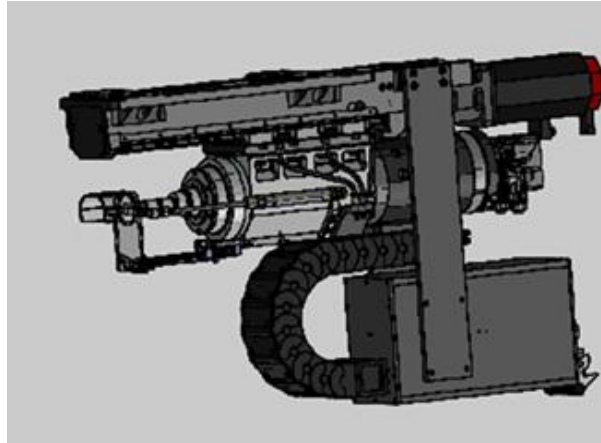


Figura 47- Ilustração de uma das brocas de furação [40]

-*U-driver* corresponde à ferramenta que insere os fixadores nos furos efetuados e encontra-se representada na figura 48. Esta é bastante semelhante ao *Buck Ram* da Gemcor, que também apresenta a mesma função;

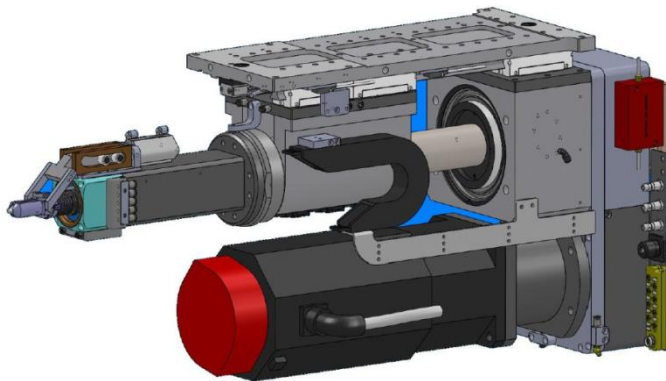


Figura 48- *U-driver* [40]

-Injetor de fixadores, que corresponde às cavidades do *upper anvil* da Gemcor, cuja função é a de fornecer os fixadores ao *U-driver*, para a sua colocação no furo efetuado. Este encontra-se representado na figura 49, e tal como pode ser visto é constituído por várias cavidades, mediante o diâmetro necessário. O fixador é injetado até uma dessas cavidades, sendo recolhido por uma pequena ferramenta denominada *gripper*, e que se encontra representada na figura 49 pelo número 6. Esta efetua uma rotação, ficando posicionada, de forma que o *U-driver* consiga assim recolher o fixador e instalá-lo, logo após a retração do *gripper*;

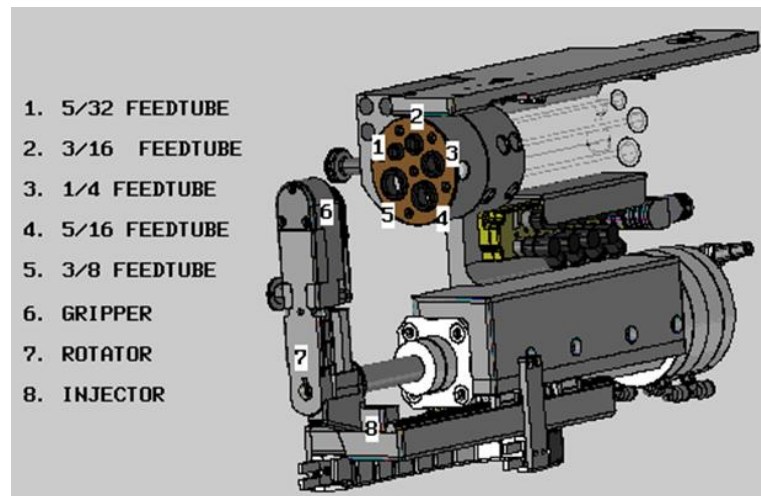


Figura 49- Injetor de fixadores [40]

-Aplicador de selante, que se encontra representado na figura 50, é constituído por uma seringa que se estende e retrai de forma a evitar o vazamento de selante entre cada ciclo. Esta aplica uma quantidade pré-definida de selante no escareado dos furos, imediatamente antes da inserção do fixador. Este tipo de selagem é denominado “selagem de interface” e é explicado no capítulo 3;

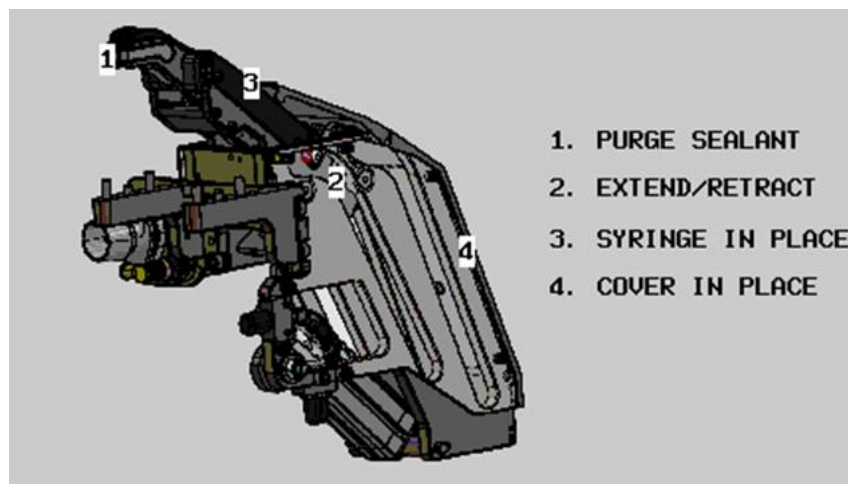


Figura 50- Aplicador de selante [40]

-*Resync Camera*, é um sistema de visão utilizado pela máquina que permite a localização dos *tacks*. Estes funcionam como *datums* da peça de trabalho, reorientando a máquina de acordo com os ajustes necessários, tal como explicado anteriormente. A sua representação encontra-se na figura 51 e uma imagem realista pode ser vista na figura 52 em que a posição a vermelho corresponde ao local onde estava programado encontrar-se o *tack*, mas este na realidade encontra-se mais à esquerda, sendo então necessário fazer um ajuste, denominado *offset*. Este

*offset* tem uma tolerância associada que não pode ser ultrapassada. Esta situação é explicada mais à frente no capítulo 4;

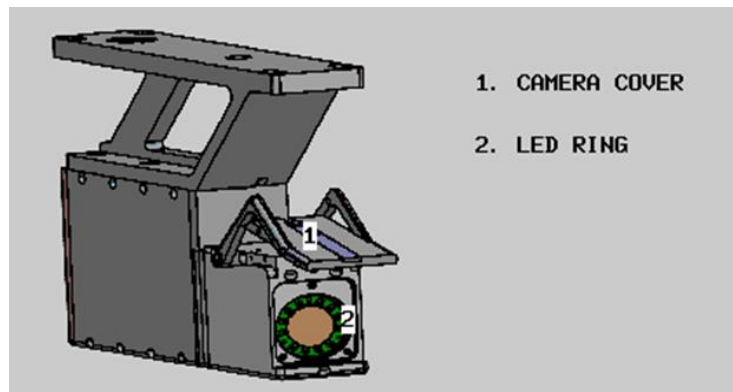


Figura 51- Resync Camera [40]

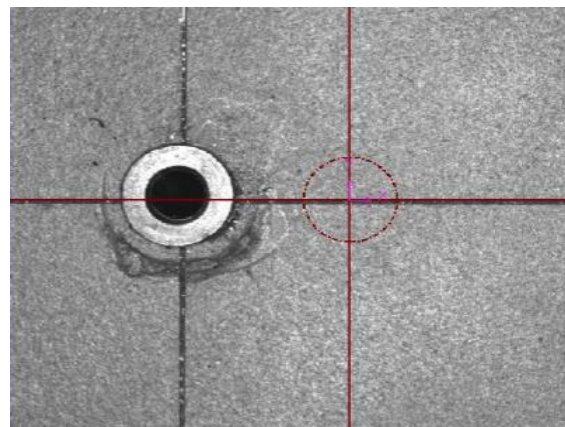


Figura 52- Imagem obtida através da Resync Camera [40]

*Hole probe*, que consiste numa ferramenta que contém duas ogivas para medição do diâmetro dos furos, bem como da profundidade do escareado. Para garantir a sua calibração, um anel-padrão está inserido nesta ferramenta, que se encontra na figura 53 representado pelo número 1 e sempre que se pretende efetuar uma medição, a sonda é primeiro calibrada. Uma medição típica do diâmetro do furo consiste em medições em  $0^\circ$  e  $90^\circ$  em duas profundidades do furo diferentes, sendo isto possível através da rotação da sonda (que se encontra representada na figura 53 pelo número 2).

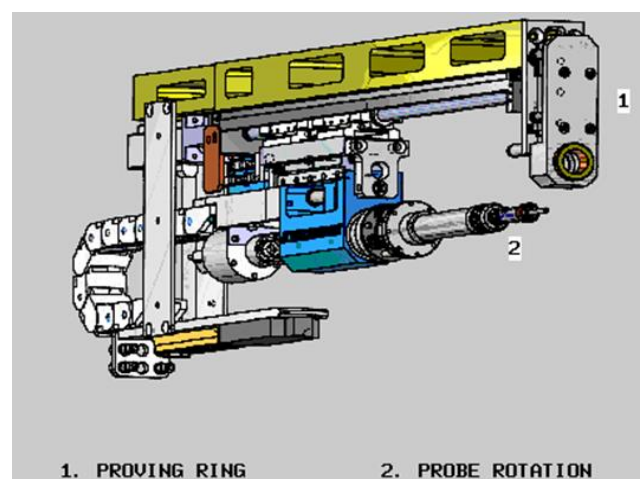


Figura 53- Hole Probe [40]

-Sensores de normalidade, que tal como na Gemcor, são 4 lasers que medem as distâncias, no entanto neste é efetuado segundo o eixo U, garantindo assim a perpendicularidade entre a máquina e o próprio painel (se está perpendicular do lado U, então também estará do lado V, já que estes eixos estão contidos no eixo Z, e qualquer inclinação imposta segundo Z irá afetar ambos os eixos U e V). Estes funcionam exactamente como na máquina da Gemcor, pelo que a sua ilustração é bastante semelhante à da Gemcor (Figura 37), com as diferenças de que o revestimento se encontra na vertical, e a *lower head* (que neste caso corresponde ao *U-side anvil*) se encontra à direita do revestimento.

Já o lado V contém o *V-anvil*, ou *lower anvil* (tal como na Gemcor), que também se encontra representado na figura 44. Este entra em contacto com a parte interior do painel, permitindo segurar o painel, exercendo uma força sobre o mesmo (o denominado *clamp*), bem como entra em contacto com a parte inferior dos fixadores, tal como pode ser também observado na figura 44.

Esta máquina tem dois tipos diferentes de *v-anvil* disponíveis, diferenciando no tipo de fixador que se pretende cravar (os diferentes tipos de fixadores que podem ser utilizados são abordados no capítulo 3).

No caso dos pinos *lockbolt*, é utilizado um *collar anvil*, tal como o representado na figura 54, que instala o colar na parte traseira do fixador.

Este tipo de *anvil* contém um *collar loader*, que se encontra representado na figura 54 pelo número 3 e consiste na ferramenta que carrega o colar pré-definido e o coloca em posição para que o *V-anvil* o consiga inserir no fixador.

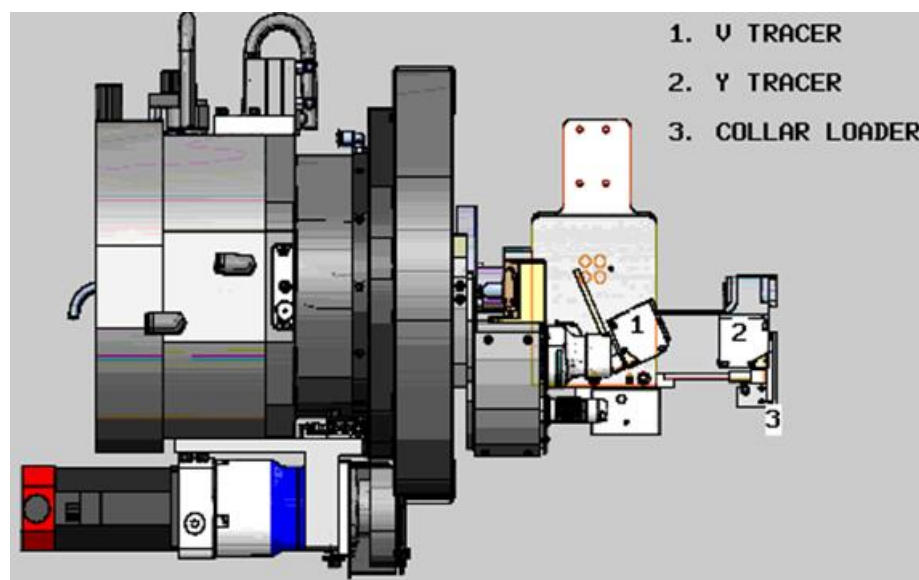


Figura 54- Collar Anvil [40]

No caso dos rebites sólidos, o *anvil* tem como função o esmagamento da contra-cabeça do fixador. Um exemplo encontra-se na figura 55.



Figura 55- Rivet anvil [40]

Ambos os anvils estão equipados por tracers, tal como na máquina da Gemcor, embora tenham uma configuração diferente.

Neste caso, estão disponíveis dois *tracers*, que se encontram localizados em lados opostos da parte do *anvil* utilizada para fazer *clamp* no painel, tal como pode ser visto na figura 56. O *V-Tracer*, que mede a distância segundo o eixo V, melhora a velocidade de fixação no eixo V, medindo a distância até ao *stringer*, enquanto o *Y-Tracer* que mede a distância segundo o eixo Y, aumenta a precisão da margem da borda, medindo a distância até à aba superior do *stringer*, tal como pode ser visto na figura 57. Estas distâncias em Y e V são previamente programadas pelo engenheiro de automação, de forma a evitar colisões entre o *anvil* e o produto, e tem como referência o *tack*. Estas distâncias são em seguida mantidas durante toda a linha de furação, sendo que se houver algum erro na posição do *tack*, esse erro irá ser propagado durante toda a linha, tal como explicado na máquina da Gemcor.

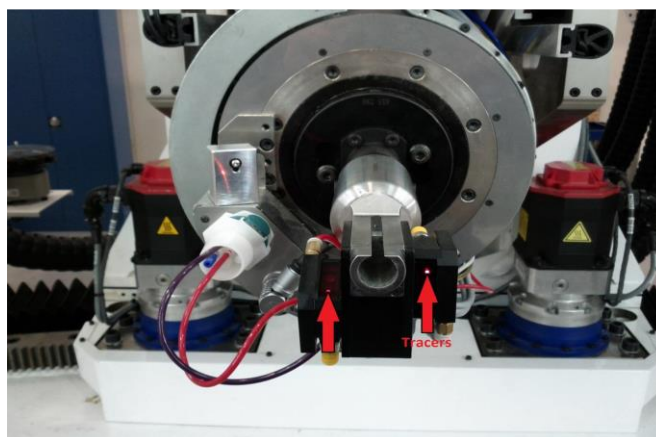


Figura 56- Tracers [40]

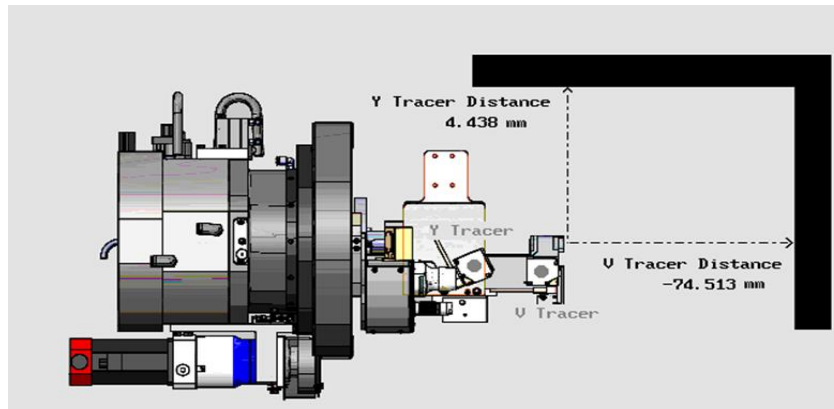


Figura 57- Ilustração da distância alcançada pelos *tracers* [40]

### 3.3.6.3- Principais diferenças

De uma forma geral, a principal diferença entre as duas rebitadoras é que na máquina da Electroimpact, o painel está assente num gabarito, sendo a própria rebitadora que se move ao longo da extensão deste, ou seja, segundo o eixo X, envolvendo-o e ajustando-se à curvatura do painel, movendo os anvils do *U-side* e *V-side* segundo os eixos U e V e criando as rotações A e B necessárias, conseguindo alcançar todos os pontos necessários ao longo da corda da asa, com o auxílio do movimento segundo o eixo Y.

Já na máquina da Gemcor, a *workframe* ajusta-se, fazendo uma rotação em torno do eixo A e criando um determinado ângulo B, mediante a curvatura do painel, enquanto a *C-frame* se move longitudinalmente e transversalmente segundo os eixos X e Y, a *upper head* e a *lower head* apenas efetuam movimento segundo um eixo vertical, de forma ser possível efetuar a furação e cravação.

### 3.3.6.4- Operações efetuadas nas rebitadoras

Tal como explicado anteriormente, a linha de montagem desta família de aeronaves tem duas rebitadoras para efetuar a furação e cravação dos painéis, sendo feito um planeamento prévio para a divisão do trabalho entre cada uma delas.

Então, quando os componentes da asa chegam às rebitadoras, é feita a sua colocação nos gabaritos, de forma a efetuar a furação e cravação, unindo-os assim permanentemente.

É de salientar que nenhuma das rebitadoras efetua a furação e cravação completa da junta de tração, uma vez que a zona imediatamente junto à raiz é de difícil acesso, onde há risco de colisão entre os componentes da máquina com o material, podendo assim danificá-lo. Essa operação é então feita manualmente, de forma a evitar e precaver qualquer problema.

A furação em ambas as rebitadoras é efetuada de uma forma peculiar, tendo em conta que para efetuar a furação o mais corretamente possível, vão ser seguidos dados NC para comandar a máquina para as posições de trabalho em relação aos pontos de referência.

De facto, uma linha de furação tem sempre em conta o pré-furo imediatamente mais próximo, fazendo uma realocização em relação ao programa efetuado, e ajustando as diferenças, criando um *offset*, ou seja, um ajuste.

Melhor explicando, esta realocização consiste numa leitura do *tack* através de uma câmara denominada *Resync Camera*, explicada anteriormente. Após essa leitura, vão ser encontradas diferenças de milésimas de milímetros (se forem diferenças grandes, o algoritmo elaborado nesta dissertação irá detetar essa situação, referindo que a furação não estará bem efetuada, pois pode haver um erro de posicionamento dos pré-furos por parte do fornecedor). Após detetar essa diferença, a própria máquina irá fazer um ajuste (*offset*) a toda a linha de furação, tendo em conta essa diferença. Por exemplo, se a realocização encontrar uma diferença de +0,001mm em x, então toda a furação terá um ajuste de +0,001mm em x (se este ajuste não for bem aplicado a toda a linha de furação, então o algoritmo elaborado também irá detetar a falha no posicionamento da furação). Estes ajustes são feitos por dois componentes da máquina, o *tracer* e os sensores de normalidade, que foram anteriormente explicados. Desta forma, consegue assegurar-se que a linha de centro dos furos se encontra dentro das tolerâncias referidas acima.

As operações que são efetuadas num ciclo de furação e cravação nas máquinas são dadas pelas seguintes etapas:

- 1- *Clamp*, isto é, o *lower* e *upper anvil* da Gemcor, ou *U-side anvil* e *V-side anvil* da Electroimpact, aplicam uma determinada força no painel, de forma a eliminar as folgas existentes.

Quando este ciclo é iniciado:

- 1.1- Os cilindros do *pressure foot* descem até entrarem em contacto com a peça e começam a efetuar a força de *clamp* necessária;
- 1.2- *Lower anvil (V-Anvil)* entra em contacto com o painel;
- 1.3- Medição do *stack*;
- 1.4- Fixador com o *grip* adequado é enviado até ao injetor;
- 1.5- Fixador é injetado para as cavidades do upper anvil, que na Electroimpact correspondem as cavidades do injetor de fixadores.

2- Localização dos pontos de referência, através da *Resync Camera*;

3- Normalização relativamente à superfície do painel, através dos sensores *laser (tracers* e sensores de normalidade);

4- Furação

Para se dar início ao processo de furação, é realizada uma verificação da velocidade da ferramenta antes de iniciar a furação propriamente dita. A partir deste momento é aplicada uma carga no servo-motor da broca, que força a mesma a movimentar-se em direcção ao material com uma taxa de avanço<sup>7</sup> pré-determinada.

A *upper head (U-side anvil)* efetua a furação e o escareado<sup>8</sup> para o fixador pré-definido. Após o recuo da broca, o motor linear move o conjunto de transferência para a posição de inserção do fixador.

5- Medição dos parâmetros relativos ao furo

Após o processo de furação, torna-se necessário verificar se o diâmetro do furo, bem como a profundidade do escareado ficaram conforme os pré-requisitos. Para tal, a *hole probe* efetua a medição, tal como explicado anteriormente.

Esta inspeção tem lugar conforme definido pela Engenharia de Qualidade e programado na máquina, mas por norma efetuam-se medições numa primeira amostra de furos e depois é escolhido um intervalo de medição, por exemplo, de 10 em 10 furos, tal como já explicado.

6- Aplicação de selante

Em seguida é aplicado o selante no furo, de forma a garantir um bom isolamento entre o fixador e o material. Em seguida, dá-se então início ao processo de cravação.

7- Cravação

No caso da Gemcor, o *buck ram* insere o fixador no furo efetuado e o *upper anvil* empurra a cabeça do rebite, enquanto o encalque do colar é realizada pelo *lower anvil*. Em seguida, o conjunto de transferência retorna para a posição de furação para iniciar o próximo ciclo.

Já no caso da Electroimpact, o gripper efetua então a rotação necessária para que o *U-driver* consiga recolher o fixador e instalá-lo. O encalque do colar é efectuado pelo *V-side Anvil*.

---

<sup>7</sup> **Avanço** corresponde ao deslocamento longitudinal observado durante cada rotação do veio principal da máquina [22].

<sup>8</sup> **Escarear** consiste em alargar superficialmente um furo onde será introduzido um fixador, de forma a que a sua cabeça fique nivelada com a superfície.

Todas estas operações são programadas previamente por um engenheiro de automação, através de um *software* específico. Esta programação é feita *offline*, de forma a ser possível realizar uma simulação para visualização e validação dos movimentos do equipamento, evitando assim possíveis colisões com o produto, tendo em conta posições pré-determinadas, pois a máquina não consegue aceder a todos os pontos do produto, correndo o risco de haver colisão com o próprio gabarito onde é assente o produto (gabarito de rebitagem automática, tal como referido na secção 3.3.2). Então, para tal a programação é dividida em posições diferentes, havendo um movimento dos componentes dos gabaritos, de forma a serem efetuadas as operações de furação e cravação em todo o produto, mesmo nas partes onde a princípio era impossível o acesso.

# Capítulo 4: Caso de estudo: testes de *pen marking*

## 4.1- Diagrama de causa efeito (Ishikawa)

Este diagrama consiste numa ferramenta gráfica utilizada pela Embraer para representar a relação entre um efeito e as causas que o influenciam. Na sua estrutura, as prováveis causas dos problemas (efeitos) podem ser classificadas como sendo de seis tipos diferentes quando aplicada a metodologia 6M:

-Método: todas as causas que envolvem o método que estava a ser executado no trabalho;

-Material: todas as causas que envolvem o material que estava a ser utilizado no trabalho;

-Mão de obra: todas as causas que envolvem uma atitude do colaborador (ex: comportamento inadequado, não seguimento do processo, pressa, imprudência, ato inseguro, etc.);

-Máquina: todas as causas que envolvem a máquina que estava a ser utilizada;

-Medição: todas as causas que envolvem os instrumentos de medida, a sua calibração, a efetividade de indicadores em mostrar as variações de resultado, se o acompanhamento está a ser realizado, se ocorrem na frequência necessária, etc.

-Meio ambiente: todas as causas que envolvem o meio ambiente em si (temperatura, poluição, poeira, etc.) e ambiente de trabalho (*layout*, falta de espaço, dimensionamento inadequado dos equipamentos, etc.).

O intuito desta ferramenta é o de:

-Ajudar a identificar as características-chave de parâmetros-chave do processo;

-Esclarecer as várias causas que afetam um processo;

-Ajudar a equipa a alcançar um consenso quanto à análise de um problema;

-Revelar falhas existentes quanto ao suposto conhecimento de um problema;

-Reduzir a possibilidade de formar opiniões subjetivas.

Ora, no caso desta dissertação, o efeito é o de garantir que a furação efetuada pela rebitadora se encontra dentro das tolerâncias impostas durante o projeto. Então, para tal é necessário

garantir que todas as etapas que lhe são diretamente associadas foram efetuadas com rigor, tal como pode ser analisado na figura 58.

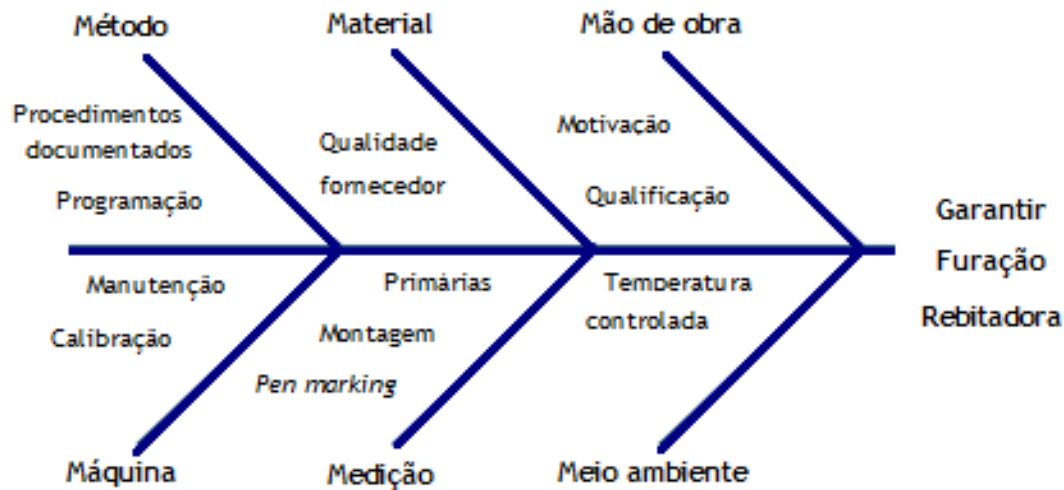


Figura 58- Diagrama de causa efeito (Ishikawa) para garantir o processo de furação da rebitadora [32]

Reverendo de uma forma resumida todas as etapas dos processos de fabricação e montagem dos componentes da asa, vem em primeiro lugar a seleção da matéria-prima. Torna-se então necessário garantir que o material utilizado apresenta todas as características necessárias para a função pretendida.

Ao passar para a fase da maquinação através das máquinas CNC, é preciso garantir que a programação foi bem efetuada e, através da medição da espessura do material, efetuada por ultrassons, garantir que a peça maquinada fica dentro das tolerâncias impostas. Se o material tiver dimensões diferentes do projeto, isso irá influenciar o processo de furação e cravação da rebitadora, uma vez que os fixadores necessários são pré-estabelecidos conforme o tamanho do *stack* (tal como explicado na secção 3.3.4.1 e pode ser visto nas operações efetuadas pelas rebitadoras, na secção 3.3.6).

Quando os *stringers* chegam à Embraer, é importante que o fornecedor tenha garantido a qualidade dimensional da peça, principalmente o posicionamento dos pré-furos, uma vez que a posição das linhas de furação tem por base estes pré-furos. Se este requisito não for confirmado, toda a furação e montagem poderá estar em causa, tal como explicado na secção 3.3.6. Já na fase de montagem é imperial garantir o posicionamento de todos os componentes conforme os requisitos, tal como explicado na secção 3.3.3 referente à linha de montagem.

Por fim, quando os componentes chegam à rebitadora, é necessário garantir que a programação terá sido bem efetuada, de forma a efetuar a furação nos locais pré-definidos. Para tal, também é necessário efetuar a manutenção à máquina, garantindo que esta se encontra calibrada, isto é, que a sua exatidão continua de acordo com as especificações do fabricante.

De uma forma geral é necessário que toda a equipa siga os procedimentos documentados, garantindo sempre o cumprimento de todas as normas em vigor. É também necessário ter uma mão de obra qualificada e motivada, de forma a que os trabalhos efetuados pelos operadores sejam feitos com rigor. De facto, os operadores têm um lugar muito importante em todas as fases dos processos de fabricação e montagem, uma vez que há muitas operações que são efetuadas manualmente, como é o caso da pré-montagem dos *stringers* aos painéis, da operação da rebitadora, que apesar de efetuar a furação e cravação dos fixadores de forma automática, é necessário ter um operador a comandar a máquina, dando-lhe as indicações necessárias, como por exemplo, qual o programa e posição que a máquina deve seguir, garantir que não há nenhuma colisão entre a máquina e o produto, efetuar realocização manual quando a *Resync Camera* não encontra o pré-furo, etc.

O meio em que se trabalha também é importante, uma vez que o material dilata com temperaturas elevadas, o que influencia a furação, pelo que é necessário que a temperatura ambiente seja controlada.

De facto, todos os processos têm de ser garantidos de forma a que o objetivo final seja atingido, que neste caso é o da correta furação através da rebitadora. Porém, este sistema aplica-se a todos os processos de montagem e fabricação de uma aeronave. Pois para garantir que a aeronave voa em segurança é necessário que todos os processos que lhe são associados, bem como todos os componentes que são integrados, cumpram todos os requisitos de qualidade.

Então, esta dissertação irá focar-se principalmente nas partes de verificação da programação da máquina, bem como o funcionamento da própria máquina, por exemplo se esta se encontra calibrada, e na verificação do posicionamento dos pré-furos efetuados pelo fornecedor. Para tal, são elaborados os testes de *pen marking*, cuja funcionalidade é a seguir explicada, de forma a assegurar que a furação (e posterior cravação) se encontra correta, dentro dos limites de tolerância.

## 4.2- Testes de *pen marking* e sua validação manual

Estes testes têm como objetivo verificar se o local onde será efetuada a furação se encontra tal como projetado. Para tal, a rebitadora em vez da broca de furação, tem uma caneta e vai percorrer todo o programa, fazendo marcas (daí o nome *pen marking*) no local onde está programada a furação.

Esta simulação permite aos engenheiros de qualidade confirmarem se os programas funcionam da forma prevista, sendo possível corrigir todos os erros que aparecerem sem danificar o material, ou seja, evita uma furação defeituosa no produto, evitando assim gastos desnecessários e problemas decorrentes desse defeito. Sendo que apenas se todos os pontos efetuados em *pen marking* estiverem dentro destas tolerâncias, é que se poderá dar início aos processos de furação e cravação nos revestimentos, estando assim garantida a correta calibração da máquina.

Este teste é feito quando se pretende testar o funcionamento da própria máquina, o que acontece por exemplo quando a máquina é nova, quando foi alterada alguma ferramenta, ou quando vai ser inserido um modelo de revestimento que nunca esteve na máquina.

A validação destes testes na parte do interior do revestimento tem sido feita até agora de uma forma manual com recurso a um paquímetro, tal como pode ser observado nas figuras 59 e 60, e consiste em verificar o passo entre cada furo e a distância até às bordas, de forma a verificar se todas as cotas se encontram conforme o projeto. As tolerâncias para estes parâmetros encontram-se na norma NE 03-006 em anexo, tal como referido na secção 3.3.4, referente à Furação e Cravação.

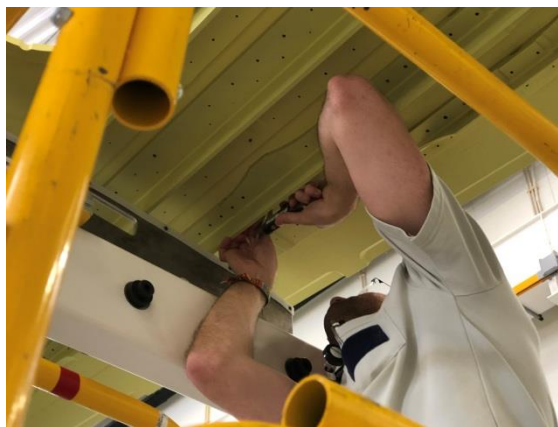


Figura 59- Validação com recurso a paquímetro [32]



Figura 60- Exemplo das condições pouco ergonómicas da validação manual [32]

Relativamente à parte exterior do revestimento, a validação é efetuada com auxílio do cronaflex, um papel vegetal onde são impressos os desenhos em 2D dos painéis, permitindo a localização dos furos, tal como representado na figura 62. É feita uma comparação entre a localização real e a teórica, podendo assim ser verificada a posição de todos os pontos, relativamente à parte exterior do revestimento.

São utilizados dois tipos de validação diferentes relativamente ao interior e exterior do revestimento, uma vez que poderão ser encontradas diferenças, como por exemplo, uma das ferramentas não conseguir aceder a determinada zona, por embater em algum componente. Um exemplo de uma situação destas é retratado na secção 5.1 relativa aos resultados obtidos na implementação do algoritmo desenvolvido.

No entanto, estes processos de validação manual têm alguns problemas associados, como é o caso:

- proporcionam condições pouco ergonómicas e arriscadas aos trabalhadores, tal como pode ser observado nas figuras 60 e 61, uma vez que para conseguirem aceder a todos os pontos do painel são necessários auxílios, como plataformas;

- processos morosos, em média estes testes demoram 3 dias a ser validados, o que constitui uma paragem demasiado extensa para uma linha de montagem;

- tem muitos erros associados, como é o caso do erro na colocação do cronaflex no revestimento, bem como erros da sua própria impressão, erros associados à medição manual com recurso ao paquímetro e ainda os erros do próprio paquímetro. Estes erros todos somados poderão causar um grande impacto posteriormente, tendo em conta que a indústria aeronáutica trabalha com tolerâncias muito refinadas, poderá causar por exemplo uma validação e aceite defeituoso dos testes, dando início ao processo de furação, que ficará também defeituoso.

Aqui surge então a elaboração desta dissertação, uma vez que esta validação manual era um processo com bastantes restrições. Com o cumprimento das metas definidas no primeiro capítulo, este processo torna-se muito mais preciso, rápido e seguro.



Figura 61- Exemplo de condições pouco ergonómicas [32]

### 4.3- Conceito

A ideia para a realização do algoritmo consiste em comparar as coordenadas reais e programadas dos pontos onde foi efetuado o *pen marking*, tal como pode ser verificado na figura 62.

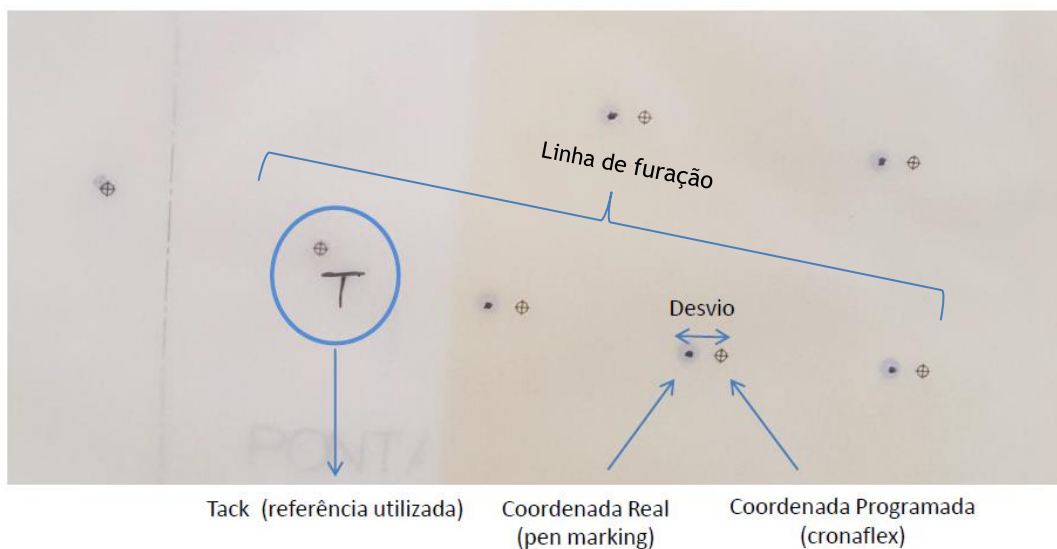


Figura 62- Validação do pen marking com auxílio do cronaflex [32]

A furação ou marcações através do *pen marking* têm como referência o *tack*, de tal forma que a *Resync Camera* verifica o seu posicionamento e efetua a linha de furação mediante o desvio encontrado, que neste caso é denominado de *offset*, ou seja, a diferença entre a coordenada programada e real deste ponto.

Para o *pen marking* ser validado, terá de estar de acordo com os requisitos pré-definidos pela Engenharia de Qualidade, isto é, tem de ser verificada a posição do *tack*, bem como o passo e a borda têm de estar segundo as tolerâncias referidas no capítulo 3. Para tal, são comparados os valores dos *offsets*, mediante estas tolerâncias. Se todos estes parâmetros forem verificados, então a máquina encontra-se calibrada e o *pen marking* é aceite, podendo assim dar-se início à furação e posterior cravação.

## 4.4- Algoritmo

O algoritmo, que se encontra no anexo F, foi elaborado com recurso ao programa VBA - Visual Basic for Applications® aplicado aos dados fornecidos pela máquina da Electroimpact, denominados *LOGs*.

De uma forma geral, este algoritmo consiste em criar uma *MACRO* com os comandos pretendidos para aplicar ao ficheiro proveniente dos *LOGs* da máquina, denominado *Production Data*.

Este contém todas as informações relativas ao funcionamento da mesma, tais como as coordenadas reais e programadas, identificação dos *tacks*, identificação do tipo de ferramenta utilizado, descrição do tipo de função efetuada, ou seja, se se trata de furação, ou teste de *pen marking*, e quando efetua furação apresenta todos os parâmetros relativos ao furo, como é o caso do diâmetro do furo e profundidade do escareado, medidos através da *hole probe*.

O *Production Data* trata-se de um *Ficheiro de Valores Separados por Vírgulas do Microsoft Excel®*, logo o primeiro comando do algoritmo consiste em colocar todos estes dados em colunas, de forma a permitir uma análise mais fácil e intuitiva dos mesmos.

Em seguida torna-se importante calcular o número de linhas referentes aos dados, de forma a determinar a quantidade de pontos que foram marcados nos testes, para que os cálculos efetuados sejam aplicados a todos os pontos.

De forma a permitir uma análise mais intuitiva de todos os cálculos que são necessários para a validação dos pontos, é em seguida criada uma nova folha de cálculo, denominada “Calculo”.

Posto isto, é necessário transferir todos os dados necessários para efetuar os cálculos nesta mesma folha, de forma a facilitar uma posterior análise. Para este caso, são necessárias as coordenadas programadas (*programmed*) e reais (*toolpoint*) relativamente a X e Y (uma vez

que estas coordenadas já se encontram ajustadas e são referentes à localização do próprio furo, não sendo por isso necessária a coordenada Z, que corresponde ao movimento das ferramentas na horizontal, tal como referido na secção 2.3.5.2.1), bem como a identificação do pré-furo, ou seja, do *tack*, tal como o apresentado na figura 63.

Após isto, são inseridos todos os nomes correspondentes a cada uma das colunas que contêm as variáveis que se pretende calcular e esta linha é fixada, de forma que a análise dos dados seja mais fácil. Assim sendo, pode agora dar-se início aos cálculos necessários para a validação.

	Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	
Tack de referência 1	1	-8372.977	-8372.977	2039.455	2039.442	Linha de furação 1
	0	-8396.694	-8396.693	2039.584	2039.125	
	0	-8420.41	-8420.409	2039.713	2039.258	
	0	-8447.323	-8447.321	2039.859	2039.51	
	0	-8473.136	-8473.136	2039.999	2039.603	
	0	-8498.949	-8498.946	2040.138	2039.677	
	0	-8524.762	-8524.762	2040.278	2039.82	
	0	-8550.575	-8550.574	2040.418	2039.99	
	0	-8579.175	-8579.173	2040.573	2040.187	
Tack de referência 2	1	-8633.41	-8633.41	2194.959	2194.949	Linha de furação 2
	0	-8608.158	-8608.158	2194.692	2194.591	
	0	-8582.781	-8582.781	2194.424	2194.324	
	0	-8557.404	-8557.404	2194.156	2194.028	
	0	-8532.027	-8532.027	2193.887	2193.756	
	0	-8506.651	-8506.651	2193.618	2193.396	
	0	-8481.273	-8481.272	2193.347	2193.128	
	0	-8455.143	-8455.143	2193.117	2193.111	
	0	-8431.42	-8431.418	2192.82	2192.844	

Figura 63- Dados necessários para efetuar todos os cálculos [32]

Como dito anteriormente, em primeiro lugar torna-se necessário verificar se o posicionamento do *tack* se encontra dentro da tolerância imposta. Esta tolerância refere-se ao deslocamento linear da linha de centro do pré-furo e é especificado pela norma NE 03-071 como sendo de  $\pm 1$ mm. De facto, esta norma refere-se a peças usinadas, que é exactamente aquilo que acontece com os *stringers*, uma vez que são estes que possuem os pré-furos e a montagem inicial é feita através destes, tal como referido no capítulo 3.

Então, tendo as coordenadas reais e programadas de X e Y relativamente ao *tack*, têm em primeiro lugar de ser calculados os desvios entre estas. Assim, vêm as equações 4.1 e 4.2.

$$\text{Offset } X_i = X_{i,\text{real}} - X_{i,\text{programado}} \quad (4.1)$$

$$\text{Offset } Y_i = Y_{i,\text{real}} - Y_{i,\text{programado}} \quad (4.2)$$

Em que  $i$  corresponde a cada uma das linhas de identificação dos pontos.

Em seguida, vem que a diferença entre a posição real e a programada do ponto é dada pela hipotenusa criada entre *offsets* de  $x$  e  $y$ , tal como pode ser visto na figura 64. Esta será aqui denominada de *vetor tack* e terá de estar dentro da tolerância imposta para o posicionamento linear da linha de centro do furo. Ora como se trata de uma distância, o seu valor vem em módulo, pelo que a tolerância aplicada será também em módulo, ou seja, esta hipotenusa terá de ter uma dimensão igual ou inferior a 1 mm e igual ou superior a zero.

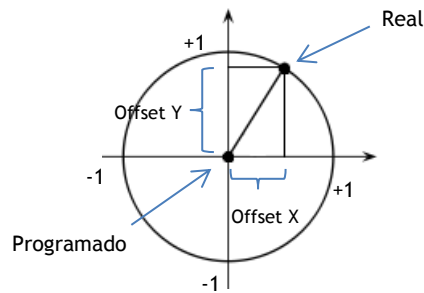


Figura 64- Tolerância de posicionamento do *tack*

Para tal, vamos ter:

$$\text{Vetor tack}_i = \sqrt{(\text{Offset } X_i)^2 + (\text{Offset } Y_i)^2} \quad (4.3)$$

E, tal como referido, tem de estar compreendido entre os seguintes valores:

$$0 \leq \text{Vetor tack}_i \leq 1 \quad (4.4)$$

Aplicando esta lógica no algoritmo, este será capaz de avaliar a tolerância de posicionamento de todos os *tacks*, indicando se se encontram válidos ou não. Ora, se o posicionamento do *tack* se encontrar fora da tolerância, toda a linha dos pontos estará também fora do especificado, já que este ponto serve de referência a todos os outros, havendo assim uma propagação do erro, tal como explicado no caso 4 da secção 5.1 relativa aos resultados.

Em seguida pretende-se verificar se o passo se encontra dentro da tolerância imposta. Para tal, no algoritmo calcula-se em primeiro lugar os passos real e programado em relação a cada um dos pontos de referência de cada linha de furação, que neste caso é o *tack*.

$$\text{Passo Real}_i = X_{i,\text{real}} - X_{\text{tack } j, \text{ real}} \quad (4.5)$$

Em que  $j$  se refere ao *tack* de referência de cada uma das linhas de furação, tal como explicado na figura 63.

Já em relação ao passo programado, vem:

$$\text{Passo Programado}_i = X_{i,\text{prog}} - X_{\text{tack } j, \text{ programado}} \quad (4.6)$$

Após isto, é calculada a diferença entre os passos, que aqui é denominada *delta passo*. Este raciocínio encontra-se esquematizado na figura 65, para melhor compreensão.

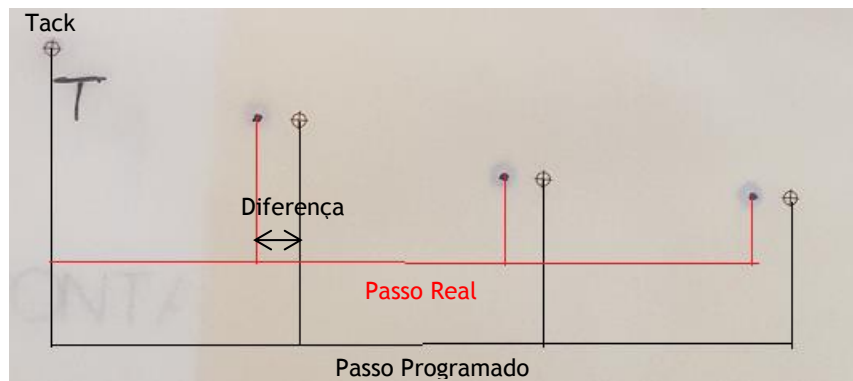


Figura 65- Diferença entre o passo real e programado visível no cronaflex [32]

Então, matematicamente vem:

$$\text{Delta Passo}_i = \text{Passo Real}_i - \text{Passo Programado}_i \quad (4.7)$$

Tal como referido no capítulo 3, e pode ser consultado no anexo C, a tolerância associada à diferença entre os passos real e programado é de  $\pm 1\text{mm}$ . Então, é aplicada essa condição no algoritmo, de forma a verificar se todos os pontos apresentam um passo conforme os requisitos e identifica os pontos que se encontram fora da tolerância.

$$-1 \leq \text{Delta Passo}_i \leq 1 \quad (4.8)$$

Em seguida pretende-se verificar se a borda de todos os pontos se encontra dentro da tolerância estipulada que, tal como foi referido também no capítulo 3 e se encontra no anexo C, é de  $\pm 0,8\text{mm}$ . De facto, na norma é especificada a distância desde cada ponto até às bordas da peça, no entanto, esta tolerância também pode estar associada aos desvios (*offsets*) de X e Y em relação aos pontos reais e programados, uma vez que se garantirmos que estes desvios estão dentro da tolerância  $\pm 0,8\text{mm}$ , então as distâncias à borda também estarão. De facto, têm de ser considerados os *offsets* de cada ponto, uma vez que são feitos ajustes a cada um dos pontos, através dos *tracers* e sensores de normalidade.

Caso se verifique que a borda em X se encontra fora da tolerância definida, então é necessário averiguar em que zona essa linha de furação se encontra na asa, pois se estiver realmente na zona da borda da peça, como por exemplo na borda do *stringer*, então haverá realmente uma perda de borda, colocando em risco a sua qualidade.

Assim sendo, vem:

$$\text{Borda } X_i = \text{Offset } X_i \quad (4.9)$$

$$\text{Borda } Y_i = \text{Offset } Y_i \quad (4.10)$$

Então, no algoritmo, após serem calculados os *offsets* X e Y entre os pontos reais e programados, segundo as equações 4.1 e 4.2, respectivamente, é em seguida aplicada a condição de que estes valores têm de estar compreendidos entre  $\pm 0,8$  mm, ou seja:

$$-0,8 \leq \text{Offset } X_i \leq 0,8 \quad (4.11)$$

$$-0,8 \leq \text{Offset } Y_i \leq 0,8 \quad (4.12)$$

Posto isto, já foram verificados todos os parâmetros necessários para a validação dos testes de *pen marking*, repetindo, o posicionamento do *tack*, passo e borda. No entanto, só é obtida a aprovação de cada um dos pontos de marcação quando estes três parâmetros são validados simultaneamente. De facto, basta que apenas um dos parâmetros falhe para que o *pen marking* não seja validado. Então, o passo seguinte do algoritmo consiste em colocar a condição de que se e só se os três parâmetros estiverem válidos, os pontos de marcação são aceites.

Finalmente, para uma interpretação mais fácil e eficiente, pretende-se que este resultado final seja traduzido num gráfico de pontos, sendo distinguidos por cores acordo com os requisitos, permitindo assim a sua localização aproximada na asa.

Para tal, foi criada uma nova folha para inserir este gráfico, denominada “Gráfico”. Em seguida foi escolhido o tipo de gráfico pretendido, que neste caso corresponde a um gráfico de dispersão, cujas variáveis X e Y correspondem às coordenadas programadas, uma vez que o que se pretende é a verificação das mesmas, sendo que as reais podem estar de acordo com estas ou não. De facto, tal como analisado no capítulo seguinte, acontece a situação em que há coordenadas programadas, no entanto não há coordenadas reais. Isso é devido ao facto de a máquina não ter efetuado *pen marking* desses pontos. Torna-se então importante no gráfico colocar as coordenadas programadas, sendo que as reais poderão estar em falta.

De seguida, foram definidos vários atributos no gráfico, como é o caso de inserir e denominar os eixos, bem como o título. Optou-se por retirar a legenda ao gráfico, uma vez que esta correspondia às coordenadas de cada um dos pontos, tornando assim a análise do gráfico bastante confusa.

Para que este gráfico possa conter todos os pontos de marcação, foram dimensionados os eixos X e Y de acordo com as dimensões reais dos eixos da máquina. Isto é, o eixo Y fica definido de 0 até 4000 mm. Já o eixo X fica definido no intervalo de -15.000 a 15.000 mm.

O tamanho do gráfico foi também especificado, para que quando o algoritmo for aplicado aos *LOGs*, o resultado visual seja o melhor possível.

Por último, foram alteradas as especificações dos modificadores (que correspondem aos pontos no gráfico), como foi o caso do seu tamanho, forma e cor, de forma a permitir uma análise

visual mais intuitiva, sendo assim mais fácil distinguir quais os pontos que se encontram dentro e fora das especificações, uma vez que estes estão coloridos a verde e vermelho, respetivamente.

Com a análise dos resultados provenientes deste algoritmo, torna-se assim mais fácil e intuitivo verificar como se encontram posicionados os pontos de marcação, sendo assim possível analisar a sua localização aproximada na asa, bem como é possível verificar quais os parâmetros que se encontram fora do especificado.

Após esta avaliação, se tudo estiver conforme os requisitos, ou se os parâmetros que se encontram fora do especificado forem aceites pela Engenharia da Qualidade, poderá então passar-se à furação e cravação dos fixadores no próprio produto, não correndo o risco de danificar o material.

# Capítulo 5: Resultados

## 5.1- Resultados obtidos

Após a elaboração deste algoritmo, foi necessário testá-lo para verificar se realmente ele ia de encontro ao objetivo pretendido.

Aplicando este algoritmo aos dados fornecidos pela máquina da Electroimpact na realização de testes de *pen marking* a uma parte do revestimento do intradorso da aeronave E190-E2 foi obtido gráfico representado na figura 66. De facto, os pontos testados correspondem apenas a uma parte do revestimento, e não à sua totalidade, pois foi esta parte que se pretendeu verificar pela Engenharia de Qualidade.

Este gráfico permite analisar visualmente os resultados obtidos através da aplicação do algoritmo aos LOGs da máquina, permitindo uma identificação mais fácil e intuitiva dos pontos não conformes, sendo possível, arrastando o cursor, identificar as coordenadas dos pontos, tal como pode ser observado na figura 67.

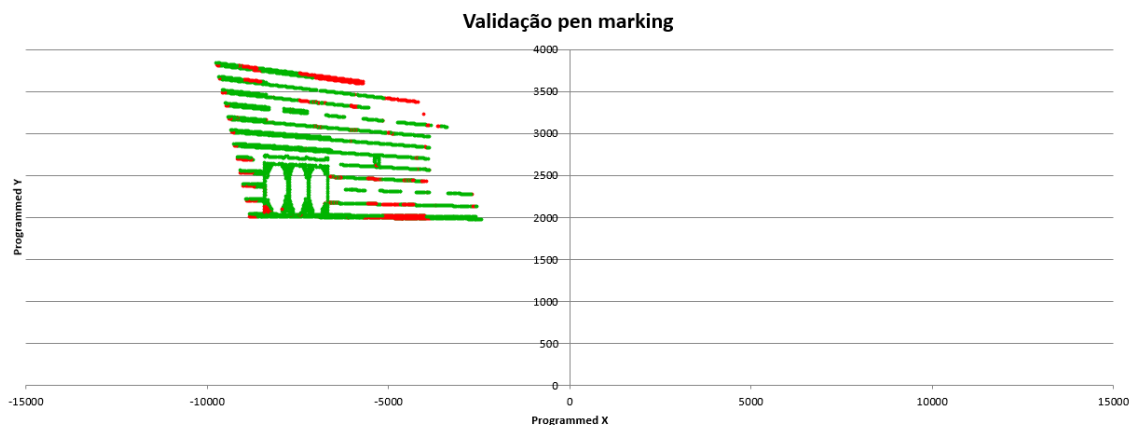


Figura 66- Gráfico obtido através do algoritmo

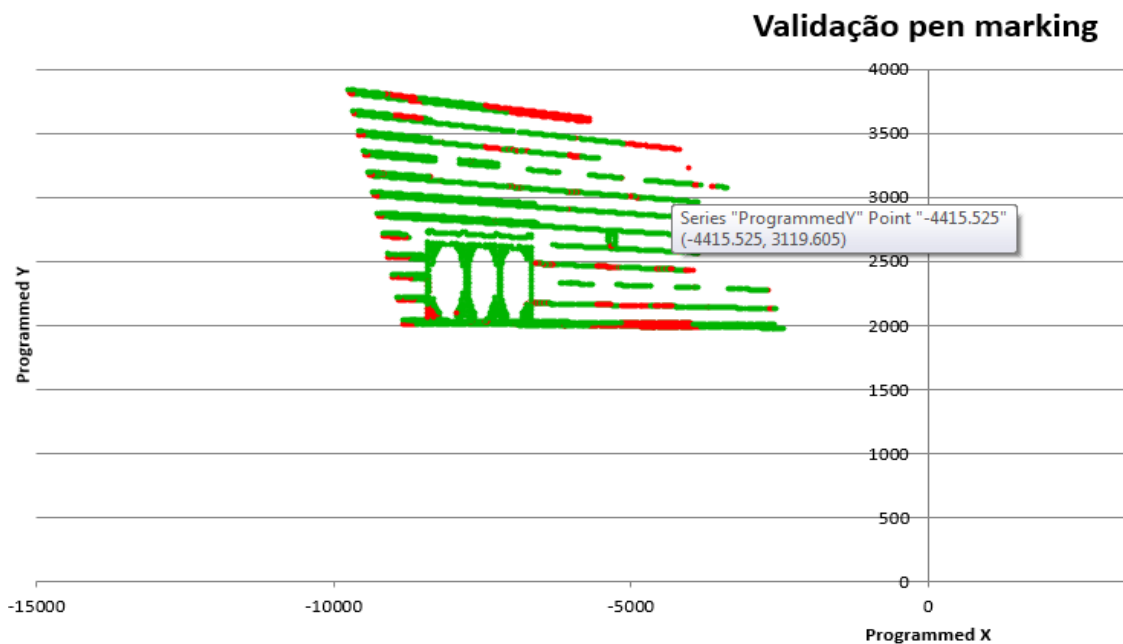


Figura 67- Identificação das coordenadas dos pontos no gráfico

Para uma análise mais detalhada, recorrendo ao separador “Calculo”, tal como representado na figura 68, podem ser verificados todos os parâmetros, averiguando todos os valores e verificando o que se encontra dentro ou fora das tolerâncias.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	Offset X	Offset Y	Vetor tack	Passo real	Passo prog	Delta passo	Borda X	Borda Y	Tol. Tack	Tol. Passo	Tol. Borda X	Tol. Borda Y	Estado do ponto
2	1	-7774.016	-7774.017	2009.353	2009.336	-0.001	-0.017	0.017029	0	0	-0.001	-0.017	0.416	OK	OK	OK	OK	OK
3	0	-7746.57	-7746.568	2009.203	2009.619	0.002	0.416		-27.449	-27.446	-0.003	0.002	0.416	OK	OK	OK	OK	OK
4	0	-7719.124	-7719.122	2009.054	2009.356	0.002	0.302		-54.895	-54.892	-0.003	0.002	0.302	OK	OK	OK	OK	OK
5	0	-7691.678	-7691.678	2008.905	2009.224	0	0.319		-82.339	-82.338	-0.001	0	0.319	OK	OK	OK	OK	OK
6	0	-7664.232	-7664.232	2008.756	2009.063	0	0.307		-109.785	-109.784	-0.001	0	0.307	OK	OK	OK	OK	OK
7	0	-7636.786	-7636.785	2008.607	2008.947	0.001	0.34		-137.232	-137.23	-0.002	0.001	0.34	OK	OK	OK	OK	OK
8	0	-7609.341	-7609.34	2008.458	2008.773	0.001	0.315		-164.677	-164.675	-0.002	0.001	0.315	OK	OK	OK	OK	OK
9	0	-7581.895	-7581.894	2008.309	2008.628	0.001	0.319		-192.123	-192.121	-0.002	0.001	0.319	OK	OK	OK	OK	OK
10	0	-7554.448	-7554.447	2008.159	2008.479	0.001	0.32		-219.57	-219.568	-0.002	0.001	0.32	OK	OK	OK	OK	OK
11	0	-7527.002	-7527.001	2008.01	2008.346	0.001	0.336		-247.016	-247.014	-0.002	0.001	0.336	OK	OK	OK	OK	OK
12	0	-7499.556	-7499.555	2007.861	2008.241	0.001	0.38		-274.462	-274.46	-0.002	0.001	0.38	OK	OK	OK	OK	OK
13	0	-7472.11	-7472.109	2007.712	2008.08	0.001	0.368		-301.908	-301.906	-0.002	0.001	0.368	OK	OK	OK	OK	OK
14	0	-7472.397	-7472.396	2034.562	2035.224	0.001	0.662		-301.621	-301.619	-0.002	0.001	0.662	OK	OK	OK	OK	OK
15	0	-7499.843	-7499.842	2034.711	2035.427	0.001	0.716		-274.175	-274.173	-0.002	0.001	0.716	OK	OK	OK	OK	OK
16	0	-7527.288	-7527.288	2034.86	2035.59	0	0.73		-246.729	-246.728	-0.001	0	0.73	OK	OK	OK	OK	OK
17	0	-7554.735	-7554.734	2035.01	2035.747	0.001	0.737		-219.283	-219.281	-0.002	0.001	0.737	OK	OK	OK	OK	OK
18	0	-7582.181	-7582.18	2035.159	2035.897	0.001	0.738		-191.837	-191.835	-0.002	0.001	0.738	OK	OK	OK	OK	OK
19	0	-7609.626	-7609.625	2035.308	2036.027	0.001	0.719		-164.392	-164.39	-0.002	0.001	0.719	OK	OK	OK	OK	OK
20	0	-7637.073	-7637.072	2035.457	2036.153	0.001	0.696		-136.945	-136.943	-0.002	0.001	0.696	OK	OK	OK	OK	OK
21	0	-7664.519	-7664.517	2035.606	2036.295	0.002	0.689		-109.5	-109.497	-0.003	0.002	0.689	OK	OK	OK	OK	OK
22	0	-7691.964	-7691.964	2035.755	2036.421	0	0.666		-82.053	-82.052	-0.001	0	0.666	OK	OK	OK	OK	OK
23	0	-7691.964	-7691.961	2035.755	2036.268	0.003	0.513		-82.056	-82.052	-0.004	0.003	0.513	OK	OK	OK	OK	OK
24	0	-7719.41	-7719.409	2035.904	2036.419	0.001	0.515		-54.608	-54.606	-0.002	0.001	0.515	OK	OK	OK	OK	OK
25	0	-7746.857	-7746.855	2036.054	2036.566	0.002	0.512		-27.162	-27.159	-0.003	0.002	0.512	OK	OK	OK	OK	OK
26	0	-7774.302	-7774.3	2036.203	2036.711	0.002	0.508		0.283	0.286	-0.003	0.002	0.508	OK	OK	OK	OK	OK
27	0	-7802.902	-7802.901	2036.358	2036.878	0.001	0.52		28.884	28.886	-0.002	0.001	0.52	OK	OK	OK	OK	OK
28	0	-7831.401	-7831.4	2036.513	2037.086	0.001	0.573		57.383	57.385	-0.002	0.001	0.573	OK	OK	OK	OK	OK
29	0	-7859.899	-7859.898	2036.668	2037.239	0.001	0.571		85.881	85.883	-0.002	0.001	0.571	OK	OK	OK	OK	OK
30	0	-7888.398	-7888.398	2036.823	2037.425	0.001	0.602		114.38	114.382	-0.002	0.001	0.602	OK	OK	OK	OK	OK

Figura 68- Separadores Excel

Analisando mais em detalhe os resultados obtidos, foram registados quatro casos diferentes. Em primeiro lugar pode surgir a situação representada na figura 69, em que toda a linha de furação (tack e pontos que utilizam esta referência) se encontra de acordo com os requisitos.

Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	Offset X	Offset Y	Vetor tack	Passo real	Passo prog	Delta passo	Borda X	Borda Y	Tol. Tack	Tol. Passo	Tol. Borda X	Tol. Borda Y	Estado do ponto
1	-7774.016	-7774.017	2009.353	2009.336	-0.001	-0.017	0.017029	0	0	0	-0.001	-0.017	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7746.57	-7746.568	2009.203	2009.619	0.002	0.416		-27.449	-27.446	-0.003	0.002	0.416		OK	OK	OK	OK
0	-7719.124	-7719.122	2009.054	2009.356	0.002	0.302		-54.895	-54.892	-0.003	0.002	0.302		OK	OK	OK	OK
0	-7691.678	-7691.678	2008.905	2009.224	0	0.319		-82.339	-82.338	-0.001	0	0.319		OK	OK	OK	OK
0	-7664.232	-7664.232	2008.756	2009.063	0	0.307		-109.785	-109.784	-0.001	0	0.307		OK	OK	OK	OK
0	-7636.786	-7636.785	2008.607	2008.947	0.001	0.34		-137.232	-137.23	-0.002	0.001	0.34		OK	OK	OK	OK
0	-7609.341	-7609.34	2008.458	2008.773	0.001	0.315		-164.677	-164.675	-0.002	0.001	0.315		OK	OK	OK	OK
0	-7581.895	-7581.894	2008.309	2008.628	0.001	0.319		-192.123	-192.121	-0.002	0.001	0.319		OK	OK	OK	OK
0	-7554.448	-7554.447	2008.159	2008.479	0.001	0.32		-219.57	-219.568	-0.002	0.001	0.32		OK	OK	OK	OK
0	-7527.002	-7527.001	2008.01	2008.346	0.001	0.336		-247.016	-247.014	-0.002	0.001	0.336		OK	OK	OK	OK
0	-7499.556	-7499.555	2007.861	2008.241	0.001	0.38		-274.462	-274.46	-0.002	0.001	0.38		OK	OK	OK	OK
0	-7472.11	-7472.109	2007.712	2008.08	0.001	0.368		-301.908	-301.906	-0.002	0.001	0.368		OK	OK	OK	OK

Figura 69- Caso 1: Todos os pontos se encontram dentro dos requisitos

Na situação seguinte, que se encontra representada na figura 70, foi encontrado um ponto que não cumpre os requisitos relativamente ao passo e à borda. Na situação apresentada na figura 71 há vários pontos que também não cumprem os requisitos do passo e da borda, mas também o posicionamento do *tack* se encontra fora das especificações. No entanto, é de fácil compreensão que o problema ocorrido em ambas as situações foi o facto de estar programado efetuar o *pen marking*, mas a máquina por algum motivo não o efetuou. Muito provavelmente poderá tratar-se de uma zona de difícil acesso que a máquina não conseguiu aceder, como por exemplo a apresentada na figura 72, em que o *lower anvil* embate no *stringer*, e o operador optou por saltar esta linha de pontos, de forma a não danificar o produto. Também poderá ter acontecido por se tratar de uma zona cujos processos anteriores não se encontram conformes, tal como a zona onde está colocada a fita vermelha, apresentada na figura 73, onde não é possível efetuar a furação e cravação, por terem de ser feitos certos tipos de retrabalhos, a fim de solucionar o problema.

Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	Offset X	Offset Y	Vetor tack	Passo real	Passo prog	Delta passo	Borda X	Borda Y	Tol. Tack	Tol. Passo	Tol. Borda X	Tol. Borda Y	Estado do ponto
1	-7728.427	-7728.427	2810.98	2810.969	0	-0.011	0.011	0	0	0	0	-0.011	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7700.917	-7700.916	2810.186	2810.395	0.001	0.209		-27.511	-27.51	-0.001	0.001	0.209		OK	OK	OK	OK
0	-7673.407	-7673.407	2809.393	2809.593	0	0.2		-55.02	-55.02	0	0	0.2		OK	OK	OK	OK
0	-7645.897	-7645.896	2808.599	2808.765	0.001	0.166		-82.531	-82.53	-0.001	0.001	0.166		OK	OK	OK	OK
0	-7618.386	-7618.385	2807.806	2807.969	0.001	0.163		-110.042	-110.041	-0.001	0.001	0.163		OK	OK	OK	OK
0	-7590.875	-7590.874	2807.012	2807.188	0.001	0.176		-137.553	-137.552	-0.001	0.001	0.176		OK	OK	OK	OK
0	-7563.366	-7563.366	2806.218	2806.428	0	0.21		-165.061	-165.061	0	0	0.21		OK	OK	OK	OK
0	-7535.855	-7535.854	2805.425	2805.601	0.001	0.176		-192.573	-192.572	-0.001	0.001	0.176		OK	OK	OK	OK
0	-7508.345	-7508.345	2804.631	2804.803	0	0.172		-220.082	-220.082	0	0	0.172		OK	OK	OK	OK
0	-7480.835	-7480.834	2803.837	2804.015	0.001	0.178		-247.593	-247.592	-0.001	0.001	0.178		OK	OK	OK	OK
0	-7481.076	-7481.073	2828.319	2828.597	0.003	0.278		-247.354	-247.351	-0.003	0.003	0.278		OK	OK	OK	OK
0	-7508.586		2829.112		7508.59	-2829.1		-7728.43	-219.841	-7508.586	7508.59	-2829.1		NOK	NOK	NOK	NOK
0	-7481.076	-7481.076	2828.319	2828.579	0	0.26		-247.351	-247.351	0	0	0.26		OK	OK	OK	OK
0	-7508.586	-7508.586	2829.112	2829.506	0	0.394		-219.841	-219.841	0	0	0.394		OK	OK	OK	OK

Figura 70- Caso 2: Falha na tolerância do passo e bordas

Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	Offset X	Offset Y	Vetor tack	Passo real	Passo prog	Delta passo	Borda X	Borda Y	Tol. Tack	Tol. Passo	Tol. Borda X	Tol. Borda Y	Estado do ponto
1	-5702.339		1998.099		5702.34	-1998.1	6042.274	0	0	0	5702.34	-1998.1	NOK	OK	NOK	NOK	NOK
0	-5674.557		1997.948		5674.56	-1997.9		0	-27.782	27.782	5674.56	-1997.9	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5646.776		1997.796		5646.78	-1997.8		0	-55.563	55.563	5646.78	-1997.8	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5618.994		1997.646		5618.99	-1997.6		0	-83.345	83.345	5618.99	-1997.6	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5591.213		1997.495		5591.21	-1997.5		0	-111.126	111.126	5591.21	-1997.5	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5563.431		1997.344		5563.43	-1997.3		0	-138.908	138.908	5563.43	-1997.3	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5535.649		1997.193		5535.65	-1997.2		0	-166.69	166.69	5535.65	-1997.2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5507.869		1997.042		5507.87	-1997		0	-194.47	194.47	5507.87	-1997	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5480.087		1996.891		5480.09	-1996.9		0	-222.252	222.252	5480.09	-1996.9	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5452.305		1996.74		5452.31	-1996.7		0	-250.034	250.034	5452.31	-1996.7	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5424.523		1996.589		5424.52	-1996.6		0	-277.816	277.816	5424.52	-1996.6	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5396.743		1996.438		5396.74	-1996.4		0	-305.596	305.596	5396.74	-1996.4	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-5368.961		1996.288		5368.96	-1996.3		0	-333.378	333.378	5368.96	-1996.3	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK

Figura 71- Caso 2: Falha de todos os requisitos

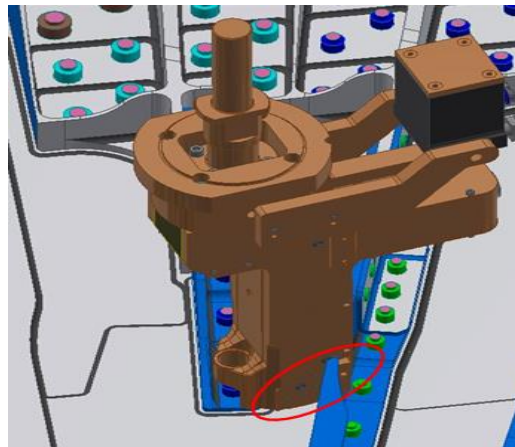


Figura 72- Exemplo de zona de difícil acesso na máquina da Gemcor [39]



Figura 73- Exemplo de zona onde não é possível efetuar furação e cravação identificado com a fita vermelha [32]

Um outro caso é o apresentado na figura 74, em que há uma não conformidade no parâmetro da borda de um dos pontos. Esta distância é dada principalmente pelo *tracer*, ou seja, o *laser* que mede a distância entre o ponto da furação e a parede do *stringer*. Ora neste caso a distância não é a correta, pelo que se poderá tratar de um erro da própria programação, que colocou um valor indevido para essa distância.

Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	Offset X	Offset Y	Vetor tack	Passo real	Passo prog	Delta passo	Borda X	Borda Y	Tol. Tack	Tol. Passo	Tol. Borda X	Tol. Borda Y	Estado do ponto
1	-7731.444	-7731.445	3108.727	3108.716	-0.001	-0.011	0.011045	0	0	-0.001	-0.011	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7703.989	-7703.989	3107.694	3108.009	0	0.315	-27.456	-27.455	-0.001	0	0.315	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7703.989	-7703.989	3107.694	3108.043	0	0.349	-27.456	-27.455	-0.001	0	0.349	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7676.532	-7676.532	3106.661	3106.969	0	0.308	-54.913	-54.912	-0.001	0	0.308	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7649.075	-7649.075	3105.629	3105.915	0	0.286	-82.37	-82.369	-0.001	0	0.286	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7621.618	-7621.618	3104.595	3104.882	0	0.287	-109.827	-109.826	-0.001	0	0.287	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7594.163	-7594.163	3103.563	3103.836	0	0.273	-137.282	-137.281	-0.001	0	0.273	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7566.706	-7566.705	3102.53	3102.847	0.001	0.317	-164.74	-164.738	-0.002	0.001	0.317	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7539.25	-7539.25	3101.497	3101.815	0	0.318	-192.195	-192.194	-0.001	0	0.318	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7511.793	-7511.793	3100.465	3100.801	0	0.336	-219.652	-219.651	-0.001	0	0.336	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-7484.336	-7484.336	3099.432	3099.765	0	0.333	-247.109	-247.108	-0.001	0	0.333	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-8384.323	-8384.322	3159.32	3160.125	0.001	0.805	652.877	652.879	-0.002	0.001	0.805	OK	OK	NOK	NOK	NOK	NOK
0	-8412.009	-8412.008	3160.361	3160.793	0.001	0.432	680.563	680.565	-0.002	0.001	0.432	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-8439.696	-8439.695	3161.402	3161.966	0.001	0.564	708.25	708.252	-0.002	0.001	0.564	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Figura 74- Caso 3: Falha na tolerância da borda em Y

O último caso é o apresentado na figura 75, em que o *tack* tem aproximadamente 2 mm a mais da tolerância máxima de posicionamento, bem como da tolerância da borda em X, no entanto o passo e a borda em Y continuam dentro das tolerâncias. Isto acontece porque há uma propagação do erro do *tack* segundo a linha de furação, tal como explicado nas secções 2.3.5.1.2 e 2.3.5.2.2. Esse caso pode ser devido a um erro do fornecedor e não da própria máquina, tal como referido na secção 4.1, ou poderá tratar-se de um erro de leitura da *Resync Camera*. Esta situação faz com que haja uma perda de borda em X, tal como se pode verificar. Neste caso, torna-se necessário verificar se se trata de uma linha de furação perto da borda de alguma da peça, pois só nesse caso se verifica realmente a perda de borda. No entanto, sabe-se que há um deslocamento em X, segundo a direcção negativa do eixo, podendo assim diminuir e/ou aumentar a distância pré-definida entre duas linhas de furação consecutivas, o que fará com que as linhas de tensão se intersetem, aumentando assim a tensão média entre eles, ou criar uma situação de flambagem, tal como referido na secção 3.3.4 relativa à Furação e Cravação.

Tack	ProgrammedX	ToolpointX	ProgrammedY	ToolpointY	Offset X	Offset Y	Vetor tack	Passo real	Passo prog	Delta passo	Borda X	Borda Y	Tol. Tack	Tol. Passo	Tol. Borda X	Tol. Borda Y	Estado do ponto
1	-5173.23	-5176.232	2158.422	2158.369	-3.002	-0.053	3.0024678	0	0	-3.002	-0.053	NOK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-5145.448	-5148.448	2158.128	2158.223	-3	0.095	-27.784	-27.782	-0.002	-3	0.095	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-5117.664	-5120.663	2157.835	2157.971	-2.999	0.136	-55.569	-55.566	-0.003	-2.999	0.136	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-5089.882	-5092.881	2157.541	2157.678	-2.999	0.137	-83.351	-83.348	-0.003	-2.999	0.137	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-5062.099	-5065.098	2157.248	2157.365	-2.999	0.117	-111.134	-111.131	-0.003	-2.999	0.117	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-5034.316	-5037.315	2156.954	2157.084	-2.999	0.13	-138.917	-138.914	-0.003	-2.999	0.13	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-5006.533	-5009.532	2156.661	2156.816	-2.999	0.155	-166.7	-166.697	-0.003	-2.999	0.155	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4978.75	-4981.749	2156.367	2156.536	-2.999	0.169	-194.483	-194.48	-0.003	-2.999	0.169	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4950.967	-4953.967	2156.073	2156.26	-3	0.187	-222.265	-222.263	-0.002	-3	0.187	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4923.183	-4926.183	2155.78	2156.024	-3	0.244	-250.049	-250.047	-0.002	-3	0.244	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4895.401	-4898.4	2155.486	2155.624	-2.999	0.138	-277.832	-277.829	-0.003	-2.999	0.138	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4867.618	-4870.618	2155.192	2155.352	-3	0.16	-305.614	-305.612	-0.002	-3	0.16	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4839.835	-4842.834	2154.899	2155.107	-2.999	0.208	-333.398	-333.395	-0.003	-2.999	0.208	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4839.835	-4842.835	2154.899	2155.019	-3	0.12	-333.397	-333.395	-0.002	-3	0.12	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4812.052	-4815.052	2154.605	2154.728	-3	0.123	-361.18	-361.178	-0.002	-3	0.123	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4784.269	-4787.269	2154.312	2154.385	-3	0.073	-388.963	-388.961	-0.002	-3	0.073	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4756.487	-4759.486	2154.018	2154.026	-2.999	0.008	-416.746	-416.743	-0.003	-2.999	0.008	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4728.703	-4731.703	2153.724	2153.695	-3	-0.029	-444.529	-444.527	-0.002	-3	-0.029	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
0	-4700.92	-4703.92	2153.43	2153.348	-3	-0.082	-472.312	-472.31	-0.002	-3	-0.082	OK	OK	NOK	OK	OK	NOK
1	-4682.084	-4682.082	2153.199	2153.207	0.002	0.008	0.0082462	0	0	0.002	0.008	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	-4660.23	-4660.23	2152.969	2153.022	0	0.053	-21.852	-21.854	0.002	0	0.053	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Figura 75- Caso 4: Falha no posicionamento do *tack* e borda em X

## 5.2- Verificação dos resultados obtidos

Depois de obtidos os resultados perante o algoritmo, foram verificados todos os parâmetros de posicionamento do *tack*, passo e borda manualmente no produto, com o auxílio do cronaflex e paquímetro, de forma a averiguar se todos os pontos se encontram de acordo com o calculado. Assim sendo, todos os casos que foram detetados com o algoritmo e foram descritos no presente capítulo, foram verificados manualmente.

No primeiro caso, o algoritmo declarou que se encontra conforme os requisitos e o mesmo se verificou manualmente.

Em relação ao segundo caso, verificou-se que realmente se tratou de uma zona que não foi possível efetuar o *pen marking*, tal como representado na figura 73, pois seria necessário retrabalhar essas mesmas zonas, devido a problemas decorridos em processos anteriores na linha de montagem.

Já no terceiro caso, foi realmente verificada essa falha na borda em Y e depois de analisar toda a programação, verificou-se que de facto havia um erro na mesma. No entanto, por se tratar de uma diferença de apenas 0,005 mm, verificou-se que esta diferença não iria afetar grandemente a furação, pelo que neste caso o ponto foi aceite pela Engenharia de Qualidade. No entanto, podem surgir situações em que este valor esteja fora da tolerância, pelo que deve de se ter em atenção, para não se verificar a situação de perda de borda em Y.

O quarto e último caso foi o mais alarmante, uma vez que realmente se verificou tratar-se de um erro do fabricante e o *tack* se encontrava de facto desviado da sua posição nominal (programada), tendo por isso sido rejeitado pela Engenharia de Qualidade. Foi verificada a sua posição em relação à asa, para averiguar se realmente houve uma perda de borda em alguma das peças, através do gráfico que se encontra representado na figura 76, e manualmente, e averiguou-se que não provocava uma perda de borda em X, por não se localizar na borda de nenhuma das peças. No entanto, este deslocamento da linha de furação no sentido negativo do eixo X irá influenciar bastante o desempenho desta estrutura ao longo da sua vida útil, uma vez que irá criar uma diminuição do passo entre esta linha de furação e a linha imediatamente à esquerda e um aumento em relação à linha imediatamente à direita. E, tal como explicado na secção 3.3.4 relativamente à Furação e Cravação, com a diminuição do passo entre duas linhas de furação consecutivas, as linhas de tensão irão interseccionar-se, aumentando assim a tensão média entre eles. Já o aumento do passo entre duas linhas de furação (neste caso segundo o sentido positivo do eixo) irá causar uma situação de flambagem, tal como referido anteriormente.

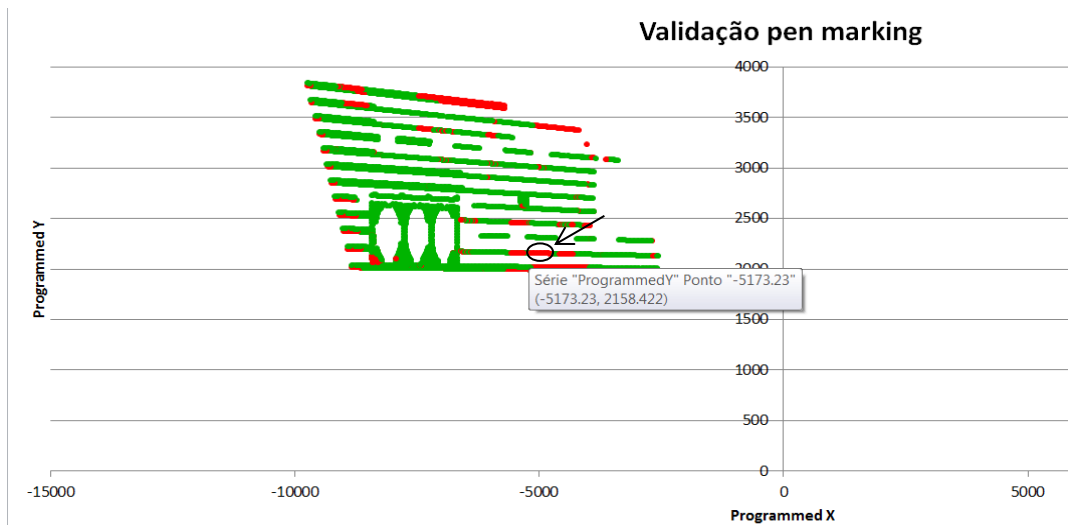


Figura 76- Localização do tack e respectiva linha de furação do caso 4



# Capítulo 6: Conclusões

## 6.1- Conclusões

Com a realização deste trabalho, a autora fez uma revisão de vários exemplos da aplicação da automação à indústria aeronáutica, explicando quais são as principais restrições e vantagens dos mesmos.

Foi ainda possível disponibilizar a partir desta dissertação um breve manual do funcionamento das máquinas da Gemcor e da Electroimpact, bem como das etapas de fabricação e montagem existentes nas instalações da empresa, referindo todos os processos pelos quais o material passa até à sua fase final.

No entanto, o mais pertinente e principal objetivo desta dissertação foi cumprido, tendo sido facultada à Embraer Portugal S.A. uma ferramenta muito útil para validação dos testes de *pen marking* em máquinas cuja função é a de efetuar furação e cravação, como é o caso das duas máquinas rebitadoras apresentadas, sendo apenas necessário fazer alguns ajustes como é o caso do nome do ficheiro dos dados (o Production Data dos LOGs da Electroimpact).

De facto, após uma análise junto das equipas de Engenharia de Qualidade e Automação, verificou-se que todos os cálculos efetuados a partir do algoritmo desenvolvido se encontram corretos, garantindo assim que este algoritmo se encontra funcional e pronto para ser implementado como uma ferramenta de validação automática dos testes de *pen marking*.

Assim, com esta ferramenta os tempos de validação mudaram de aproximadamente três dias da validação manual, para uns meros segundos, tendo sido obtidos resultados muito mais precisos, não havendo necessidade de colocar trabalhadores em trabalhos perigosos e pouco ergonómicos, aumentando ainda a produtividade da linha de montagem.

No decorrer da elaboração desta dissertação foram feitos inúmeros testes de *pen marking* à máquina da Gemcor, uma vez que esta máquina ainda se encontra num processo de integração na empresa, de forma a testar todos os componentes, garantindo assim que tudo está funcional e pronto para efetuar furação e cravação no produto. No entanto, o algoritmo elaborado ainda não foi possível ser aplicado a esta máquina, uma vez que a máquina ainda se encontra em fase de integração e nem todos os parâmetros estão finalizados, como é o caso dos LOGs (dados) da máquina. De facto, os dados ainda fornecem as coordenadas da configuração da máquina num referencial da máquina, e não a localização dos pontos num referencial avião, tal como necessário para este algoritmo, sendo então necessário que a Gemcor forneça esse tipo de dados, o que não aconteceu até à altura da entrega desta dissertação.

De facto, este foi o principal entrave decorrido durante a elaboração deste trabalho. A autora despendeu algum tempo na resolução desse problema, tentando elaborar uma transformada entre as coordenadas, no entanto verificou tratar-se de um problema de dimensão demasiado elevada para o tempo disponível, pelo que se optou por se utilizar os LOGs da Electroimpact para desenvolver o algoritmo apresentado, uma vez que estes se encontram segundo o padrão normal utilizado na informação disponibilizada pelos dados das máquinas.

Este algoritmo pode também ser adaptado a robôs de furação, tendo de se ter em atenção também os dados da máquina, sendo que neste caso ele faz o *resync* nos *tacks*, no entanto não efetua a furação de seguida, uma vez que não sendo feita a cravação, se forem furados os *tacks*, então não vão haver apoios para os painéis, *stringers* e junta de tração se manterem na posição desejada. Assim sendo, é efetuada em primeiro lugar a furação de todos os restantes furos, sendo a cravação feita manualmente. Posteriormente é feita a furação dos *tacks*, num outro programa, sendo estes cravados também manualmente numa etapa final. Assim, para que o algoritmo resulte, toda a informação tem de estar bem detalhada, sendo necessário averiguar quais os *tacks* que servem de referência a cada uma das linhas de furação, bem como identificar as linhas de furação. Só assim se torna possível a utilização deste algoritmo para validar o posicionamento dos *tacks*, bem como da restante linha de furação neste tipo de robôs, que também se encontram integrados nas instalações da empresa.

Concluindo, compreender os dados das diferentes máquinas é muito importante, de forma a ajustar o algoritmo, pois todos os dados são diferentes, com diferentes informações e disposições, pelo que se torna necessário despende algum tempo para uma melhor compreensão e adaptação do algoritmo.

Um outro entrave que foi surgindo ao longo do tempo foi o facto de a Embraer ser uma empresa brasileira, pelo que grande parte dos seus termos aparecem num português do Brasil. Tornou-se assim um grande desafio para a autora tentar traduzir ao máximo estes termos, sendo que em alguns casos não foi mesmo possível encontrar uma tradução, pelo que ainda se encontram segundo a terminologia brasileira.

No entanto, de uma forma geral, todos os objetivos iniciais foram cumpridos, tendo esta parceria entre a Universidade da Beira Interior (UBI) e a Embraer Portugal S.A. funcionado da melhor forma, tendo ambas as partes beneficiado com a elaboração deste trabalho.

A partir deste estágio de seis meses, foi permitido à autora obter uma visão do funcionamento de uma empresa, acompanhar os processos de fabricação e montagem, conseguindo assim aliar todos os conhecimentos teóricos obtidos a partir unidades curriculares do mestrado integrado em Engenharia Aeronáutica da UBI, a exemplos reais. E, mais importante, deu também a oportunidade de elaborar um caso de estudo prático numa empresa de renome na indústria aeronáutica, enriquecendo assim esta dissertação para obtenção do grau de mestre.

Para a empresa, esta parceria mostrou-se também vantajosa, pois foi disponibilizada uma ferramenta útil que ajudará a aumentar toda a produtividade da linha de montagem não só das aeronaves E-Jets E2, mas também de todas as outras, já que o algoritmo apresentado é uma ferramenta polivalente, podendo ser aplicado a qualquer máquina de furação (e cravação), nas condições explicadas anteriormente.

## 6.2- Trabalhos futuros

Tal como referido na conclusão, descobrir como elaborar a transformada das coordenadas máquina da Gemcor para coordenadas avião, de forma a obter as coordenadas de cada um dos furos, é um trabalho desafiante que a autora não teve oportunidade de concluir, pelo que seria bastante interessante no futuro tentar resolver esta questão, pois seria sem dúvida uma mais-valia para a empresa.

Uma outra proposta seria a de adaptar o algoritmo apresentado aos robôs de furação da empresa. Para tal, é necessário organizar os dados de uma forma padronizada, identificando quais os *tacks* que servem de referência a cada uma das linhas de furação, bem como identificar as linhas de furação. Este é de facto um trabalho bastante difícil, pois os dados não são iguais para todas as máquinas, tendo informações, nomes e tipos de coordenadas diferentes, organizados de forma diferente. No entanto, seria uma mais-valia para a empresa, tornando o acesso aos dados mais fácil e intuitivo, sendo que estes dados são muito importantes para a análise e avaliação do desempenho da máquina, bem como da prestação do operador, já que todas as operações efetuadas ficam aqui registadas.



# Bibliografia

- [1] F. Andersson, A. Hagqvist, E. Sundin, and M. Björkman, "Design for manufacturing of composite structures for commercial aircraft-The development of a DFM strategy at SAAB aerostructures," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 362-367, 2014.
- [2] M. Barrette, "Top 5 Robotic Applications in the Aerospace Industry", 2014. [Online]. Available: <https://blog.robotiq.com/bid/70043/Top-5-Robotic-Applications-in-the-Aerospace-Industry>. [Accessed: 18-Jan-2018].
- [3] Valor Econômico, "Embraer prevê demanda de 6,4 mil jatos com até 130 assentos em 20 anos", 2017 [Online]. Available: <https://www.valor.com.br/empresas/5010670/embraer-preve-demanda-de-64-mil-jatos-com-ate-130-assentos-em-20-anos> [Accessed: 25-Jun-2018].
- [4] P. Waurzyniak, "Picking up the Pace in Aerospace Production", *Manuf. Eng.*, March 2014 Edition.
- [5] P. Waurzyniak, "Aerospace Automation Picks Up the Pace", *Manuf. Eng.*, March 2013 Edition.
- [6] G. F. Barbosa, "Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto para Excelência", Dissertação de doutoramento em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [7] L. Silevira, W. Lima, "Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial", UFRN-PPgEE, 2003.
- [8] L. Cunha, "Relés e contadores", *O Setor Elétrico*, Ed. 45, pp. 54-60, 2009.
- [9] W. Goeking, "Da máquina a vapor aos softwares de automação", *O Setor Elétrico*, Ed. 52, 2010.
- [10] J. Wallén, "The history of the industrial robot", Technical Report from Automatic Control at Linköpings universitet, Report No. LiTH-ISY-R-2853, 2008 [Online]. Available: <http://www.control.isy.liu.se/publications> [Accessed: 20-Fev-2018].
- [11] P. Marcicano, "Introdução ao Controle Numérico", Arquivo Aulas da Universidade de São Paulo.
- [12] A. T. Corporation, "*Robotics*", 3rd Edition, Elsevier Advanced Technology, 1991.
- [13] C. Tropaia, "Indústria 4.0: uma caracterização do sistema de produção", pp. 0-14, 2017 [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/317475373\\_Industria\\_40\\_uma\\_caracterizacao\\_do\\_sistema\\_de\\_producao](https://www.researchgate.net/publication/317475373_Industria_40_uma_caracterizacao_do_sistema_de_producao) [Accessed: 13-Ago-2018].
- [14] A. Owen-Hill, "What's the Difference Between Automation and Robotics?," 2017. [Online]. Available: <https://blog.robotiq.com/whats-the-difference-between-automation-and-robotics>. [Accessed: 24-Jan-2018].
- [15] ISO 8373:2012(en), "Robots and robotic devices – Vocabulary." [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>. [Accessed: 01-Mar-2018].
- [16] J. Ferreira, "Aplicação de Metodologias Lean em Aeronáutica", Dissertação de metrado em Engenharia Aeronáutica - Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2011.
- [17] S. Bouchard, "Lean Robotics: A Guide to Making Robots Work in Your Factory", ISBN 978-

1-77508-290-3, 2017

- [18] C. Drury, "Human Factors Guide for Aviation", Chapter 9 - Automation, 2005. [Online] Available: [https://www.faa.gov/about/initiatives/maintenance\\_hf/library/documents/media/human\\_factors\\_maintenance/human\\_factors\\_guide\\_for\\_aviation\\_maintenance\\_-\\_chapter.9.automation.pdf](https://www.faa.gov/about/initiatives/maintenance_hf/library/documents/media/human_factors_maintenance/human_factors_guide_for_aviation_maintenance_-_chapter.9.automation.pdf). [Accessed: 10-Fev-2018]
- [19] C. Mineo, D. Herbert, M. Morozov, S. G. Pierce, "Robotic Non-Destructive Inspection", BINDT, 2012. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/246547111\\_Robotic\\_Non-Destructive\\_Inspection](https://www.researchgate.net/publication/246547111_Robotic_Non-Destructive_Inspection). [Accessed: 18-Abr-2018]
- [20] M. Greco, D. Maciel, "Resistência dos Materiais: Uma abordagem Sintética", 1ª Edição, Elsevier, ISBN: 9788535274585, 2016
- [21] L.F. Carrão, "Sistema de visão para guiamento de AGV em ambiente industrial", Dissertação de metrado em Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014.
- [22] P. Nobre, "Apontamentos Teórico/Práticos Tecnologia Mecânica", pt.2.
- [23] "M . Tech: Automation in manufacturing" Lecture 1 Introduction of Automation, [Online]. Available: [http://ymcaust.ac.in/mechanical/images/mtech2ndsem/automation\\_in\\_manufacturin g.pdf](http://ymcaust.ac.in/mechanical/images/mtech2ndsem/automation_in_manufacturin g.pdf). [Accessed: 4-Jun-2018].
- [24] W. N. Felder, "Barriers to Automation of Aircraft Production," *Natl. Inst. Stand. Technol.*, pp. 1-3, 2011. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/Barriers-to-Automation-of-Aircraft-Production.pdf> [Accessed: 8-Jun-2018].
- [25] "ASIMOV: Vantagens e Desvantagens da Robótica." [Online]. Available: <http://robot-asimov.blogspot.com/2011/06/vantagens-e-desvantagens-da-robotica.html>. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [26] H. Kihlman, "Affordable Automation for Airframe Assembly - Development of Key Enabling Technologies", Thesis no. 953, Production Systems, Department of Mechanical Engineering, Linköpings Universitet, Linköping, Sweden, 2005
- [27] P. Crothers, "Aerospace and Automotive Manufacturing - Specific Differences and Trends PROTECT", Boeing Research & Technology, 2016. [Online]. Available: [https://www.cmi.iis.u-tokyo.ac.jp/event/20171017/20171017\\_03.pdf](https://www.cmi.iis.u-tokyo.ac.jp/event/20171017/20171017_03.pdf) [Accessed: 23-Jun-2018]
- [28] V. M. F. Santos, "Sebenta Robótica Industrial 2003-2004", Universidade de Aveiro, 2003.
- [29] R. P. Miller, "Construindo a confiança com a Embraer", Rockwell Collins, Livro 18, Edição 2, 2013. [Online]. Available: [https://www.rockwellcollins.com/Worldwide/South\\_America/-/media/357ABAF1A45B4F5E913A71447778C9FC.ashx](https://www.rockwellcollins.com/Worldwide/South_America/-/media/357ABAF1A45B4F5E913A71447778C9FC.ashx) [Accessed: 30-Jun-2018]
- [30] "Embraer" [Online]. Available: <https://embraer.com/global/en>. [Accessed: 30-May-2018].
- [31] "Our Aircraft - Embraer." [Online]. Available: <https://www.embraercommercialaviation.com/our-aircraft/>. [Accessed: 30-Jun-2018].
- [32] Embraer, "Informação Interna," 2018.
- [33] B. J. V. da Silva, R. Morabito, and H. H. Yanasse, "Programação da produção de gabaritos de montagem com restrições de adjacência na indústria aeronáutica," *Production*, vol. 21, no. 4, pp. 696-707, 2011.

- [34] “Coordinate Measuring Machines”, Mitutoyo, 2014, [Online]. Available: <https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1343029183685/Small-%20and%20Medium%20Size%20CMMs/index.xhtml> [Accessed: 16-Ago-2018].
- [35] P. V . Gamboa, “Comportamento Mecânico de Materiais Tópicos”, Estruturas Aeroespaciais I (10362), Univesidade da Beira Interior, 2017.
- [36] C. Sergio, A. Sérgio, R. C. De Mello, C. Oliveira, D. Souza, N. L. Citeli, “Alumínio e Suas Ligas”, 2009. [Online]. Available: <http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aluminio%5B1%5D.pdf> [Accessed: 14-Jun-2018].
- [37] P. Nobre, “Apontamentos Teórico/Práticos Tecnologia Mecânica”, pt.1.
- [38] P. V Gamboa, “Introdução às Estruturas de Aeronaves Tópicos”, Estruturas Aeroespaciais I (10362), Univesidade da Beira Interior, 2017.
- [39] Gemcor, “Informação Interna”, 2018.
- [40] Electroimpact, “Informação Interna”, 2018.
- [41] “Technical Process Bulletin - DEOXALUME © 2310”, Henkel, No. 235870, Rev. 09/05/2006
- [42] A. Paranhos, D. Vechia, and M. Beltrame, “Capilaridade: Um fenômeno de superfície com COM APLICAÇÕES COTIDIANAS,” *XII Encontro Lat. Am. Iniciação Científica e VIII Encontro Lat. Am. Pós-Graduação - Univ. do Val. do Paraíba*, vol. c, pp. 1-2, 2008.
- [43] “esquema-industria-4.0” [Online]. Available: [http://forumsaudedigital.com.br/wp-content/uploads/2017/04/esquema-industria-4.0\\_texto-1.jpeg](http://forumsaudedigital.com.br/wp-content/uploads/2017/04/esquema-industria-4.0_texto-1.jpeg). [Accessed: 22-Jul-2018].
- [44] E. Cuevas, M. López, and M. García, “Ultrasonic Techniques and Industrial Robots : Natural Evolution of Inspection Systems Ultrasonic Techniques and Industrial Robots : Natural Evolution of Inspection Systems,” *Symp. - NDT*, no. September 2015, pp. 1-12, 2012.
- [45] “Robô industrial FANUC Arc Mate 100iC - Fanuc.” [Online]. Available: <https://www.fanuc.eu/pt/pt/robôs/página-filtro-robôs/soldadura-por-arco/arcmate-100ic-12>. [Accessed: 27-Jun-2018].
- [46] “Robô industrial FANUC PaintMate 200iA - Fanuc.” [Online]. Available: <https://www.fanuc.eu/pt/pt/robôs/página-filtro-robôs/série-de-pintura/paint-mate-200ia>. [Accessed: 02-Sep-2018].
- [47] “Automated fiber placement machine | Torresfiberlayup.” [Online]. Available: <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torresfiberlayup>. [Accessed: 08-Jul-2018].
- [48] “PMAC Introduction Manual”, Delta-Tau Data Systems, 3A0-PMACIM-xIMx, 2004. [Online] Available: <http://www.deltatau.com/manuals/pdfs/PMAC%20INTRODUCTION.pdf> [Accessed: 15-Jul-2018].



# Anexo A- Dados Técnicos Máquina

## Gemcor

Tabela A.1- Especificações da máquina

### SYSTEM DIMENSIONS

Height, Overall	6589.94mm (259.4 in.)
Depth	32037.71mm (1,261.33 in.)
Width	12469mm (490.91 in.)
Throat Depth	4165.60mm (164 in.)
Throat Height	3651.25mm (143.75 in.)
Daylight	898.53mm (35.38 in.)
Workplane Height	3321.05mm (130.75 in.)
Pocket Depth Clearance	25.4mm (1.0 in.)

### FORCES

Rivet Upset Force, Maximum	13,600 daN
Workpiece Clamping Force	889.65 daN (2,000 lbs)

### DRILL

Drill Spindle RPM	500 to 20,000 RPM (+/- 5%)
Drill Spindle Feed Rate	10-8,000 mm/M (0.4-315 IPM) (+/- 5%)
Maximum Travel of Feed	+/- 95mm
Drill Depth Control	.0001" increments repeatable within 0.0005" increments
Fastener Diameter(s)	Rivets: -5, -6, & -8

Hi- Lites (Protruding & Flush): -5, -6, -8, -10 & -12

Lockbolts: -5, -6, -8, -10 & -12

### AIR PRESSURE (user supplied)

6.0 Bar, 90 psi dry shop air with 25.4mm (1 in.) pipe

### ELECTRICAL REQUIREMENT

Electrical Power (user supplied)	400 VAC (+/- 10%), 3 phase, 125 KVA, 150 AMPs
Control Voltage	110VAC

Tabela A.2- Capacidades do posicionador

	X-axis	Y-axis	Z/W-axis	'a'-axis	'b'-angle
Maximum Travel	18,263mm (719 in.)	4,546.6mm (179 in.)	4,826mm (190 in.)	±90°	±11°
Maximum Jog Rate	10,160mm/min. (400 in. min.)	10,160mm/min. (400 in. min.)	6,000mm/min. (236 in. min.)	180 °/min.	-
Point to Point Accuracy	0.254mm (±0.127mm, 0.005 in.)	0.2mm (±0.1mm, 0.004 in.)	0.2mm (±0.1mm, 0.004 in.)	2 arc/min. (±1 arc/min.)	-
Repeating Accuracy	0.12mm (±0.05 mm, 0.002 in.)	0.1mm (±0.05 mm, 0.002 in.)	0.1mm (±0.05 mm, 0.002 in.)	80 arc/sec. (±40 arc/sec.)	-

# Anexo B- Dados Técnicos Máquina

## Electroimpact

Tabela B.1- Dimensões e peso do pórtico e curso dos eixos

Height	7,200 mm
Width	8,100 mm
Length	8,300 mm
Weight	56,000 kg
X-Axis Travel	30 m
Y-Axis Travel	3.85 m
U-Axis Travel	750 mm
V-Axis Travel	1300 mm
A-Axis Range	+9, -15 deg
B-Axis Range	+/-8 deg
C-Axis Range	+23, -337 deg

Tabela B.2- Serviços

Air	Shop Air, 65 SCFM
Electric	415V 50HZ 3-Phase Power, 125 Amps
Ethernet	

Tabela B.3- Taxas de alimentação primárias e velocidades

X-Axis	10,500 mm/min
Y-Axis	12,000 mm/min
U-Axis	15,000 mm/min
V-Axis	15,000 mm/min
A-Axis	180 deg/min
B-Axis	180 deg/min
C-Axis	1080 deg/min
Shuttle table	160,000 mm/min
Spindle	20,000 RPM
Spindle Feed	60,000 mm/min
All other servos axes	50,000 mm/min

# Anexo C- Norma NE 03-071 - Detalhes de maquinação de metais - Tolerância da linha de centro do furo

## 5.3.2 LINHA DE CENTRO DO FURO

- a) tolerância para o deslocamento angular da linha de centro do furo é  $\pm 1^\circ$ .
- b) tolerância para o deslocamento linear da linha de centro do furo é  $\pm 1$  mm.

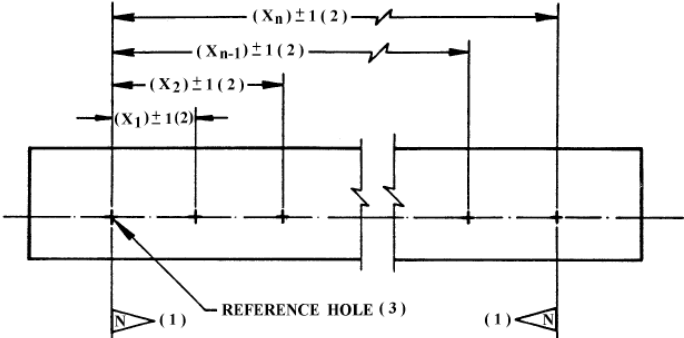
# Anexo D- Norma NE 03-006- Tolerância das distâncias de passo e borda

## 5 REQUIREMENTS

### 5.1 PITCH AND EDGE DISTANCE

The nominal pitch and edge distance values shall be as specified on production drawings. See DSM Chapter 04.

The general tolerances for the distances between the center of a hole, used as a datum, and the centers of the other holes shall be as specified in Figure 1.



- (1) Indicate specific tolerance, whenever general tolerance ( $\pm 1$  mm) does not meet design requirements.
- (2) The letter "X" means the distance between the reference hole center and the center of the other holes. These dimensions are shown here for illustration purposes only. They are not shown on drawings.
- (3) Use the first hole as datum, unless otherwise indicated on drawings.

FIGURE 1: TOLERANCES BETWEEN HOLE CENTERS

Edge distance tolerances shall be as specified in Figure 2.

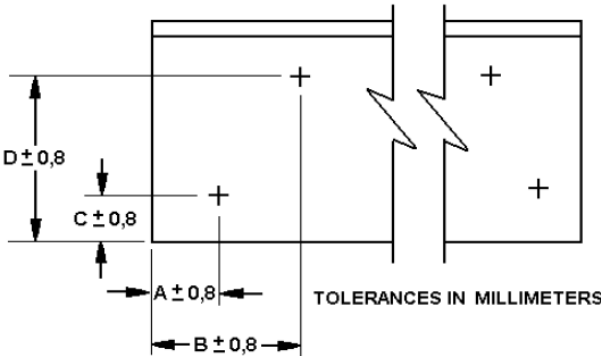


FIGURE 2: EDGE DISTANCE TOLERANCES

# Anexo E- Normas Embraer de montagem de fixadores - Seleção da pega

Tabela D.1- Pega (grip) do prendedor em função da espessura da junta (stack)

GRIP		TOTAL JOINT THICKNESS			
		MINIMUM (EXCL)		MAXIMUM (INCL)	
mm	in	mm	in	mm	in
1.570	0.062	-	-	1.570	0.062
3.180	0.125	1.570	0.062	3.180	0.125
4.780	0.188	3.180	0.125	4.780	0.188
6.350	0.250	4.780	0.188	6.350	0.250
7.920	0.312	6.350	0.250	7.920	0.312
9.520	0.375	7.920	0.312	9.520	0.375
11.130	0.438	9.520	0.375	11.130	0.438
12.700	0.500	11.130	0.438	12.700	0.500
14.270	0.562	12.700	0.500	14.270	0.562
15.880	0.625	14.270	0.562	15.880	0.625
17.480	0.688	15.880	0.625	17.480	0.688
19.050	0.750	17.480	0.688	19.050	0.750
20.620	0.812	19.050	0.750	20.620	0.812
22.220	0.875	20.620	0.812	22.220	0.875
23.830	0.938	22.220	0.875	23.830	0.938
25.400	1.000	23.830	0.938	25.400	1.000
26.970	1.062	25.400	1.000	26.970	1.062
28.580	1.125	26.970	1.062	28.580	1.125
30.180	1.188	28.580	1.125	30.180	1.188
31.750	1.250	30.180	1.188	31.750	1.250
33.320	1.312	31.750	1.250	33.320	1.312
34.920	1.375	33.320	1.312	34.920	1.375
36.530	1.438	34.920	1.375	36.530	1.438
38.100	1.500	36.530	1.438	38.100	1.500
39.670	1.562	38.100	1.500	39.670	1.562
41.280	1.625	39.670	1.562	41.280	1.625
42.880	1.688	41.280	1.625	42.880	1.688
44.450	1.750	42.880	1.688	44.450	1.750
46.020	1.812	44.450	1.750	46.020	1.812
47.620	1.875	46.020	1.812	47.620	1.875
49.230	1.938	47.620	1.875	49.230	1.938
50.800	2.000	49.230	1.938	50.800	2.000

# Anexo F- Algoritmo de validação dos testes de *pen marking*

```
Sub Penmarking()
```

```
,
```

```
' Penmarking Macro
```

```
,
```

```
Application.Goto Reference:="Penmarking"
```

```
Application.Visible = False
```

```
Application.Worksheets("ProductionData").Activate
```

```
Dim sh As Worksheet
```

```
Dim rng As Range
```

```
Dim cht As Object
```

```
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("ProductionData")
```

```
'Determinar o número de linhas referentes aos pontos
```

```
Dim k As Long
```

```
k = sh.Range("A1", sh.Range("A1").End(xlDown)).Rows.Count
```

```
'Converter dados separados por vírgulas em colunas
```

```
Dim ws As Worksheet
```

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
For Each ws In ThisWorkbook.Worksheets
```

```
Select Case UCase(ws.Name)
```

```
Case "Master", "Data"
```

```
Case Else
```

```
ws.Columns(1).TextToColumns Destination:=ws.Range("A1"), DataType:=xlDelimited, _
```

Textqualifier:=xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=False, \_

Semicolon:=False, Comma:=True, Space:=False, Other:=False, otherchar:="|", \_

FieldInfo:=Array(Array(1, 1), Array(2, 1), Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1), Array(6, 1),  
Array(7, 1), Array(8, 1), Array(9, 1), Array(10, 1)), \_

TrailingMinusNumbers:=True

End Select

Next ws

Application.ScreenUpdating = True

'Adicionar nova folha de cálculo

Sheets.Add

ActiveSheet.Name = "Calculo"

Application.Worksheets("ProductionData").Activate

'Copiar Tack

Sheets("ProductionData").Columns("Q").Copy Destination:=Sheets("Calculo").Range("A1")

'Copiar X programado

Sheets("ProductionData").Columns("D").Copy Destination:=Sheets("Calculo").Range("B1")

'Copiar X real

Sheets("ProductionData").Columns("BN").Copy Destination:=Sheets("Calculo").Range("C1")

'Copiar Y Programado

Sheets("ProductionData").Columns("E").Copy Destination:=Sheets("Calculo").Range("D1")

'Copiar Y real

Sheets("ProductionData").Columns("BO").Copy Destination:=Sheets("Calculo").Range("E1")

'Atribuir nomes às colunas correspondentes

Application.Worksheets("Calculo").Activate

ActiveSheet.Cells(1, 6).Value = "Offset X"

ActiveSheet.Cells(1, 7).Value = "Offset Y"

```

ActiveSheet.Cells(1, 8).Value = "Vetor tack"
ActiveSheet.Cells(1, 9).Value = "Passo real"
ActiveSheet.Cells(1, 10).Value = "Passo prog"
ActiveSheet.Cells(1, 11).Value = "Delta passo"
ActiveSheet.Cells(1, 12).Value = "Borda X"
ActiveSheet.Cells(1, 13).Value = "Borda Y"
ActiveSheet.Cells(1, 14).Value = "Tol. Tack"
ActiveSheet.Cells(1, 15).Value = "Tol. Passo"
ActiveSheet.Cells(1, 16).Value = "Tol. Borda X"
ActiveSheet.Cells(1, 17).Value = "Tol. Borda Y"
ActiveSheet.Cells(1, 19).Value = "Estado do ponto"

```

#### 'Fixar linha de cima (identificação das variáveis)

```
With ActiveWindow
```

```
    .SplitColumn = 0
```

```
    .SplitRow = 1
```

```
End With
```

```
ActiveWindow.FreezePanes = True
```

#### 'Cálculo offsets X e Y

```
For i = 2 To k
```

```
    ActiveSheet.Cells(i, 6).Value = ActiveSheet.Cells(i, 3).Value - ActiveSheet.Cells(i, 2).Value
```

```
    ActiveSheet.Cells(i, 7).Value = ActiveSheet.Cells(i, 5).Value - ActiveSheet.Cells(i, 4).Value
```

```
Next
```

#### 'Tolerância de posicionamento tack (+/- 1mm)

```
For i = 2 To k
```

```
    If ActiveSheet.Cells(i, 1).Value = 1 Then
```

```
        ActiveSheet.Cells(i, 8).Value = Sqr(ActiveSheet.Cells(i, 6) ^ 2 + ActiveSheet.Cells(i, 7) ^ 2)
```

```

If ActiveSheet.Cells(i, 8).Value <= 1 Then

ActiveSheet.Cells(i, 14).Value = "OK"

ActiveSheet.Cells(i, 14).Interior.Color = RGB(0, 180, 0)

Else

ActiveSheet.Cells(i, 14).Value = "NOK"

ActiveSheet.Cells(i, 14).Interior.Color = RGB(255, 0, 0)

End If

Else

End If

Next

```

### 'Cálculo do Passo

```
j = 2
```

```
For i = 2 To k
```

```

If ActiveSheet.Cells(i, 1).Value = 1 Then

oxtack_real = ActiveSheet.Cells(i, 3).Value

oxtack_prog = ActiveSheet.Cells(i, 2).Value

```

```
Else
```

```
End If
```

```
ActiveSheet.Cells(j, 9).Value = oxtack_real - ActiveSheet.Cells(j, 3).Value
```

```
ActiveSheet.Cells(j, 10).Value = oxtack_prog - ActiveSheet.Cells(j, 2).Value
```

### 'Diferença entre Passo Real e Programado

```
ActiveSheet.Cells(j, 11).Value = ActiveSheet.Cells(j, 9).Value - ActiveSheet.Cells(j, 10).Value
```

```
j = j + 1
```

```
Next
```

### Tolerância Passo +/- 1 mm

For i = 2 To k

If ActiveSheet.Cells(i, 11).Value <= 1 And ActiveSheet.Cells(i, 11).Value >= -1 Then

ActiveSheet.Cells(i, 15).Value = "OK"

ActiveSheet.Cells(i, 15).Interior.Color = RGB(0, 180, 0)

Else

ActiveSheet.Cells(i, 15) = "NOK"

ActiveSheet.Cells(i, 15).Interior.Color = RGB(255, 0, 0)

End If

Next

### Cálculo da Borda X

For i = 2 To k

ActiveSheet.Cells(i, 12).Value = ActiveSheet.Cells(i, 6).Value

Next

### Tolerância Borda X +/-0.8 mm

For i = 2 To k

If ActiveSheet.Cells(i, 12).Value <= 0.8 And ActiveSheet.Cells(i, 12).Value >= -0.8 Then

ActiveSheet.Cells(i, 16).Value = "OK"

ActiveSheet.Cells(i, 16).Interior.Color = RGB(0, 180, 0)

Else

ActiveSheet.Cells(i, 16).Value = "NOK"

ActiveSheet.Cells(i, 16).Interior.Color = RGB(255, 0, 0)

End If

Next

### 'Cálculo Borda Y

For i = 2 To k

ActiveSheet.Cells(i, 13).Value = ActiveSheet.Cells(i, 7).Value

Next

### 'Tolerância Borda Y +/- 0.8mm

For i = 2 To k

If ActiveSheet.Cells(i, 13).Value <= 0.8 And ActiveSheet.Cells(i, 13).Value >= -0.8 Then

ActiveSheet.Cells(i, 17).Value = "OK"

ActiveSheet.Cells(i, 17).Interior.Color = RGB(0, 180, 0)

Else

ActiveSheet.Cells(i, 17).Value = "NOK"

ActiveSheet.Cells(i, 17).Interior.Color = RGB(255, 0, 0)

End If

Next

### 'Verificação dos quatro parâmetros

For i = 2 To k

If ActiveSheet.Cells(i, 15).Value = "OK" And ActiveSheet.Cells(i, 16).Value = "OK" And  
ActiveSheet.Cells(i, 17).Value = "OK" And (ActiveSheet.Cells(i, 14).Value = "" Or  
ActiveSheet.Cells(i, 14).Value = "OK") Then

ActiveSheet.Cells(i, 19).Value = "OK"

ActiveSheet.Cells(i, 19).Interior.Color = RGB(0, 180, 0)

Else

ActiveSheet.Cells(i, 19).Value = "NOK"

ActiveSheet.Cells(i, 19).Interior.Color = RGB(255, 0, 0)

End If

Next

'Criação de nova folha de cálculo para inserir o gráfico com os pontos

```
Sheets.Add
```

```
ActiveSheet.Name = "Gráfico"
```

```
Application.Worksheets("Calculo").Activate
```

'Dados que se pretende colocar no gráfico (neste caso X e Y programados)

```
Set rng = ActiveSheet.Range("B:B,D:D")
```

```
Application.Worksheets("Gráfico").Activate 'Para colocar o gráfico na folha respetiva
```

'Criar o gráfico

```
Set cht = ActiveSheet.Shapes.AddChart
```

'Definir qual o tipo de gráfico pretendido

```
cht.Chart.ChartType = xlXYScatter
```

'Fornecer os dados ao gráfico

```
cht.Chart.SetSourceData Source:=rng
```

'Inserir título

```
Set cht = ActiveSheet.ChartObjects("Chart 1")
```

```
cht.Chart.HasTitle = True
```

```
cht.Chart.ChartTitle.Text = "Validação pen marking"
```

'Inserir legenda

```
Set cht = ActiveSheet.ChartObjects("Chart 1").Chart
```

```
cht.SetElement (msoElementLegendRight)
```

```
cht.Legend.Delete
```

'Inserir eixos

```
Worksheets("grafico").ChartObjects(1).Activate
```

```
With ActiveChart.Axes(xlValue)
```

```
.HasTitle = True
```

```
With .AxisTitle
```

```
.Caption = "Programmed Y"
```

```
End With
```

```
End With
```

```
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
```

```
.HasTitle = True
```

```
With .AxisTitle
```

```
.Caption = "Programmed X"
```

```
End With
```

```
End With
```

```
Application.Worksheets("Grafico").Activate
```

'Ajustar escala dos eixos (de acordo com os eixos da máquina; zero situa-se a meio do gabarito flexível)

```
Set cht = ActiveSheet.ChartObjects("Chart 1").Chart
```

```
'Eixo X
```

```
cht.Axes(xlCategory).MinimumScale = -15000
```

```
cht.Axes(xlCategory).MaximumScale = 15000
```

```
'Eixo Y
```

```
cht.Axes(xlValue).MinimumScale = 0
```

```
cht.Axes(xlValue).MaximumScale = 4000
```

'Redimensionar tamanho do gráfico

```
Application.Worksheets("Grafico").Activate
```

```
Dim CurrentChart As Chart
```

```
Set CurrentChart = Sheets("Grafico").ChartObjects(1).Chart
```

```
CurrentChart.Parent.Top = 0
```

```
CurrentChart.Parent.Left = 0
```

```
CurrentChart.Parent.Width = 925
```

```
CurrentChart.Parent.Height = 345
```

```
'Alterar o modificador
```

```
Dim ser As Series
```

```
ReDim icolor(k)
```

```
Application.Worksheets("Calculo").Activate
```

```
For i = 2 To k
```

```
icolor(i) = ActiveSheet.Cells(i, 19).Interior.Color 'Selecionar a cor de cada uma das células do estado do ponto
```

```
Next
```

```
Application.Worksheets("Grafico").Activate
```

```
Set cht = ActiveSheet.ChartObjects("Chart 1").Chart
```

```
For Each ser In cht.SeriesCollection
```

```
ser.MarkerStyle = xlMarkerStyleCircle 'estilo do marcador (neste caso é do tipo círculo)
```

```
ser.MarkerSize = 3 'tamanho do marcador
```

```
Next ser
```

```
'Alterar a cor do modificador
```

```
j = 1
```

```
For i = 2 To k
```

```
If icolor(i) = 46080 Then
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(1).Points(j).MarkerBackgroundColor = RGB(0, 180, 0)
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(1).Points(j).MarkerForegroundColor = RGB(0, 180, 0)
```

```
Else
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(1).Points(j).MarkerBackgroundColor = RGB(255, 0, 0)
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(1).Points(j).MarkerForegroundColor = RGB(255, 0, 0)
```

```
End If
```

```
j = j + 1
```

Next

Application.Visible = True

End Sub