



Ricardo Tavares Moura Ferro

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Melhoria do processo de montagem de
um componente estrutural da asa de
uma aeronave**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Victorovna
Guitiss Navas, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias

Vogais: Prof. Doutora Rosa Maria Marquito Marat-Mendes
Prof. Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas

**Melhoria do processo de montagem de um componente estrutural da asa
de uma aeronave**

Copyright © 2018 **Ricardo Tavares Moura Ferro**

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradecer, desde já, à minha professora e orientadora, Professora Doutora Helena Navas pelo entusiasmo, motivação, permanente disponibilidade e orientação no desenrolar deste trabalho.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pela formação dada que contribuiu para o meu crescimento pessoal.

Gostaria de agradecer ao Engenheiro Luís Miguel Lopes Correia, Supervisor de Metálicas, e à minha supervisora do estágio, a Engenheira Ana Rita Santos Oliveira, pela oportunidade de estágio na Embraer Portugal S.A, assim como à equipa de Engenharia e Metrologia, pelo vasto conhecimento e disponibilidade apresentados ao longo do período deste trabalho.

À minha família, pelos valores e princípios passados, pela educação que me foi proporcionada e pelo amor e carinho nos períodos menos positivos.

Ao meu grupo de amigos, que prevalece desde os tempos de colégios e do qual nos orgulhamos por fazer parte das vidas uns dos outros, por serem a família que eu escolhi.

Aos amigos da faculdade David Almeida, Francisco Crespo, João Horta, Ruben Lopes e Roberto Coelho por me acompanharem neste percurso.

Por fim, à Mariana, pela companhia, partilha e estima, de quem está sempre presente, mesmo estando afastados, e pela cumplicidade, alegria e motivação.

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido, em meio empresarial, no âmbito de um estágio curricular na Embraer Portugal S.A.

Desde que a fábrica abriu, que a empresa confronta-se com inconformidades na montagem de um componente estrutural da asa, a “Igrejinha”. Essas inconformidades apenas se tornam visíveis, nos resultados das medições com laser a que o produto final é submetido, apresentando valores que deixam a componente fora das tolerâncias exigidas.

Com o objetivo de aumentar a precisão de montagem da “Igrejinha”, há 4 anos atrás foi desenvolvido um gabarito de montagem específico, mas que se encontra fora de serviço.

Foi proposto, assim, uma melhoria do processo de montagem da componente em estudo, com base em todo o processo de montagem da asa e o gabarito existente, de modo a garantir o cumprimento das tolerâncias de forma e de posição especificadas.

Foi efetuada a análise da situação inicial através da qual foram identificados alguns problemas e algumas oportunidades de melhoria. Foram elaboradas e implementadas algumas propostas de melhoria, nomeadamente a melhoria e alteração do gabarito existente, foi elaborado um novo procedimento de montagem do referido componente e o processo de cravação foi revisto no sentido de garantir a forma desejada da peça.

Está também em curso a elaboração de um novo gabarito de instalação para “Igrejinha” assim como um novo método de fabrico das peças que as constituem, substituindo algumas operações de estampagem por maquinagem.

As propostas de melhoria já implementadas, e em curso, permitirão garantir um aumento da taxa de aceitação das “Igrejinhas”, reduzindo significativamente o retrabalho, e com isso os custos e tempos associados (de 10 horas para 5,5 horas de trabalho)

Os operadores da linha de montagem, ao serem inqueridos, mostraram uma elevada satisfação com a alteração do gabarito existente, por este permitir uma operação mais intuitiva, simples, ergonómica e rápida.

Palavras-chave: Melhoria, Montagem, Tolerâncias, Gabarito, *Torque Box*, Redução de desperdícios

Abstract

The current work was developed in the business environment, within the scope of a curricular internship at Embraer Portugal S.A.

Since the factory opened, the company has been confronted with serious quality problems with nonconformities in the assembling of a structural component of the wing, the "Igrejinha". These nonconformities only become visible after the results of the laser measurements to which the final product is submitted, presenting values that leave the component out of the tolerances required.

To increase the assembling precision of the "Igrejinha", 4 years ago a specific assembling jig was developed, however it is out of order.

An improvement in the assembling process of the component in study has been proposed, based on the entire wing assembling process and the existing jig, to ensure compliance with a specific shape and position tolerances.

An analysis of the initial situation was carried out, identifying some problems and some improvement opportunities. Therefore, some improvement proposals were elaborated and implemented, namely the existing jig was improved and altered, a new procedure for its assembly was elaborated, and the riveting process was revised in order to guarantee the desired shape of the part.

Also, a new installation jig for "Igrejinha" is being developed as well as a new method of manufacturing its parts, replacing some machining operations.

The improvement proposals already implemented and the ones in progress will allow an increase of the acceptance rate of the "Igrejinhas", reducing significantly the rework, and with that the associated costs and times (from 10 hours to 5.5 hours of work).

The operators of the wing assembling line, when asked, showed a high satisfaction with the alteration of the existing jig, because it allows a more intuitive, simple, ergonomic and fast operation.

Keywords: Improvement, Assembling, Tolerances, Jig, Torque Box, Waste Reduction

Índice de Matéria

Índice

Índice de Matéria.....	x
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas.....	xiv
1- Introdução.....	1
1.1- Enquadramento e objetivos do estudo.....	1
1.2- Metodologia e contributos do estudo	2
1.3- Estrutura da dissertação	3
2- Filosofia <i>Lean</i>	5
2.1- Origem	5
2.2- Princípios <i>Lean</i>	6
2.3- Os sete desperdícios.....	7
2.4- Ferramentas <i>Lean</i>	8
2.4.1- <i>Poka yoke</i>	8
2.4.2- <i>Kaizen</i>	8
2.4.3- Ciclo PDCA	9
2.5- <i>Lean</i> aplicado à aeronáutica.....	10
2.6- <i>Lean</i> aplicado aos processos de montagem –.....	10
3- Outras Técnicas e Ferramentas	13
3.1- <i>Brainstorming</i>	13
3.2- Observação direta.....	13
3.3- Diagrama de Pareto.....	14
3.4- Os 5 porquês	14
4- Toleranciamento GD&T.....	15
5- Processo de Cravação	19
6- Estudo de caso	23
6.1- Grupo Embraer	23
6.2- Embraer Portugal S.A.	24
6.3- P3E – Programa de excelência empresarial Embraer.....	26
6.4- Caracterização do processo de montagem da asa.....	27
6.5- Caixa de Torção ou “Igrejinha”	33
6.6- Identificação de problemas e de oportunidades de melhoria	35
6.6.1- Processo	38
6.6.2- Posicionamento	40
6.6.3- Montagem	43
6.6.3.1- Fornecedores de peças.....	43
6.6.3.2- Gabarito de montagem	47

6.6.3.3- Processo de cravação.....	50
6.6.4- Dimensionamento	53
6.7- Propostas de melhoria	54
7- Conclusões Finais	59
7.1- Discussão de resultados	59
7.2- Conclusões e trabalhos futuros	61
Bibliografia.....	63
Anexos.....	67
Anexo A – Linha de montagem.....	68
Anexo B – Medição local do revestimento extradorso.....	69
Anexo C – Medição local do revestimento intradorso.....	70
Anexo D – Exemplo do layout do Inquérito.....	71
Anexo E – Relatório de medição tridimensional de uma <i>rib</i>	72
Anexo F – Relatório de medição tridimensional de um selo	75
Anexo G – Exemplo das alterações sugeridas	79

Índice de Figuras

Figura 2. 1 - Sobreprodução e manuseamento duplo	7
Figura 4. 1 - Zona de tolerância cartesiana	15
Figura 4. 2 - Zona de tolerância circular	16
Figura 5. 1 - Evacuação da aeronave depois da bem sucedida aterragem	19
Figura 5. 2 - Deformação dos painéis após cravação	20
Figura 5. 3 - Corpo de prova com os 10 rebites em linha	21
Figura 5. 4 - Corpo de prova com 2 linhas, de 5 rebites cada	21
Figura 5. 5 - Deformações resultantes no corpo de prova com 10 rebites	22
Figura 5. 6 - Deformações resultantes no corpo de prova de 2 linhas de rebite	22
Figura 6. 1 - Embraer no mundo	23
Figura 6. 2 - Projeto VTOLs	24
Figura 6. 3 - Embraer Portugal S.A.	25
Figura 6. 4 - Planta do hangar de Metálicas S.A.	26
Figura 6. 5 - Valores do programa P3E	27
Figura 6. 6 - Anatomia básica de uma aeronave	28
Figura 6. 7 - Superfícies de controlo e suas funções	28
Figura 6. 8 - Nomenclatura da asa	29
Figura 6. 9 - Resultado da montagem no final da estação do Bordo de Fuga	30
Figura 6. 10 - Revestimento intradorso após estação de Costura	30
Figura 6. 11 - Revestimento extradorso após estação de Costura	30
Figura 6. 12 - Resultado da montagem da asa no final da Estação 1	31
Figura 6. 13 - Resultado da montagem da asa no final da Estação 5	31
Figura 6. 14 - Gabarito da Complementação	32
Figura 6. 15 - Aparelhos de medição utilizados na Complementação	32
Figura 6. 16 - Representação dos vectores da força de sustentação e arrasto	33
Figura 6. 17 - Posição da "Igrejinha" na asa	33
Figura 6. 18 - Passagem de escoamento laminar para escoamento turbulento	34
Figura 6. 19 - A "Igrejinha" em peças e como conjunto final	34
Figura 6. 20 - Tolerância de superfície admitida	35
Figura 6. 21 - Definição do plano HJ, utilizado para medição local	36
Figura 6. 22 - Medição lateral da Igrejinha em relação ao plano HJ	37
Figura 6. 23 - Volume de manobra para posicionamento da Igrejinha	37
Figura 6.24 - Categorias dos problemas levantados nos inquéritos quanto à tolerância de posição	38
Figura 6.25 - Categorias dos problemas levantados nos inquéritos quanto à tolerância de forma	38
Figura 6. 26 - Resultado da medição feita após operações no Bordo de Fuga	39
Figura 6. 27 - Resultado da medição feita na Complementação	39
Figura 6. 28 - Emendas em "L" que são fixas definitivamente na <i>spar</i>	40
Figura 6. 29 - Distância d1 e d2 com relação direta ao Datum J, da hinge 2	41
Figura 6. 30 - Batentes do gabarito, em relação à hinge 2	41
Figura 6. 31 - Técnica adotada pelos operadores para posicionamento da "Igrejinha"	42
Figura 6. 32 - Resultado da medição de posição das laterais da "Igrejinha"	42
Figura 6.33 - Subcategorias da Montagem	43
Figura 6. 34 - Peças que constituem a "Igrejinha"	43
Figura 6. 35 - Peças com influência na forma final da "Igrejinha"	44
Figura 6. 36 - Resultado da medição de uma das Ribs	44
Figura 6. 37 - Peça aprovada após medição tridimensional	45
Figura 6. 38 - Resultados da medição tridimensional de um Selo	46
Figura 6. 39 - Gabarito desenvolvido especificamente para a montagem da "Igrejinha"	47
Figura 6. 40 - Desalinhamento entre o suporte da bandeja e as Ribs	47
Figura 6. 41 - Desalinhamento entre furos que provocava o desalinhamento entre o suporte e as Ribs	48
Figura 6. 42 - Definição do Datum A pelos pontos azuis	48
Figura 6. 43 - Resultados da medição de planicidade com os Datuns iniciais	49
Figura 6. 44 - Resultado da medição de planicidade com os Datuns adaptados A, B e C	49
Figura 6. 45 - Resultados da medição de planicidade com os Datuns adaptados D,E e F	50

Figura 6. 46 - As primeiras peças a serem cravadas sem relação à forma e posicionamento final _____	51
Figura 6. 47 - Cravação do revestimento extradorso _____	51
Figura 6. 48 - Processo de cravação do revestimento intradorso e do selo ao revestimento extradorso __	52
Figura 6. 49 - Resultados do relatório de medição da lateral da "Igrejinha" _____	52
Figura 6. 50 - Encurvamento originado pela cravação da zona do Selo _____	53
Figura 6. 51 - Proposta para nova linha de montagem e instalação da "Igrejinha" _____	54
Figura 6. 52 - Peças que constituem as hinged _____	55
Figura 6. 53 - Gabarito de instalação das hinged 2 e 3 _____	55
Figura 6. 54 - Alteração proposta às peças da Igrejinha _____	56
Figura 6. 55 - Sentido de cravação utilizado que promovia "barriga" _____	57
Figura 6. 56 - Sequência de cravação sugerida e adotada tendo em conta o lado de medição _____	57
Figura 6. 57 - Resultado da medição da asa direita após adotada sequência de cravação sugerida _____	58
Figura 6. 58 - Resultado da medição da asa esquerda após adotada sequência de cravação sugerida _____	58
Figura 7. 1 - Resultados da "Igrejinha" que chumbou na medição tridimensional _____	59
Figura 7. 2 - Resultados do relatório de medição do avião 10051 _____	60
Figura 7. 3 - Resultados dos relatório de medição do avião 10051 após retrabalho de posicionamento __	60
Figura A. 1 - Linha de montagem da asa de uma aeronave _____	68
Figura A.2 - Resultado da medição do revestimento extradorso, após retrabalho _____	69
Figura A.3 - Resultado da medição do revestimento intradorso, após retrabalho _____	70
Figura A.4- Layout do inquérito realizado aos trabalhadores _____	71
Figura A.5 - Datuns definidos para medição tridimensional da Rib	72
Figura A.6 - Resultados de medição tridimensional da aba extradorso	73
Figura A.7- Resultados de medição tridimensional da aba intradorso.....	74
Figura A.8- Datuns definidos para medição tridimensional do Selo	75
Figura A.9 - Resultados de medição tridimensional do extradorso do Selo	76
Figura A.10 - Resultados de medição tridimensional do intradorso do Selo	76
Figura A.11 -Resultados de medição tridimensional da ponta do Selo	78
Figura A.12- Resultados de medição tridimensional de uma lateral do Selo	78
Figura A.13- Proposta para adicionar pré-furos na Selo	79

Índice de Tabelas

Tabela 4. 1 - Símbolos para tolerâncias GD&T _____	16
Tabela 6. 1 - Tempo de Montagem da componente "Igrejinha" no roteiro de montagem anterior _____	56
Tabela 6. 2 - Tempo de Montagem da componente "Igrejinha" no novo roteiro _____	56
Tabela 7. 1 - Lista dos aviões onde foi instalada "Igrejinha" desenvolvida no gabarito subconjuntos____	59

Abreviaturas e Acrónimos

CD&T – *Classical Dimensioning and Tolerancing*
GD&T – *Geometric Dimensioning and Tolerancing*
PEE – Programa de Especialização em Engenharia
PPE – Programa Projetista Embraer
VTOL – *Vertical Take-Off and Landing*

1-Introdução

No presente capítulo serão introduzidos o enquadramento e objetivos do estudo, a metodologia e contributos do estudo assim como se a estrutura da dissertação.

1.1- Enquadramento e objetivos do estudo

A partir do início do séc. XVIII, após a primeira Revolução Industrial, o objetivo principal das empresas produtoras passou a ser o aumento do nível de fluxo de produção. O elevado crescimento das técnicas adotadas neste tipo de sector, tem sido responsável pelo consumo desmesurado dos recursos, que em tempos eram abundantes, desrespeitando os ciclos de regeneração natural dos mesmos. A utilização desmedida destes recursos, promove uma exagerada produção de desperdícios devido à baixa eficiência da produção e com consequências impactantes nos custos que as empresas detêm. Deste modo, as empresas e organizações sentem cada vez mais a necessidade de inovar a fim da sua eficiência, competitividade e rentabilidade aumente (Navas, 2013).

Assim, por forma a combater esta ineficiência produtiva, os avanços tecnológicos que têm vindo a ser sentidos nestes últimos anos, surgem com o objetivo de tornar exequível a extração de uma maior quantidade de produto proveniente da mesma quantidade de recurso anteriormente utilizada, dissociando-se a ideia de maior produção aliada a um maior consumo.

Este aumento de eficiência operacional não se alcança de um dia para o outro. Consegue-se através de várias experiências de tentativas-erro que permitem desenvolver o conhecimento certo, em cada sector, consentindo o seu crescimento de forma sustentável.

A melhoria contínua de processos gera resultados muito bons respeitantes à redução de custos que a empresa apresenta assim como um aumento da produtividade de trabalho. A criação de novos produtos, o desenvolvimento de novos processos e a melhoria dos fluxos permite um ganho substancial na qualidade dos produtos.

As técnicas e metodologias utilizadas estão incutidas em modelos como o da Filosofia *Lean*. Ao serem implementadas, auxiliam a melhoria dos processos organizacionais com o propósito de servir o cliente através de produtos e serviços de melhor qualidade e permitindo melhorar processos e reduzir desperdícios.

Desde o fabrico das peças primárias, passando pela linha de montagem das várias componentes de um avião (o *Cockpit*, a Fuselagem, a Asa, a Empenagem, o trem de Aterragem), até chegar à montagem total da aeronave, muitas são as operações que merecem um supervisionamento de qualidade. Este deve ser executado em conformidade com as exigentes e restritas regulamentações que são mandatários em prol da segurança.

É com base nestes princípios de melhoria na qualidade do produto final, que a Embraer emprega as ferramentas que a Filosofia *Lean* oferece, em todos os seus processos de produção, visando a insistente necessidade de reduzir os desperdícios e com isso os custos de operação.

Assim, todas as formas de melhoria de montagem de componentes devem ser adotadas. As técnicas antiquadas de montagem, com necessidade de dois operadores para a sua execução, ou o auxílio de máscaras de furação, por exemplo, podem ser, nos dias que correm, facilmente substituídas. Graças aos avanços tecnológicos, através de um simples algoritmo desenvolvido, é possível obter dimensões e formatos cada vez mais exatos, que permitirão realizar a montagem total do conjunto em tempos muito reduzido e com precisões muito elevadas.

O desenvolvimento do produto em gabaritos dedicados permite libertar espaço nas linhas de montagem, aumentar a eficiência da sua montagem e a não necessidade de despende tempo, no controlo de conformidade, uma vez que as especificações do produto foram tidas em consideração para a conceção do ferramental, por exemplo.

Desta forma, o objetivo do estudo desenvolvido foi melhorar o processo de montagem de uma das componentes estruturais da asa, a *Torque Box*, ou como designada na Embraer a “Igrejinha”, passando a sua montagem para subconjunto, num ferramental totalmente desenvolvido para o cumprimento das funções que a componente terá de obedecer.

1.2 Metodologia e contributos do estudo

As matérias que foram necessárias aprofundar conhecimento, para a resolução deste trabalho, foram várias e diferenciadas. Desde toleranciamento e processos de cravação, ao conceito de Filosofia *Lean*, todas tinham influência na melhoria contínua do processo de montagem da componente “Igrejinha”. Assim, e de maneira a conseguir alcançar o objetivo traçaram-se diversas atividades a realizar de forma metódica:

- 1- Através da observação direta, reter a maior quantidade de informação possível ao acompanhar toda a linha de produção da asa, tendo especial atenção à componente em questão.
- 2- Realização de *brainstorming* com engenheiros, operadores e monitores de linha, para identificar pontos críticos que poderiam ter influência negativa no produto final Asa.
- 3- Desenvolvimento de inquéritos aos engenheiros, operadores e monitores de linha, em que o seu trabalho estava diretamente relacionado com a componente “Igrejinha”, para identificação dos problemas específicos sobre o caso de estudo.
- 4- Compreensão dos problemas levantados nos inquéritos para definir as causas e efeitos dos mesmos e identificação das causas principais.
- 5- Análise a relatórios de medição tridimensional assim como a estudos já realizados sobre os principais problemas identificados no ponto 4.
- 6- Apresentação de algumas propostas de melhoria sobre alterações aos processos de montagem da “Igrejinha”. Algumas foram implementadas enquanto outras poderão ser futuramente consideradas.

Com a realização deste estudo, a empresa Embraer Portugal S.A., teve ganhos consideráveis na poupança de tempo na realização da montagem da “Igrejinha” e melhoria da qualidade das mesmas. Foi possível reduzir desperdícios através de ferramentas *Lean*, como por exemplo, os projetos *kaizen* que a própria empresa com regularidade pratica, bem como com a utilização de outras ferramentas, como os “5 Porquês”. Graças à total disponibilidade de toda a equipa de engenharia bem como dos operadores da linha de montagem e à liberdade que foi dada para melhorar os processos associados a este estudo, foi possível aprimorar o processo de cravação aplicando a técnica tentativa-erro em cada montagem que se realizava. A interpretação de resultados provenientes das medições tridimensionais que o departamento de metrologia executa, foram uma ajuda muito grande para validar os novos processos adotados para garantir a forma (aerodinâmica) da componente em causa.

Para além das questões técnicas testadas e validadas, o processo tornou-se mais ergonómico, simples e fácil para o operador.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se dividido em sete capítulos principais. De notar, que do segundo capítulo ao quinto capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos que ajudaram ao desenvolvimento da dissertação. Encontram-se em diferentes capítulos, por serem de áreas distintas, mas todos eles importantes para a compreensão do caso de estudo. De seguida, apresenta-se uma pequena descrição de cada um dos capítulos.

- Primeiro capítulo “Introdução” - Neste capítulo inicial é dado a conhecer o âmbito do caso de estudo e a sua relevância para a empresa. É apresentada a metodologia utilizada para a sua resolução, assim como as matérias relevantes para o seu entendimento. Por fim, é apresentada a estrutura do documento, para uma melhor orientação.
- Segundo capítulo “Filosofia *Lean*” - A procura incessante pela melhoria faz parte do crescimento das empresas e de cada indivíduo. Mas, nem todos possuímos esta capacidade natural. Existem técnicas que podem ser adotadas, que nos permitem alcançar esta maneira de estar com nós próprios e com os outros e que ajudaram um país, como o Japão, a reerguer-se e a ser considerado um exemplo nos tempos que correm. Neste capítulo teórico, apresenta-se uma introdução histórica, ferramentas desta cultura e como a aeronáutica abraça esta filosofia, para alcançar excelência que lhe é reconhecida.
- Terceiro capítulo “Outras Técnicas e Ferramentas” - Cada vez mais, existem técnicas e ferramentas que nos auxiliam na resolução eficiente dos problemas. No terceiro capítulo, serão detalhadas as ferramentas e técnicas utilizadas para descobrir as causas-raiz do problema levantado.
- Quarto capítulo “Toleranciamento GD&T” - A metrologia é a área que se dedica ao estudo dos aspetos teóricos e práticos na medição de tolerâncias. Sendo a aeronáutica um sector em que as tolerâncias são muito apertadas, por questões de segurança, desenvolve-se neste capítulo uma dedicada introdução ao toleranciamento que despoletou o problema sobre o qual esta dissertação se debruça.
- Quinto capítulo “Processo de Cravação” - A grande maioria das peças que fazem parte da estrutura do avião, a determinada fase da sua vida útil, são sujeitas ao processo de cravação. É um dos processos mais utilizados na manufatura aeronáutica, no entanto existe muito ainda por onde explorar. Assim, introduz-se no quinto capítulo razões sobre o aparecimento de estudo deste processo de modo a entender-se algumas conclusões que foram retiradas nesta tese.

- Sexto capítulo “Caso de Estudo” - Depois dos fundamentos teóricos necessários à compreensão do problema, no sexto capítulo é introduzida a empresa na qual foi desenvolvida a dissertação e o problema apresentado, a identificação de dificuldades e de oportunidades de melhoria referentes a esse problema, as técnicas e ferramentas utilizadas, como foi melhorado e a discussão dos resultados obtido.

- Sétimo capítulo “Conclusões Finais” - Neste último capítulo são discutidos os resultados obtidos ao longo do estudo, são dadas algumas indicações do que se sucederá futuramente para garantir a continuidade deste trabalho e apresentadas algumas considerações sobre o funcionamento da empresa.

2-Filosofia *Lean*

Neste capítulo teórico serão descritos a origem, princípios e desperdícios da filosofia *Lean*, e ferramentas frequentemente utilizadas na implementação deste conceito.

2.1- Origem

Henry Ford revolucionou o mundo do sector industrial através da produção em massa. A linha de montagem desenvolvida por ele, permitiu que o modelo T, da Ford, fosse produzido em menos tempo e com custos inferiores. Ford desenvolveu esta metodologia pela necessidade de responder à grande procura existente. Este tipo de produção permitia antecipar, reduzir e eliminar todas as atividades que resultassem num decréscimo de valor ao produto (Duguay. et all. 1997).

A produção em massa estava a revitalizar o sector industrial e a permitir grandes avanços no desenvolvimento de processos. No entanto, no seguimento de toda a inovação que o sector industrial estava a ser submetido havia um critério que parecia não ser possível obter ao mesmo tempo que se produzia em grandes quantidades. Em sistemas de produção em massa, a variedade dos produtos tornava-se muito difícil de alcançar (Wolmack & Jones, 1996).

Com esta técnica inovadora de produção, a oferta acabou por superar a procura dos bens e com isso a competitividade das empresas aumentou. Havia agora a necessidade de se produzir mais, mas com custos mais baixos, eliminando qualquer tipo de desperdício e apostando fortemente na inovação e na melhoria contínua.

Com os olhos postos em melhorar continuamente os processos, cada empresa tem interesse em o fazer de forma individual através da sua própria gestão, tecnologias e métodos disponíveis. (Demeter & Matyusz, 2011)

Foi assim que nasceu a produção *Lean*, também conhecido por *Toyota Production System* (TPS) que foi desenvolvido nas fábricas de produção automóvel da *Toyota Motor Corporation*. Numa altura em que o Japão lutava pela reconstrução de um país, após a 2ª Guerra Mundial, a indústria norte-americana e a europeia possuíam grandes capacidades e recursos. No entanto, encontravam-se muito rígidas perante os processos de fabrico e com uma gestão demasiado complexa que limitava a sua capacidade de adaptação ao mercado de trabalho.

Taiicho Ohno, Shigeo Shingo e Eiji Toyoda sabiam que para a fábrica sobreviver tinham de desenvolver um sistema totalmente novo. E através do *Lean* conseguiram implementar uma nova mentalidade que se baseia na eliminação de desperdícios e orientado para a satisfação do cliente e que conta com a interação e participação de todos os colaboradores.

A produção *Lean* foi criada de forma a implementar uma forma evoluída de gestão de uma empresa com o objetivo de maximizar a eficiência operacional, qualidade, rapidez e custo (Holweg, 2007).

As alterações implementadas pelas empresas com o objetivo de criar maior valor nas suas produções estão diretamente ligados aos sectores onde existem maiores quantidades de desperdícios. Esses desperdícios aumentam os custos associados à produção e é neles que devem ser focadas as oportunidades de melhorias. O impacto inerente à implementação do conceito *Lean* é bastante significativo, porque muitas organizações consideram-no como o

sistema de produção mais apropriado à obtenção de lucro e de se tornar competitivo em relação a outras organizações (Womack & Jones, 1996).

2.2- Princípios Lean

A implementação da Filosofia *Lean*, não se traduz somente numa mudança de paradigma na concepção do produto. Para se retirar o maior proveito do seu potencial devemos entender e respeitar um conjunto de conceitos sobre os quais este pensamento baseia-se – os 5 princípios do *Lean*, sugeridos por Womack & Jones (2003).

Estes princípios tornam-se bastante proveitosos quando interligados entre si identificando de forma sistemática os desperdícios nos diversos sistemas produtivos numa organização (Gupta & Jain, 2013). São definidos como:

Valor – Considera-se o ponto de partida para a aplicação do *Lean* e deve ser definido pelo cliente final. Cabe às empresas determinar com os clientes características ou atributos dos produtos e/ou serviços pretendidos de modo a satisfazerem as necessidades e expectativas dos mesmos. Cumpre-se desta forma os requisitos do cliente em tempo específico e a um preço justo.

Cadeia de Valor – Identificação de todos os processos que dão valor e de todos os desperdícios existentes em operações e ações envolvidas no desenvolvimento de um produto concreto que o cliente deseja. Desta forma, divide-se os processos em partes diferentes para entender quais os que dão valor ao produto, quais os que não dando valor ao produto são vitais para a manutenção e qualidade do mesmo – *Muda* (tipo um) - e ainda os que não acrescentam valor nenhum ao produto e que são desnecessárias – *Muda* (tipo dois). (Womack and Jones, 1996).

Fluxo – Este princípio surge para contrariar as produções em grandes lotes que se realizavam no contexto de produção em massa. Divididos os processos pela capacidade que têm de agregar valor ao produto, é possível tornar o processo geral mais fluido. Este fluxo contínuo de produção é caracterizado pela capacidade de produzir o que é necessário e quando é necessário, evitando e eliminando desperdícios. Para se conseguir gerar este fluxo é preciso diminuir os tempos associados às trocas de ferramentas e garantir que o layout do sistema produtivo é o mais adequado gerando uma sequência no alinhamento de equipamentos correta (Weigel, 2000)

Pull – Na grande maioria, não é a necessidade do cliente que faz as indústrias produzirem. O cliente vê-se pressionado e induzido à compra de produtos por vezes indesejados. O princípio Pull surge para fazer força contra este pensamento e torna-se uma das ferramentas chaves principais para a diminuir o excesso de produção (Wilson, 2010). O produto passa a ser produzido apenas quando o cliente faz o pedido, reduzindo os níveis de *stock* e do *WIP - Work in Progress* (Weigel, 2000).

Perfeição – A perfeição é uma condição que não é alcançável na indústria. Os erros na concepção existem desde a primeira peça e propagam-se ao longo de todo um processo.

No entanto, ao longo deste processo existem desperdícios que podem ser eliminados. É nesse sentido que a perfeição se torna num princípio do pensamento *Lean*, eliminando todos os processos que não dão valor ao produto ou serviço desenvolvido e manter uma melhoria contínua nos que acrescentam valor ao mesmo.

2.3- Os sete desperdícios

A palavra *muda* tem origem japonesa e significa lixo, inutilidade, desperdício. E na filosofia *Lean* pretende-se a eliminação deste tipo de conceito. Um processo que não acrescente valor ao produto, consome recursos e conseqüentemente encarece-o. Mas o cliente não está disposto a pagar mais por *Mudas*.

Os princípios acima descritos permitem atuar sobre este conceito e para uma melhor compreensão do mesmo, Suzaki (1987) identificou as sete principais fontes de desperdícios.

Defeitos – o defeito é uma inconformidade no produto que está associado a tempo, mão-de-obra, máquinas que foram utilizadas em vão e que irão fazer com que se espere para resolver o problema. Caso o defeito seja apenas identificado pelo cliente pode afetar a cota de mercado da empresa, manchando a imagem em possíveis futuros negócios.

Tempo de Espera – se os recursos para o desenvolvimento do produto não se encontram disponíveis, por questão de manutenção, avaria, mudança de ferramentas, a produção tem de ser interrompida e diminui-se a produtividade da mesma.

Stocks – O stock está associado a um excesso de materiais, componentes ou produtos que estão sendo produzidos, mas que não são necessários, no imediato, por parte do cliente ou do processo. Este desperdício encobre problemas como a fraca organização e arrumação, longos *setups* e transportes, entre outros (Suzaki, 2010).

Transportes desnecessários – A movimentação de materiais de um posto de trabalho para outro, em nada acrescenta valor ao produto. Torna o ciclo de processamento mais longo resultando em ineficiência de trabalho e com manuseamento excessivo pode deteriorar os produtos trazendo custos associados desnecessários.

Sobreprodução – Considerado um dos maiores desperdícios na indústria, a produção a mais traduz-se em matérias-primas utilizadas de forma desnecessária assim como de todos os restantes recursos (transportes, mão-de-obra...) que se utiliza para o desenvolvimento do produto. A figura 2.1 ilustra esta situação.

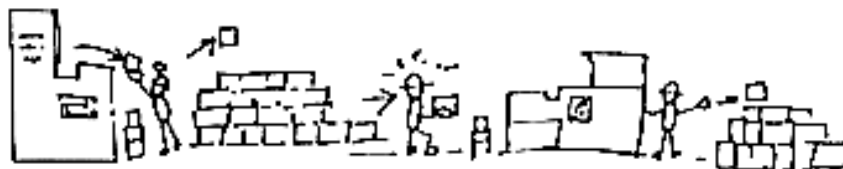


Figura 2. 1 - Sobreprodução e manuseamento duplo (adaptado de Suzaki, 1987)

Movimentos desnecessários – A apresentação de layouts confusos e sem sentido, assim como práticas de trabalhos incorretas podem provocar movimentações em excesso que em nada agrega valor ao produto.

Sobre processamento – Qualquer operação que esteja a oferecer ao produto algo mais que os requisitos do cliente, traduz-se no uso excessivo de tempo, mão-de-obra, maquinaria e com isto desperdício (Wilson, 2010).

2.4 Ferramentas Lean

Apresenta-se de seguida a descrição de algumas ferramentas muito utilizadas na produção no sector industrial.

2.4.1 Poka -yoke

O cansaço acumulado nos trabalhadores é um fator que se deve ter em consideração numa linha de montagem. Uma das consequências deste tipo de situação é a natural falta de concentração, que pode levar à escolha do ferramental errado para furação, podendo danificar, sem solução possível, todo um produto no início, a meio ou no fim do seu processo de desenvolvimento.

Para que não aconteçam situações como a descrita criou-se o *Poka-Yoke*. Baseia-se na criação de uma ferramenta que quando instalada numa máquina ou estação de trabalho previne o erro. Essa prevenção é conseguida porque a ferramenta foi concebida somente para aquela finalidade não sendo possível a sua instalação em mais nenhuma situação. Este é o conceito *Poka-Yoke*, um dispositivo à prova de erro.

2.4.2 Kaizen

A palavra *kaizen*, de origem japonesa, pode ser dividida em duas palavras que dão origem ao real significado da mesma: *Kai* que significa “mudança” e *Zen* que significa “para melhor” (Singh & Singh, 2009). Desta forma esta ferramenta quando utilizada anuncia uma mudança capaz de contribuir para o aumento da competitividade de uma empresa, sem a utilização de equipamento de elevado custo ou técnicas sofisticadas (Ghicajanu, 2011).

O reconhecimento dos problemas é o primeiro passo para que haja melhorias. Assim, todos os colaboradores da empresa são encorajados a sugerir alterações que levem a uma melhoria do processo produtivo, através de pequenas etapas e ações. Isto, pode levar a um acumular significativo das mesmas, porém as suas resoluções demonstram que o *kaizen* não é uma ferramenta de atividade mensal ou anual: tem de ser contínuo (Liker 2004)

O *Kaizen* assenta em princípios que sustentam a evolução contínua, sem ser com base numa implementação rápida. Esses princípios permitem uma maior eficácia e melhoria gradual da performance e qualidade de uma empresa. Eles são:

- Gemba – Significa a ida à linha de produção para observar os processos que realmente dão valor ao produto.

- Desenvolvimento de pessoas – Todas as pessoas devem intervir no processo de melhoria para a criação e adaptação dos novos hábitos.
- Gestão visual – Métodos e ferramentas identificados permitem uma maior eficiência e eficácia
- Processo e resultados – Traçar bem o objetivo que se pretende alcançar
- Qualidade em primeiro lugar – Sempre com a orientação virada para o cliente para que este obtenha a melhor qualidade do produto que pretende.
- Eliminação de Desperdícios – A base de todo o pensamento *Lean*
- Pull Flow – o fluxo de material tem de ser definido pela demanda da parte do cliente.

2.4.3 Ciclo PDCA

O PDCA ou ciclo de *Deming* é um *driver* de mudança para um plano de sustentabilidade, sendo desta forma um método focado na melhoria contínua. Pelas suas planeadas e controladas ações é um meio para aplicação de ferramentas *Lean* (Pinto, 2009).

Baseia-se em 4 passos que permitem a execução de uma ação planeada de forma eficaz, alimentando uma contínua verificação e atuação sobre a mesma.

A “roda de *Deming*” foi uma melhoria feita ao modelo já existente de Walter Shewhart, através da introdução de mais um passo na sua metodologia. Este passo, permitiu que o sistema se tornasse mais dinâmico e determinantes na melhoria contínua. Os 4 passos são os que dão nome ao seu sistema e são:

Plan (Planeamento) – Um grande número de ações que se adota com o objetivo de melhorar um processo ou um planeamento, cai por terra pela falta de planeamento existente dessas mesmas ações. Para contrariar isto, é nesta etapa, que se analisa o que se pretende e onde é que existem as oportunidades de melhorar, de modo a ser alcançado um entendimento que vá de encontro a todas as partes envolvidas. A partir daí deve-se estabelecer metas e objetivos que devem ser cumpridos em determinados períodos de tempo.

Do (Executar) – Com base no planeamento realizado anteriormente, é nesta fase em que são implementadas as ações que permitirão alcançar os objetivos e metas traçadas. Por vezes, pode mesmo ser necessário a formação em determinadas áreas dos colaboradores para que seja possível cumprir-se o que foi traçado.

Check (Verificação) – Para que a avaliação seja feita de forma coerente e contínua, todo este processo deve ser monitorizado e documentado. Isto permite não só validar os valores em futuras melhorias que se pretenda executar, assim como ter uma ideia se o planeamento está a ser seguido. É possível também determinar nesta fase, algumas causas de possíveis desvios que possam estar a acontecer.

Act (Acção) – Nem sempre os resultados obtidos são os esperados, e nestas alturas há que definir um plano de ação para estas situações. No entanto, mesmo para os resultados considerados positivos, deve ser traçado um novo plano de ação para continuar a sua melhoria, registar as lições aprendidas fomentando a boa prática comportamental.

2.5 Lean aplicado à aeronáutica

Em 1993, os pesquisadores do MIT (Massachusetts institute of Tecnology) foram os primeiros a associar a manufatura *Lean* ao mundo da aeronáutica, através de um estudo desenvolvido sobre os conceitos *Lean* existentes até à altura. Com o objetivo de introduzirem este paradigma na indústria aeronáutica militar – Força Aérea Americana (US Air Force) – foi criado o *Lean Aircraft Initiative* (LAI). “A LAI edifica e estende o paradigma do *Lean* por meio da busca em melhorar a produtividade e reduzir custos na indústria aeronáutica militar, em parceria com a Força Aérea Americana, MIT e mais de 20 indústrias” (Paulo Lindgren, 2001).

Assim o propósito da LAI era o da criação de valor nas empresas de forma confiável, tendo sido responsável pelo desenvolvimento de princípios, processos e comportamentos que levaram as empresas deste sector a níveis de excelência.

Através da *Lean Enterprise Institute*, várias empresas norte americanas informaram que obtiveram melhorias específicas e quantificáveis com a implementação das ferramentas *Lean*, havendo especial foco em ganhos nos departamentos de manufatura.

Com esta ideia de crescimento e de excelência empresarial, em Portugal, começou a ser estudado e desenvolvido este pensamento *Lean* e a ser também ele implementado na indústria militar. Em 2007, A Força Aérea Portuguesa implementou um projeto que tinha como objetivo aumentar a capacidade de manutenção e operacionalidade da aeronave F-16AM MLU, assim como, rentabilizar e maximizar os processos de trabalho e reduzir os custos de sustentação.

Nos dias que correm, em Portugal, a Embraer desenvolveu um programa de excelência empresarial baseado nos conceitos de *Lean*, chamada de P3E, que será explorado num capítulo mais à frente.

2.6 Lean aplicado aos processos de montagem –

A essência do pensamento *Lean* baseia-se na eliminação dos desperdícios existentes ao longo de um processo de desenvolvimento do produto. É um aspeto de referência que deve ser tido em conta nas linhas de montagem, uma vez que traduz a redução do consumo de recursos.

Processos que não permitam valorizar o produto final manifestam-se em custos adicionais para as empresas e isso o cliente não está disposto a pagar.

No entanto, as ferramentas associadas ao *Lean* que permitem este tipo de redução e até mesmo eliminação dos desperdícios, por si só não são suficientes. Não se trata de implementar, por exemplo, o ideal de espaço de trabalho ordenado, limpo e ergonómico (Ferramenta 5S do *Lean*), em que realiza-se a separação (Seiri) dos materiais de trabalho que não são necessários ou aplica-se etiquetas de forma e identificar todo o tipo de material e aloca-se os materiais em locais específicos (Seiton) (Falkowski & Kitowski, 2013)

O pensamento *Lean* tem de ser investido nas pessoas como um contínuo compromisso de gestão e como uma promoção de formas de estar de melhoria contínua (Lerman e Vodde, 2009).

A nossa forma de estar com nós próprios, juntamente com a forma de estar com os que nos rodeiam é que permitem desenvolver naturalmente uma cultura, personalidade, filosofia, que está associada ao *Lean Thinking*. Assim sendo existem 3 componentes de melhoria contínua, que Pinto (2009) as descreve, como meio de aprendizagem deste conceito:

1. Encorajar a que as pessoas comentam erros, para que possam aprender com eles e não voltem a repeti-los.
2. Incentivar e recompensar quem apresentar propostas de melhoria, baseado na ideia de que quem melhor conhece o processo ou ferramenta é quem opera.
3. Inculcar uma posição de insatisfação para com a atual situação em que se encontra para autossuperação.

A implementação do *Lean Manufacturing* é um processo que busca a perfeição, no entanto consciente que se trata de um processo sem fim e que o alcançar desta perfeição não é um objetivo alcançável e por isso ser um processo contínuo (Weigel, 2000).

3- Outras Técnicas e Ferramentas

Outras técnicas utilizadas frequentemente para ajudarem na resolução de problemas são o *brainstorming*, a observação direta, diagramas de Pareto e a técnica dos “5 porquês”, introduzidas neste capítulo.

3.1 *Brainstorming*

A utilização das ferramentas habituais na resolução dos problemas pode levar à formulação de ideias limitadas e com pouca criatividade e imaginação (Navas 2016).

Tal como o provérbio português diz “Duas cabeças pensam melhor que uma”. E, a partir desta ideia o *brainstorming* é, nos dias de hoje, muito utilizado na resolução de problemas. Da mesma forma, que se torna muito mais estimulante a troca de ideias entre um grupo de pessoas do que uma troca de argumentos entre duas pessoas com perspetivas contrárias.

A experiência partilhada dos vários membros de um grupo permite enriquecer a procura pela resolução de problemas que as organizações possam apresentar. Esta ferramenta foi popularizada, através do livro “*Applied Imagination*”, do autor Alex Faickney Osborn (1953), que desenvolveu o *brainstorming* como um método para explorar o potencial de novas e criativas ideias propostas livremente. Para isso o autor estabeleceu quatro regras gerais, para que as pessoas não se sentissem diminuídas pelas ideias apresentadas e fosse possível gerar ainda mais ideias para além das que já teriam sido apresentadas. Essas regras são:

- Procurar quantidade;
- Reter a crítica;
- Receber bem as ideias mais alternativas;
- Combinar as ideias entre si e melhorá-las;

Quanto mais variadas fossem as áreas de saber dos envolvidos na “tempestade de ideias”, mais ricas seriam as sugestões desenvolvidas pela riqueza de conhecimento inerente.

3.2 *Observação direta*

Como escreveu José Saramago (1995) “Se puderes olhar, vê. Se puderes ver, repara”.

A observação direta é uma ferramenta *Lean* que permite coletar, documentar e entender dados apenas por meio da observação. É uma técnica para reter informação detalhada sobre fenómenos de interesse observados, que não implica um aumento de custo financeiro na sua aplicação.

Permite obter dados sobre atividades e comportamentos sem a necessidade de depender da disposição e da capacidade das pessoas para responder a perguntas.

O tempo necessário para uma boa observação é relativo. Se quisermos uma descrição mais detalhada de um processo mais complexo, o tempo despendido na sua observação terá de ser maior. Maior ainda se nem uma prévia preparação houver. Iniciar a observação implica a organização de um projeto, de modo a realizar-se com o conhecimento da realidade a que se refere (Estrela, 1992).

3.3 Diagrama de Pareto

Os vários defeitos encontrados nos produtos produzidos promovem o não atendimento às especificações dos mesmos. Este é o maior problema da qualidade e várias são as técnicas adotadas para reduzir o número destas ocorrências. Dedicar todos os esforços à eliminação de todos os defeitos pode não ser a melhor solução e torna-se mais eficaz atacar as causas dos poucos defeitos que são responsáveis pela maioria das rejeições – Lei de Pareto.

Vilfredo Pareto efetuou um estudo sobre a sociedade de Milão, que verificou que 80% da riqueza estava distribuída por cerca de 20% da população (Jacobs et al., 2009). Este estudo, foi mais tarde transportado para a indústria pela semelhança na distribuição dos tipos de defeitos de determinado produto. Joseph Juran, um dos pioneiros na área de Qualidade, constatou que 80% dos problemas de qualidade tinha origem em 20% das causas.

O diagrama de Pareto possibilita estabelecer de maneira antecipada os problemas através da análise de um gráfico de barras ordenado pelas frequências das ocorrências, da maior para a menor (Neumann, 2013; Piechnicki, 2014) tornando mais acessível a visualização dos problemas com maior impacto na produção. Desta forma, é possível concentrar as forças na resolução dos problemas eliminando as causas.

Pela capacidade de adaptação deste teorema à gestão da produção, é utilizado com diferentes desígnios e em variadas áreas por forma a definir prioridades de ação. É um processo que permite analisar o impacto dos valores relativos nos valores totais identificando-os em classes: 80% do valor total pertencem à classe A, 15% à classe B e os restantes 5% à classe C (Courtois et al., 1997).

3.4 Os 5 porquês

A necessidade de resolução dos problemas é imperial nos dias que correm para que as empresas e organizações mantenham a sua competitividade nos respetivos mercados.

No entanto, nem sempre é possível chegar à verdadeira causa raiz do problema, e apesar dos esforços para a eliminar a fonte dos problemas, não se consegue evitar o seu ressurgimento.

A ferramenta dos 5 porquês surge precisamente para se determinar qual a causa do problema e não somente a fonte dos problemas, sem exigência de técnicas especializadas ou de análises estatísticas.

A prática dos 5 porquês, foi desenvolvida no Japão, por um dos criadores do Sistema de Produção da Toyota, durante a década de 70, com o objetivo de melhorar a eficiência e a qualidade dos produtos. A técnica consiste na pergunta porquê, por 5 vezes consecutivas, a um problema que tenha sido levantado. Por vezes, será preciso realizar a pergunta mais que 5 vezes e outras situações que não será preciso perguntar tantas vezes. O importante é identificar as relações entre os sintomas e possíveis causas raízes para traçar um plano de ação eficaz.

A simplicidade e flexibilidade desta estratégia de resolução de problemas permite que seja empregue em conjunto com outras técnicas usadas, tendo um custo de implementação baixo e sem necessidade de programas estatísticos no processo.

4- Toleranciamento GD&T

A concorrência empresarial é cada vez mais competitiva e exigente no cumprimento de normas e de regulamentação de qualidade.

As empresas tendem a acompanhar os mais avançados sistemas tecnológicos, que lhes permitem criar valor nos seus produtos (através de um gasto menor de recursos) e garantir maiores funcionalidades e durabilidade.

É com esta incessante procura na melhoria contínua de processos e a pensar na conseqüente redução de custos, que o Dimensionamento Geométrico e Toleranciamento (GD&T – *Geometric Dimensioning and Tolerancing*) é introduzido na área da Engenharia. Produtos com dimensões e tolerâncias mal definidas não só perdem em performance como apresentam custos de desenvolvimento e produção mais altos (Wandeck, 2008).

O primeiro método de definição de tolerâncias, surgiu com a Revolução Industrial, num trabalho desenvolvido pelo cientista e filósofo René Descartes.

Esse toleranciamento, cartesiano (CD&T – *Classical Dimensioning and Tolerancing*), foi utilizado durante largos anos tanto na produção como na validação de conformidades dos produtos. No entanto, mesmo com esta metodologia adotada, várias eram as peças reprovadas aquando o posicionamento na montagem. Isto era algo que importunava o engenheiro Stanley Parker que acabou por desenvolver uma experiência com as peças reprovadas, concluindo que não eram as peças que continham o erro, mas sim o método com o qual as inspecionavam que estava errado (Wandeck, 2010).

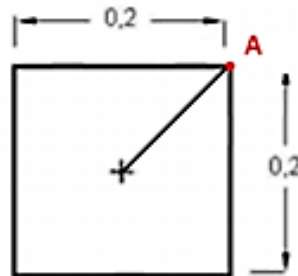


Figura 4. 1 - Zona de tolerância cartesiana

Ao utilizar-se o sistema cartesiano tradicional no controlo geométrico, era inevitável a reprovação das peças boas (Strafacci, 2010). Tratava-se de uma linguagem que apenas servia para a leitura das dimensões nominais, sendo que estas dimensões eram incapazes de definir sistemas de coordenadas.

Surge assim o GD&T, norma de dimensionamento e toleranciamento (ASME Y14.5M-1994) por forma a colmatar as falhas existentes na metodologia cartesiana que não considerava a inclusão da peça no seu devido conjunto.

Do seu estudo, Stanley percebe que a sua zona de tolerância quadrada não representa os requisitos funcionais de montagem e propõe a substituição para um campo de tolerâncias circular. Com uma simples alteração no modelo, a área de aprovação de peças tem um aumento de 57%, fator que tem impacto direto nos custos de fabricação do produto.

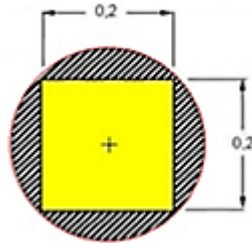


Figura 4. 2 - Zona de tolerância circular

Esta nova forma de toleranciamento, com esta ampliação da faixa de tolerâncias das peças, torna-se numa ferramenta com ampla aplicação tanto no sector automóvel como no sector aeronáutico. Trata-se de uma metodologia que gera uma maior precisão e clareza, regrada de símbolos e convenções internacionais. Pode descrever vários aspetos tais como a forma, o tamanho, a orientação e a localização de peças e conjuntos (Krulikowski, 1997).

Tabela 4. 1 - Símbolos para tolerâncias GD&T (adaptado de ASME,1994)

TOLERANCIAS	CARACTERISTICAS	SIMBOLO
Forma	Retitude	—
	Planicidade	□
	Circularidade	○
	Cilindricidade	∅
	Perfil de linha	∩
	Perfil de superfície	∩
Orientação	Paralelismo	//
	Perpendicularidade	⊥
	Inclinação	∠
Localização	Posição	⊕
	Concentricidade	◎
	Simetria	≡
Deformação	Circular	↗
	Total	↗↘

O GD&T ao ser utilizado como uma metodologia de projeto, promove aos engenheiros de produto e projetistas uma uniformidade nas especificações e interpretações de projeto, eliminando conjeturas e suposições erradas.

Tendo sempre em consideração o requisito de projeto sem nunca prejudicar a funcionalidade e qualidade do elemento, o GD&T, através do dimensionamento funcional, permite tolerâncias mais abertas em todos os estágios do processo de manufatura com garantia de montagem (Rodolfo, 2001).

É bastante utilizado em situações em que as características são críticas para a funcionalidade e montagem das peças e quando se deseja aumentar a produtividade. A quantidade de notas para descrever requisitos de forma e geometria complexa de um componente também se torna menor quando comparado com a utilização de outros métodos (Cogorno, 2006).

5-Processo de Cravação

Os estudos existentes relacionados com processos de cravação são bastantes recentes. Apenas tiveram início, após a queda da aeronave Martin 202, em 1948, por ter sido identificado o erro como uma falha estrutural na longarina da asa. Desta feita, nas duas décadas seguintes passou a haver uma maior atenção em relação à vida em fadiga das juntas rebitadas. No entanto, a qualidade dos estudos era ainda pouca, e foi necessária uma catástrofe aérea com proporções maiores, como foi o caso do impressionante acidente com o Boeing B737-200, para que fosse dada real atenção a esta área de estudo. A causa deste acidente foi uma descompressão explosiva, que arremessou a hospedeira de bordo para fora do avião, apesar da impressionante aterragem conseguida, como demonstra a figura 5.1.



Figura 5. 1 - Evacuação da aeronava depois da bem sucedida aterragem

Continuava a haver uma falha muito grande de conhecimento na área dos processos de cravação de rebites, que pudesse trazer mais firmeza ao mundo da aviação e apenas, em 1994, foi desenvolvido, por Fitzgerald, uma técnica por meio de difração por raios X, que pudesse avaliar as tensões residuais à volta dos rebites e chapas (Fitzgerald, 1994).

Por questões de segurança, estudos que relacionam o processo de rebitagem com a vida em fadiga das juntas rebitadas, passaram a ter uma grande importância na aeronáutica. Assim, em 2006, havia seis áreas sobre as quais estes estudos tinham mais enfoque: tensões residuais e expansão do material das chapas; geração e propagação de trincas; distribuição de cargas em juntas sobrepostas; análise de vida em fadiga; impacto de diferentes fatores na vida em fadiga da junta rebitada; estudos de fadiga por atrito (Faishal 2006).

Um dos principais mentores destes estudos foi Muller, que considerou a força de conformação aplicada como o principal fator para determinar a vida em fadiga de juntas rebitadas e com isso exigir o controlo de qualidade da produção. Muller foi o primeiro autor a realizar uma simulação numérica por elementos finitos de modo a analisar o estado de tensões residuais provenientes do processo de cravação (Muller 1995).

Depois de Muller, vários foram os que seguiram os seus estudos. Harish, Szolwinski e Farris, em 1997, avaliaram o efeito sobre a expansão dos furos do processo de cravação, incluindo a inexistência de relação da expansão radial com a expansão circunferencial, sendo que o valor máximo de tensão é localizado logo a seguir à contra cabeça conformada.

Assim, com os estudos sobre estes temas a começarem a desenvolver, outros cientistas conseguiram testar outras teorias, adicionando novas variáveis com relação aos estudos anteriores, como por exemplo, o diâmetro e altura final da contra cabeça, se a cabeça é escareada ou protuberante, as propriedades dos próprios materiais a serem cravados, entre outros. Estes parâmetros podiam ser relacionados com a força de conformação ou até mesmo entre eles e através da simulação por elementos finitos passaram a ser considerados na prevenção da vida útil em fadiga dos materiais.

Uma das conclusões mais importantes neste estudo foi a quantificação na variação da expansão do diâmetro do furo, que variava entre os 0,5% e os 8%, quando relacionada com a força de conformação aplicada (Schijve, 1998).

No entanto, todos estes estudos foram sempre relacionados com a fadiga dos materiais, depois destes serem sujeitos à união por rebites. Mas, sempre que se tenta validar as tolerâncias em montagens estruturais rebitadas, a discrepância dos valores reais obtidos com os valores nominais é tão comum, que levou Negroni, em 2006, a desenvolver o primeiro estudo que se focava nas deformações geométricas que as peças sofriam, conseqüentes do processo de cravação.

Numa experiência realizada por Negroni, procurou-se estudar o comportamento dos materiais quando submetidos ao processo de cravação. A prova consistiu na cravação de 12 rebites, do tipo briles e de cabeça escareada em 80 corpos de prova, tendo sido medido o seu comprimento antes e depois do processo. Os resultados vieram comprovar a expansão dos corpos de provas produzida pela acumulação das tensões residuais ao longo da linha de cravação (Negroni, 2006).

Outros problemas podem surgir, por efeito da acumulação das tensões residuais, provenientes do processo de cravação, como o desalinhamento dos furos, a alteração dos raios de curvatura ou até mesmo torções no próprio material.

Estas deformações são bastantes visíveis, por exemplo, nos painéis de fuselagem dos aviões. As tensões residuais resultantes da enorme quantidade de rebites que é utilizada nas chapas de revestimentos, provocam um abaulamento do material após a cravação, como ilustrado na figura 5.2.

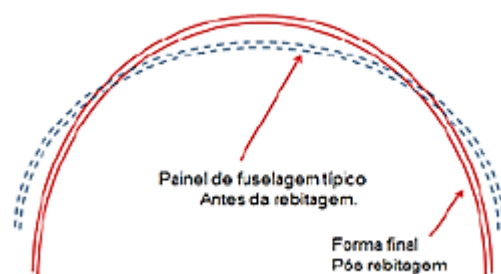


Figura 5. 2 - Deformação dos painéis após cravação

Este tipo de situação pode pôr em causa a aerodinâmica dos materiais e isso é um fator extremamente indesejável na indústria aeronáutica (Zhengping, 2016).

Uma das formas de diminuir este comportamento no material tem a ver com a sequência de cravação utilizada. Pode ser feita do meio para as extremidades, de uma extremidade para a outra, de forma aleatória. Porém, por ser ainda uma área de estudo muito pouco explorada, são poucas as conclusões retiradas do tipo de sequência que menos deformações podem incutir no produto.

Num dos estudos mais recentes, Zhengping (2016), realizou diferentes sequências de cravação, para 2 tipos de corpos de prova. Uma das experiências baseou-se num corpo de prova, que requeria a cravação de 10 rebites em linha. Enquanto a outra experiência, baseou-se num corpo de prova com duas linhas de cravação, cada uma com 5 rebites.

Os corpos de prova são ilustrados de seguida nas figuras 5.3 e 5.4.

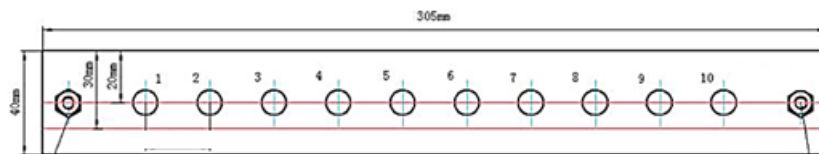


Figura 5. 3 - Corpo de prova com os 10 rebites em linha

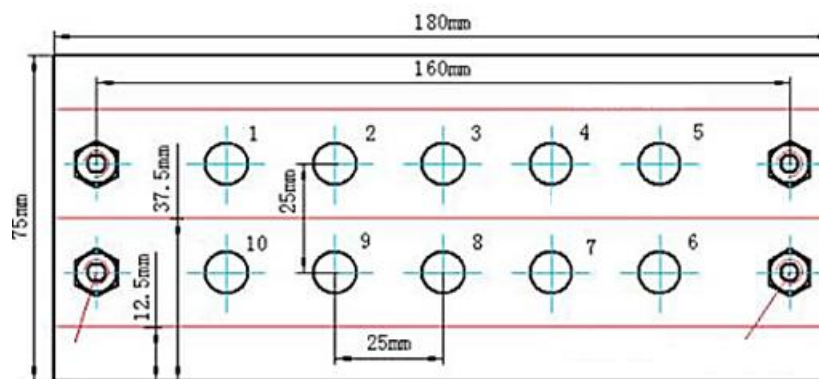


Figura 5. 4 - Corpo de prova com 2 linhas, de 5 rebites cada

Foram escolhidas 4 sequências para o primeiro corpo de prova:

- 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10
- 1-10-2-9-3-8-4-7-5-6
- 5-6-4-7-3-8-2-9-1-10
- 1-4-7-10-2-3-5-6-8-9

Para o segundo corpo de prova foram definidas 5 sequências:

- 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10
- 3-8-7-4-2-9-6-5-1-10
- 1-5-2-4-3-10-6-9-7-8
- 1-3-5-2-4-10-8-6-9-7
- 10-6-5-1-4-2-9-7-8-3

Os resultados para o corpo de prova com os 10 rebites em linha estão representados na figura 5.5:

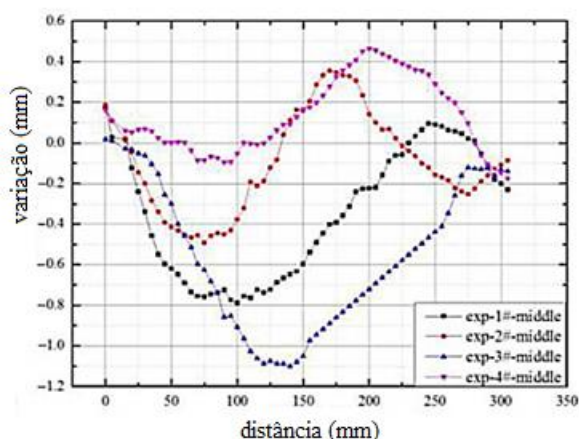


Figura 5. 5 - Deformações resultantes no corpo de prova com 10 rebites

Os resultados para o corpo de prova dividida em 2 linhas de 5 rebites cada estão representados na figura 5.6:

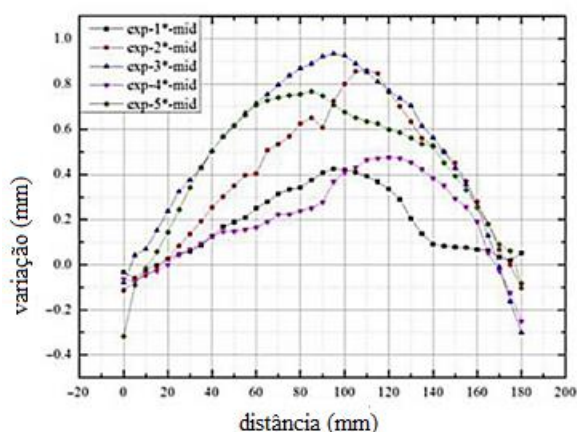


Figura 5. 6 - Deformações resultantes no corpo de prova de 2 linhas de rebite

Apesar do estudo ter sido realizado numa ótica de comparação e validação com resultados provenientes de uma simulação computacional, com o objetivo de prever o comportamento dos materiais quando sujeitos a este tipo de processos, é possível concluir que existem sequências que favorecem mais a deformação que outras. No entanto, existem várias variáveis que podem ser assumidas para cada caso específico e não havendo conhecimento suficiente sobre como prever ou evitar estas deformações, tem de se recorrer à técnica de tentativa-erro.

6-Caso de Estudo

No capítulo sexto, será apresentado o caso de estudo, começando por uma introdução à empresa-mãe, que posteriormente se instalou em Portugal, onde foi desenvolvido o estudo, sendo de seguida pormenorizado o componente sobre o qual recaiu a dissertação.

6.1 Grupo Embraer

Inaugurada em 1969 e sediada em São José dos Campos, São Paulo, pelas suas características topográficas e climáticas, a Embraer S.A. teve o Bandeirante como primeiro avião turboélice bimotor destinado ao uso civil e militar, com capacidade para transportar 15 a 21 passageiros. As operações da empresa começaram no início dos anos 70 e não parou mais de voar, construindo uma história de ousadias, desafios e superação.

É a combinação entre as paixões das pessoas pelo que fazem na Embraer e a mais alta tecnologia, que a vontade da empresa em continuar a rasgar os céus é alimentada, apostando cada vez mais no design e na engenharia imaginativa como forma de sustentar a sua posição nos mundos da aviação comercial, executiva, defesa e segurança.

Hoje em dia a Embraer S.A. é o terceiro maior fabricante de jatos comerciais do mundo. Uma aeronave da Embraer descola para abraçar os céus em algum lugar do mundo a cada 10 segundos e transportam mais de 145 milhões de passageiros por ano. Com unidades industriais, escritórios e centros de distribuição de peças e serviços em África, América, Ásia e Europa é líder absoluto no segmento de até 130 assentos, empregando 18.000 mil pessoas e com mais de 8.000 aeronaves entregues. Na figura 6.1 é possível ver a os países onde a Embraer está presente.

EMBRAER NO MUNDO



Figura 6. 1 - Embraer no mundo

Numa área tão competitiva como a da aeronáutica, que se destaca por questões de segurança e excelência do conhecimento, a confiança nas competências dos que se envolvem e se comprometem com os ideais da empresa é o que mais se valoriza.

Desta forma os valores nos quais a Embraer S.A. se baseia são os de ética e integridade em tudo o que se faz, ousadia e inovação na organização de forma a acompanhar o desenvolvimento tecnológico e a atuação global para servir os clientes na conquista da lealdade dos mesmos.

É com vista em construir novas perspectivas no mundo da aviação que a empresa se foca na inovação e busca de conhecimento de experimentos, projetos e ideias nas várias parcerias que desenvolve. Desta forma, permitiu que nos últimos 5 anos quase metade das melhorias significativas fossem implementadas nas suas instalações, com ganhos no facturamento que representam um aumento de 67% em valores recebidos, gerando mais de 1200 novos empregos.

Com esta perspectiva de acompanhar a evolução tecnológica e de modo a influenciar significativamente a indústria aeroespacial no futuro, a *Embraer Business Innovation Center* em parceria com a Uber, encontram-se a desenvolver um novo projeto com a finalidade de alterar a mobilidade urbana para deslocações mais curtas através da implementação de pequenos veículos verticais elétricos de decolagem e aterragem, denominados de VTOLs, ilustrado na figura 6.2



Figura 6. 2 - Projeto VTOLs

A Embraer S.A. tem também um papel muito importante no que diz respeito à componente militar do Brasil. Em 2011, foi criada a Embraer Defesa e Segurança, EDS, para que a excelência do conhecimento da empresa fosse também ela empregue em projetos, fabricação e modernização de aviões militares, tendo sido fornecido e modernizado mais de 70% da frota de aeronaves da Força Aérea Brasileira.

6.2 Embraer Portugal S.A.

O projeto de investimento em Évora, consiste no desenvolvimento estrutural da asa e dos estabilizadores horizontais e verticais, de determinadas aeronaves do grupo Embraer S.A.,

como o Phenom 100, Legacy 450, 500 e 650, enquanto que na área de defesa e segurança, o compromisso centra-se no KC-390. Assim, existem dois departamentos distintos, um de Metálicos e outro de Compósitos, geridos de forma independente e que contribuem para o crescimento da Embraer Portugal S.A., que conta com forte apoio do Estado Português através do Programa Portugal 2020, financiado pela Comissão Europeia.

O campus da Embraer Portugal S.A., situa-se no Parque Industrial de Aeronáutica, em Évora, cada vez mais desenvolvido, e para além dos departamentos da Metálicas e Compósitos pode contar-se também com o Centro de Engenharia e Tecnologia, visível na figura 6.3. Este centro serve para desenvolvimento do estudo dimensional e estrutural das asas e para o desenvolvimento de peças e estruturas em materiais compósitos. Estão associados às tecnologias produtivas, permitindo uma maior proximidade entre a operação industrial e a alta competência do núcleo de engenharia.



Figura 6. 3 - Embraer Portugal S.A.

A Embraer Compósitos S.A. é dotada de conhecimento, ferramentas e processos ímpares. Este departamento foi desenvolvido com o intuito de dar continuidade a uma estratégia de diversificação, passando a fornecer um novo produto reconhecido como solução inovadora no mercado vencendo desta forma as contradições sobre a fragilidade dos seus comportamentos mecânicos.

Na Embraer Metálicas S.A. as estruturas das asas são fabricadas através de processos de fabrico em série de aeroestruturas críticas em alumínio. Desde a chegada da matéria-prima, à necessidade de se lhe dar os contornos pretendidos (Primárias), passando por tratamentos de superfícies de modo a que os materiais fiquem com as conformidades mecânicas exigidas, até chegar à estrutura final, pintada e acabada, para ser enviada para a fábrica-mãe e mais tarde realizada a montagem, faz deste procedimento algo muito complexo.

Na figura 6.4 é possível visualizar a planta do hangar da Metálicas S.A.

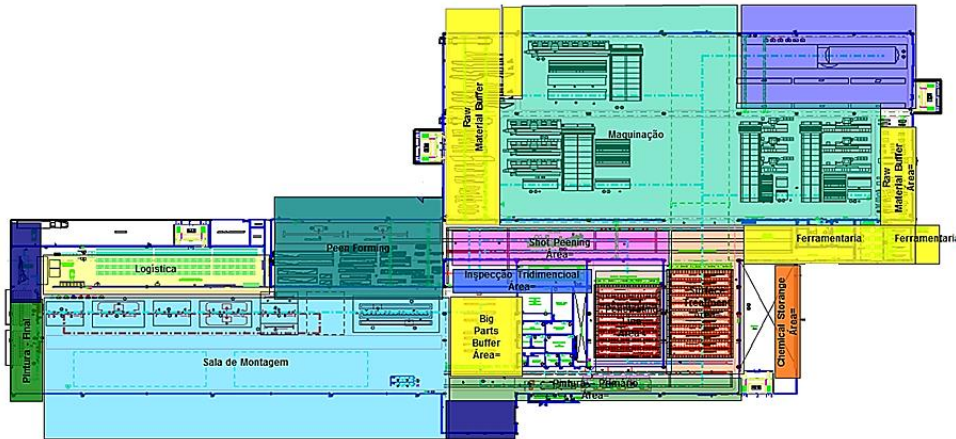


Figura 6. 4 - Planta do hangar de Metálicas S.A.

Todo o desenvolvimento referente a este sistema é de uma riqueza de conhecimento e ciência equivalente ao tempo necessário para que determinados processos tenham a sua própria cura. Para isso é preciso uma equipa muito bem estruturada de operadores, engenheiros, chefes, monitores e supervisores que esteja em harmonia de modo a dar vazão às cadências que são impostas.

Para que a asa do avião desenvolvida chegue ao final do seu processo de fabrico e esteja normalizada, são exigidas várias horas de dedicação aos envolvidos no projeto, mas especialmente aos operadores. É graças a eles que as asas são entregues e validadas pelo fabricante e a quem são entregues a responsabilidade e confiança para que se faça no tempo requerido. Esta confiança existe graças às competências desenvolvidas através dos vários programas de formação que a Embraer proporciona aos seus profissionais, assim, como: o Programa de Estágio Embraer; o Programa Trainee Embraer; o Programa de Especialização em Engenharia – PEE; e o Programa Projetista Embraer – PPE, como uma especialização mais técnica.

Numa abordagem mais social apresentam o Programa de Aprendizagem para Pessoas com Deficiência e o Programa Jovem Aprendiz, que permite à Embraer Portugal S.A. promover o desenvolvimento e aprimoramento dos seus colaboradores, gerando um crescimento e perpetuidade à empresa que permite uma aprendizagem contínua como forma de fortalecer as competências organizacionais.

6.3 P3E – Programa de excelência empresarial Embraer

Na perspetiva da continuidade do crescimento e aprimoramento do modelo de excelência empresarial, a Embraer Portugal S.A. efetua o seu planeamento e realização de ações macro estratégica e de macro projetos segundo um Plano Estratégico de Ações. Plano esse que permite a diversificação do negócio e expansão global numa ótica a longo prazo.

O Plano Ação visa as metas operacionais, económico-financeiras e de sustentabilidade a curto prazo na busca contínua pela melhoria de processos, de qualidade e de produtividade, aumentando de forma sistémica a competitividade.

A Embraer S.A. está presente em 10 cidades do Brasil e em outros nove diferentes países. Aliado ao facto de atuar nas áreas de Aviação Comercial, Executiva e de Defesa e Segurança, a empresa aeronáutica sentiu a necessidade de realizar um forte investimento na busca da excelência da gestão, lançando em 2007, O Programa de Excelência Empresarial Embraer (P3E).

O P3E tem por base 4 pilares: a cultura organizacional, o crescimento e desenvolvimento das pessoas assim como a capacidade de liderança e a eficiência empresarial, como ilustra a figura 6.5.



Figura 6. 5 - Valores do programa P3E

Este programa adotado pela Embraer, permite realizar uma divisão da organização em células, buscando a organização das diferentes áreas de acordo com o fluxo de valor independentemente da hierarquia. As células trabalham num sistema cliente-fornecedor, sendo que cada bem ou serviço processado e produzido compõe parte do resultado de todo o negócio.

As ferramentas utilizadas nesta gestão baseiam-se na aplicação da filosofia *Lean*, modeladas na geração de valor que proporcione ganhos em custos, produtividade e qualidade, através da melhoria de processos e na redução de desperdícios. Conceitos como *kaizen* – que considera princípios como: desenvolvimento de pessoas, gestão visual, processos e resultados, qualidade em primeiro, entre outros, e *Poke Yoke* – desenvolvimento de métodos, ferramentas e equipamentos que previnam erros, passam a ser instrumentos úteis e capazes de contribuir para o aumento da competitividade de uma organização.

Num ano, as práticas da Embraer alcançaram o nível 7 na Fundação Nacional da Qualidade – FNQ, simbolizando a exemplar evolução da qualidade de gestão da sua organização em todas as funções de negócio.

6.4 Caracterização do processo de montagem da asa

Todos os dias, centenas de aviões sobrevoam o céu, permitindo o transporte de milhões de pessoas para os mais variados locais do mundo. Segundo a *Flight Aware*, em 2016, houve uma média de 9.728 aviões, que transportaram 1.270.406 pessoas a qualquer momento.

Também no ano de 2016, a ASN – *Aviation Safety Network*, um *site* especializado em catástrofes aeronáuticas, divulgou o número de mortes (44), que envolveram aviões fretados para transporte de 14 passageiros ou mais. Isto faz dos aviões um dos transportes mais seguros do mundo, senão mesmo o mais seguro.

O avião é constituído por milhares de peças, mas para podermos ter uma melhor ideia onde é que essas peças se localizam podemos dividi-lo em 5 componentes: a fuselagem, a empennagem, a asa, o motor e o trem de aterragem. A figura 6.6 ilustra a divisão referida.

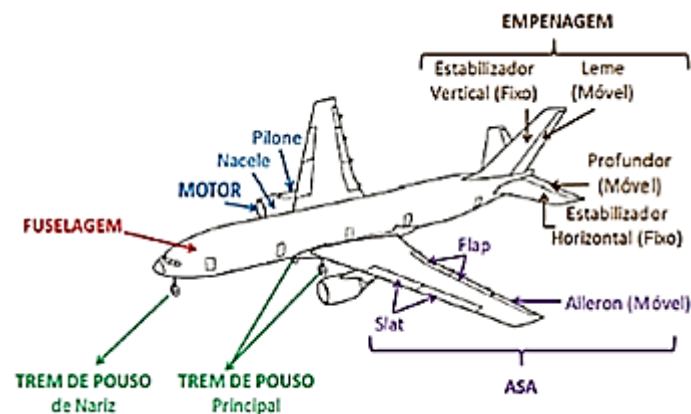


Figura 6. 6 - Anatomia básica de uma aeronave

A asa, componente desenvolvida na Embraer Metálicas, pode também ela ser dividida em duas partes: a parte estrutural e as superfícies de controlo de voo.

As superfícies de controlo da asa de um avião são os *flaps*, os *aileron*s, os *spoilers*, os *slats* e os *winglets*. São superfícies que dizem respeito aos controlos que o piloto pode acionar durante o voo e que permitem que o avião mude de direção, reduza ou aumente velocidade, prepare-se para a descolagem e aterragem. Na figura 6.7, é apresentada uma imagem, adaptada da NASA, que indica a função de cada um destas superfícies de controlo.

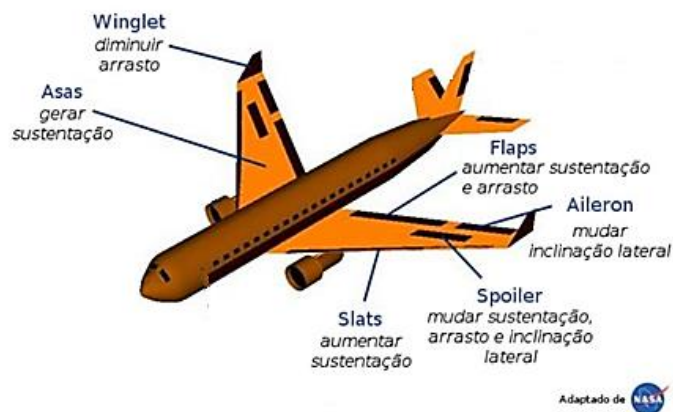


Figura 6. 7 - Superfícies de controlo e suas funções (adaptado da NASA)

A parte estrutural, como a própria palavra indica, faz parte da estrutura que, para além de suportar as superfícies de controlo, permite ao avião voar. Isto porque, é a parte da asa que tem preocupações aerodinâmicas na sua conceção e responsável pela sustentação do avião.

Na figura 6.8, introduz-se os elementos essenciais da estrutura da asa de um avião.

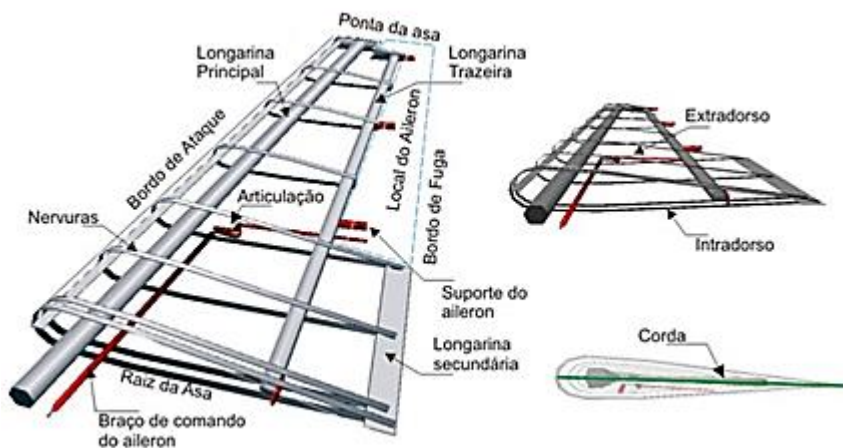


Figura 6. 8 - Nomenclatura da Asa

As longarinas ou *spars*, são os principais membros estruturais da asa. São peças com várias formas construtivas que alcançam toda a extensão da asa e servem para suportar cargas distribuídas e o peso da aeronave. Na parte da frente da asa, designado bordo de ataque, encontra-se a *spar I* (longarina principal), e no bordo de fuga, a *spar II* (longarina traseira). Ao longo da asa e paralelas às longarinas, existem também as *stringers* que completam o trabalho das longarinas no que diz respeito à resistência dos esforços de tração.

As nervuras, ou *ribs*, são peças estruturais que para além de darem a forma aerodinâmica desejada são responsáveis por suportar os esforços de compressão.

O revestimento da asa é fixo tanto às longarinas como às nervuras através do processo de cravação, que é executado já depois da estrutura apresentada na figura 6.8 estar completa.

O processo de montagem de uma asa é bastante complexo e moroso. A grande quantidade de peças e formas que têm de ser conjugadas exige concentração e uma importante sensibilidade por parte dos operadores, para que o produto final chegue à última estação do processo e encontre-se em conformidade, pronta a ser entregue ao cliente, sem necessidade de retrabalhos. Acima de tudo um produto com qualidade.

Seguindo o esquema apresentado no Anexo A, o processo de montagem da asa passa por várias etapas. A primeira estação é a do Bordo de Fuga.

Esta é uma das estações mais importantes de todo o processo de montagem da asa. Ao ser a primeira, a assertividade da montagem e do posicionamento de todos os componentes que dela fazem parte, tem de ser exemplar. Se os componentes saírem desta estação no local errado, todo o processo para a frente estará em risco.

Na estação do Bordo de Fuga, prepara-se a longarina traseira, *spar II*. Tudo o que aqui for desenvolvido faz parte do Conjunto. É onde se faz a montagem e posicionamento das ferragens das *hinges* e dos ailerons, dos spoilers, das *tracks*, onde são instaladas as *Torque Box*, entre outras operações semelhantes. Por vezes, existem componentes cuja montagem pode ser executada de forma independente do seu posicionamento na *spar II*. Nesses casos, a sua montagem pode ser realizada à parte, como um Subconjunto, e mais tarde instalada no Conjunto.

A figura 6.9 mostra o resultado da montagem ao fim da estação do Bordo de Fuga.

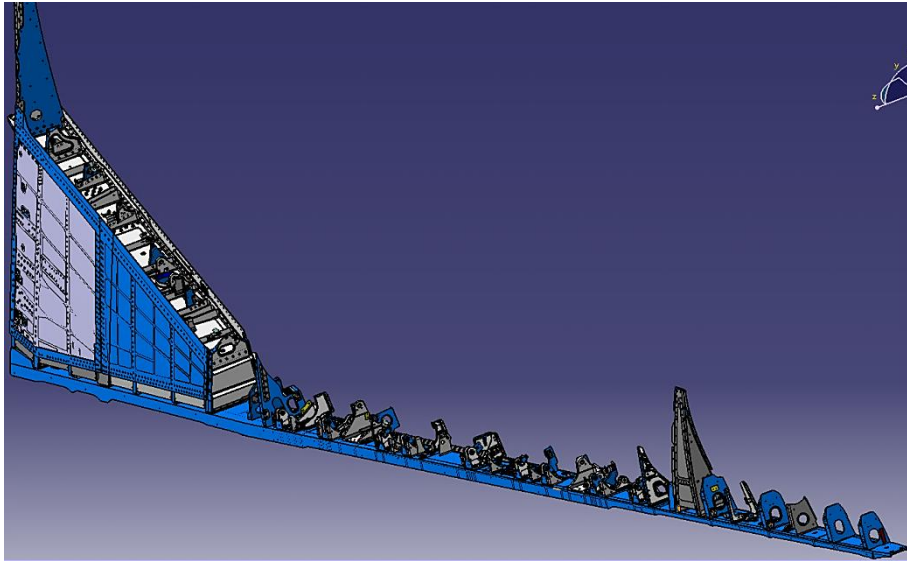


Figura 6. 9 - Resultado da montagem no final da estação do Bordo de Fuga

Em paralelo a este processo, existe a estação de Costura, que prepara o revestimento da asa. Nesta estação é muito utilizado o processo de cravação. Tem como finalidade realizar a união entre as placas finas que no conjunto formam o revestimento extradorso (a parte de cima da asa) e o revestimento intradorso (parte debaixo da asa), como ilustram as figuras 6.10 e 6.11.

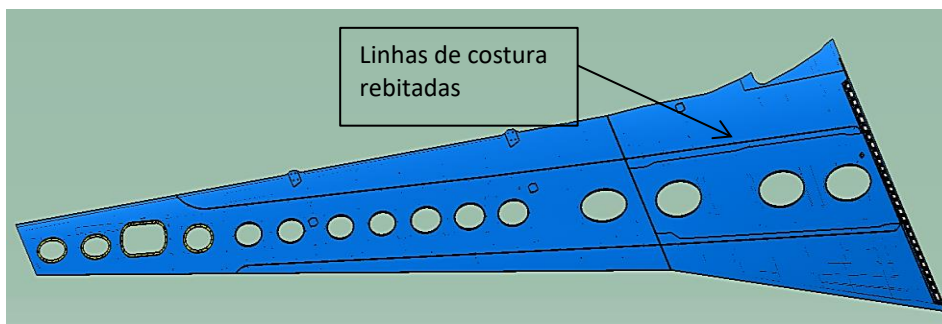


Figura 6. 10 - Revestimento intradorso após estação de Costura

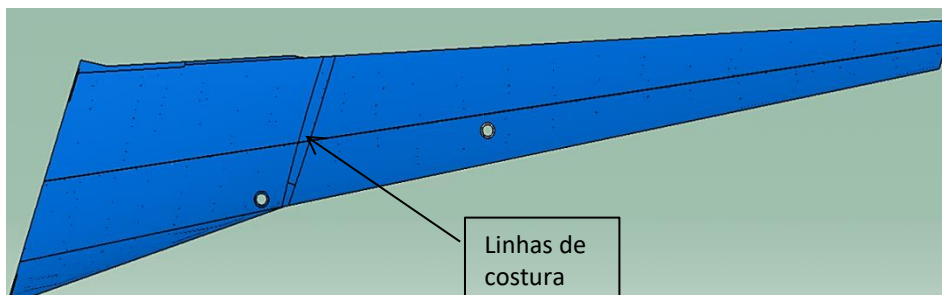


Figura 6. 11 - Revestimento extradorso após estação de Costura

De seguida, o produto passa para a Estação 1, onde a *spar I*, *spar II* e as *ribs* passam a fazer parte de um só conjunto, visível na figura 6.12. Este processo é realizado num gabarito que permite fixar as componentes que já se encontram na *spar II*. São colocadas algumas emendas de reforço na *spar I*. No final do processo de fixação por rebites, das *ribs* às duas *spars*, posicionam-se na estrutura, os revestimentos intradorso e extradorso, e avança-se o produto para a estação seguinte. Este posicionamento é executado através de “glecos” – ferramentas que permitem o posicionamento de forma temporária. Entre as estações 1 e 5 a asa não muda de gabarito e isto permite que o produto não sofra mais deformações, para além das que o próprio processo lhe imprime.

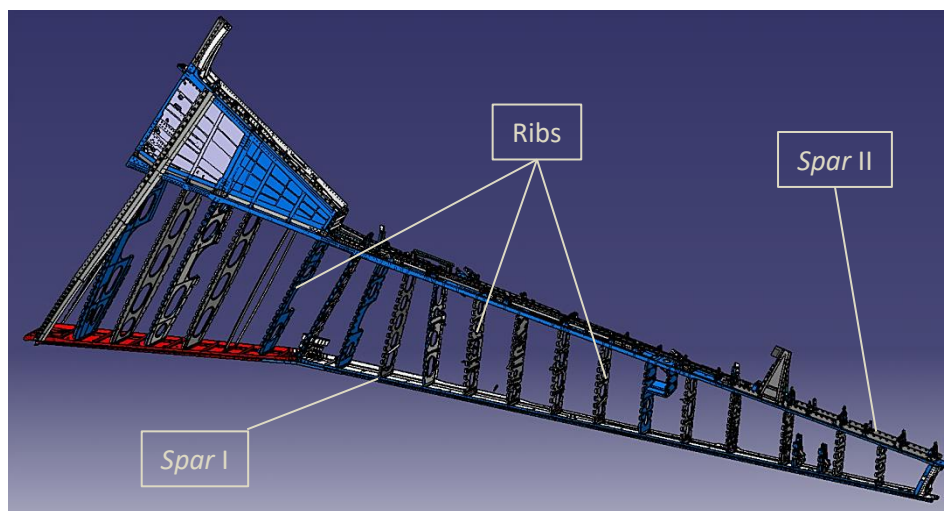


Figura 6. 12 - Resultado da montagem da asa no final da Estação 1

Nas estações 2 e 4 (não existindo a estação 3) os revestimentos intradorso e extradorso são furados através de robots. Na primeira estação faz-se a furação do intradorso e na estação seguinte o extradorso.

A penúltima estação é a 5, onde o produto é submetido ao processo de cravação, colocação de emendas e ajustes finais, como ilustra a figura 6.13. É aqui, que se realizará a fixação final dos revestimentos e onde a asa é sujeita a maiores deformações e torções provenientes do processo. São finalizados alguns posicionamentos de determinadas componentes, situadas as *tracks* para os *flaps*, colocadas emendas de suporte para o revestimento da estrutura, entre outras operações.

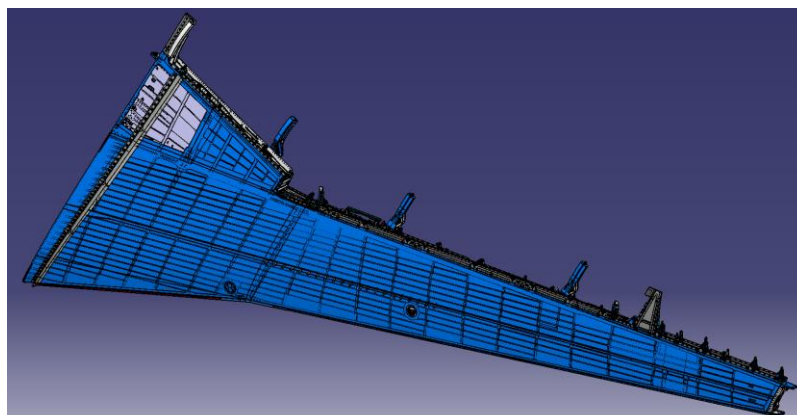


Figura 6. 13 - Resultado da montagem da asa no final da Estação 5

Por fim, a última estação do desenvolvimento do produto, a Complementação, ilustrada na figura 6.14.

Qualquer asa quando chega ao final do seu ciclo de produção tem de ser validada pelo fabricante. Esta validação serve para garantir que no final, a asa encontra-se em conformidade com os requisitos pedidos pelo cliente, neste caso, a empresa-mãe, Embraer S.A., no Brasil, onde serão posteriormente realizadas as montagens finais (colocação das superfícies de comando mais a ligação da asa à fuselagem do avião).

De modo a garantir essa montagem, a avaliação é feita através da mais alta tecnologia de medição tridimensional - metrologia. Com o auxílio de *scanners* a laser, é possível retirar valores de posicionamento, perfis de superfície, concentricidade de eixos e comparar os valores nominais do projeto com os obtidos no final da montagem da asa, com perícia que vai até ao micrómetro. Na figura 6.15 mostra-se alguns aparelhos de medição utilizados.

Nas situações em que os valores não se encontrem dentro das tolerâncias, será necessário realizar retrabalho.

A existência de operações de retrabalho é um mau indício para a produção. Significa que os recursos como tempo, mão-de-obra, máquinas que foram despendidas para executar as operações, não foram os mais eficientes possíveis. E isso traz custos adicionais que não estão previstos.

Por outro lado, e olhando para os retrabalhos numa perspectiva otimista, é o melhor caminho para saber que existem processos que podem e devem ser ainda melhorados.

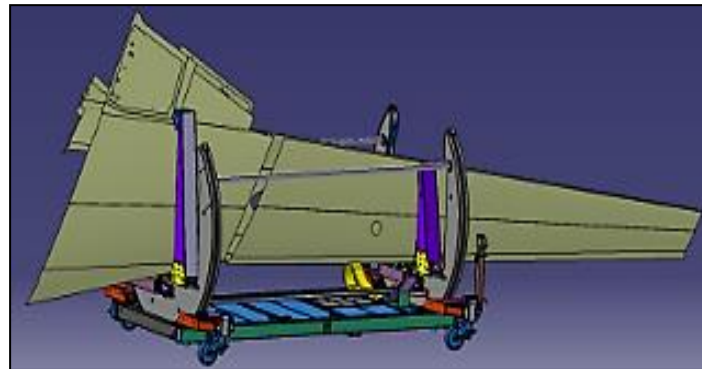


Figura 6. 14 - Gabarito da Complementação



Figura 6. 15 - Aparelhos de medição utilizados na Complementação

6.5 Caixa de Torção ou “Igrejinha”

Como componente estrutural que é, a caixa de torção de uma aeronave tem a função de suportar a carga principal recebida pela asa. Porém os ganhos a nível aerodinâmicos são também bastante representativos e os considerados nesta dissertação.

A Aerodinâmica é a parte da Física que estuda a força do ar sobre os corpos sólidos em movimento e é uma área muito associada ao mundo da aeronáutica, principalmente nos projetos associados à concepção da asa.

Quanto mais aerodinâmica for a asa, maior será a força de sustentação, e é precisamente esta a força que permite que o avião descole e mantenha-se a voar.

No entanto, um fenómeno que ocorre sempre que uma aeronave sobrevoa o céu é o aparecimento de vórtices. Os vórtices traduzem um escoamento (turbulento) em que as linhas de corrente apresentam um movimento espiral ao redor de um centro de rotação. Este fenómeno, no mundo da aviação é o fator contrário da força de sustentação, uma vez que irá criar resistência ao movimento do avião devido à força de arrasto, representada na figura 6.16.

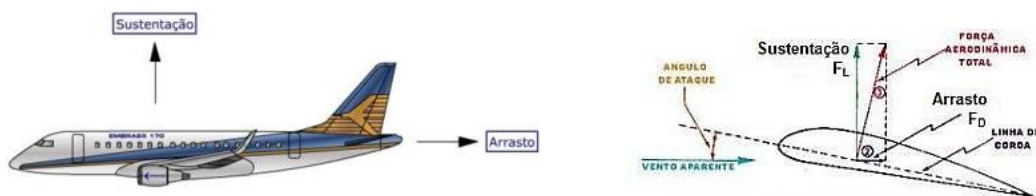


Figura 6.16 - Representação dos vetores da força de sustentação e arrasto

Assim, pretende-se que a aerodinâmica da asa de uma aeronave, traduza-se num alto rácio entre a força de sustentação e a força de arrasto. Isto permitirá que os esforços realizados pelos motores dos aviões sejam menores. Consequentemente, o consumo de combustível é menor e os custos associados ao voo acompanham também esta tendência decrescente.

É com o objetivo de reduzir a força de arrasto que se introduz a componente *Torque Box*, ou Caixa de Torção ou ainda, como é chamada na Embraer S.A., a “Igrejinha”, pela sua semelhança geométrica a uma igreja.

É uma peça estrutural da asa que é posicionada entre os *aileron*s e os *spoilers*, e que tende a minimizar a intensidade dos vórtices aquando do acionamento das superfícies de controlo que a delimitam, ilustrado na figura 6.17.

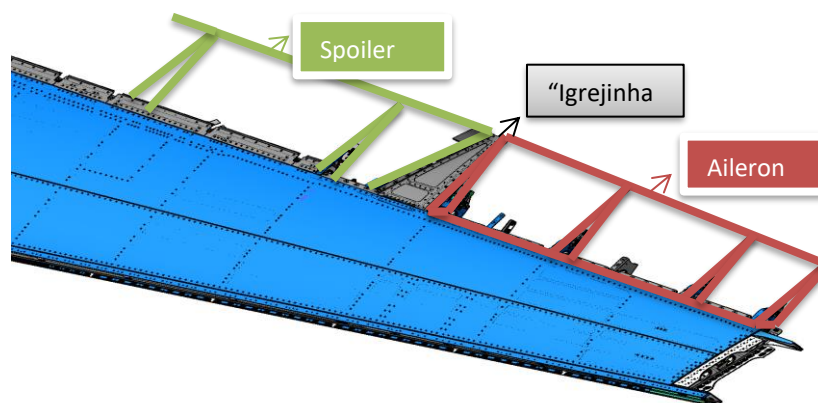


Figura 6.17 - Posição da "Igrejinha" na Asa

Após a montagem da asa de um avião todas as componentes e superfícies de controle que constituem a asa, encontram-se na posição “zero”. Esta posição zero é a que garante a aerodinâmica da asa quando sai de fábrica. No entanto, quando os *aileron*s e os *spoilers* são acionados, o desalinhamento entre eles intensifica a variação do escoamento.

Em ambos os casos (de alinhamento perfeito e de desalinhamento) o normal comportamento do escoamento sobre asa em pleno voo é o da passagem de escoamento laminar (na parte da frente) para escoamento turbulento (na parte de trás), ilustrado na figura 6.18. Porém o segundo caso, aviva o fenómeno de turbulência.

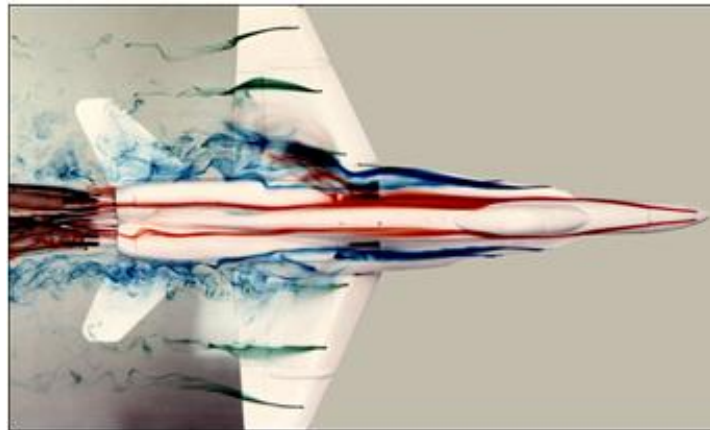


Figura 6. 18 - Passagem de escoamento laminar para escoamento turbulento

Desta forma, para que seja possível o comportamento eficaz da componente “Igrejinha”, torna-se essencial que a sua montagem e posicionamento na asa, seja estudado e analisado rigorosamente. Trata-se de um conjunto constituído por várias peças de pequenas e grandes dimensões, com necessidade de furação e cravação, como pode ser visto na figura 6.19.

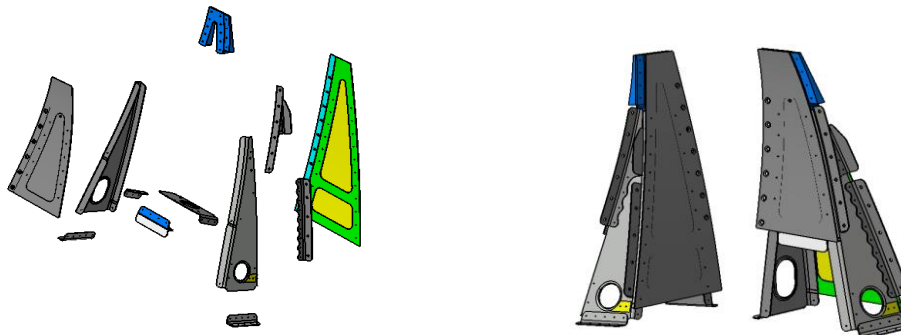


Figura 6. 19 - A "Igrejinha" em peças e como conjunto final

Por isto, foi desenvolvido um gabarito específico para a sua montagem como subconjunto.

No entanto, esta dedicação a apenas um componente da asa do avião, não é suficiente para garantir as suas funções. Isto porque, a “Igrejinha” depende do posicionamento de outras componentes, como se verá mais adiante.

O seu posicionamento na *spar II* é muito perto da ponta. O que, logo à partida, antevê maiores preocupações pela falta de robustez que a ponta apresenta quando comparada com a raiz da asa (extremidade oposta à ponta, que é unida à fuselagem do avião).

É durante o manuseio da *spar*, da estação do Bordo de Fuga para a Estação 1, que se torna visível a preocupação que se deve ter em conta pela excessiva flexibilidade que a mesma apresenta.

De seguida, apresentam-se os problemas encontrados no desenvolvimento deste estudo e consequentes oportunidades de melhoria.

6.6 Identificação de problemas e de oportunidades de melhoria

Como já referido, após conclusão de montagem, o produto final - Asa, é submetido a medição tridimensional, de precisão ao micrómetro, para validar as conformidades necessárias. São estas medições que indicarão se o produto se encontra dentro das normas e regulamentações especificadas.

É muito importante para toda a gestão de recursos da empresa, que a Asa não apresente inconformidades. Se tal acontecer, é sinal de que o todo o trabalho que veio para trás, despendido em horas de trabalho dos operadores e máquinas, foi bastante eficiente. No entanto, esta eficiência que se traduziria em quase 100%, não é facilmente alcançada.

A perfeição nos processos de montagem é muito difícil de precisar. Se se realizar uma montagem na vertical, mas a sua medição for feita na horizontal, logo à partida, a força da gravidade terá influência no posicionamento de certas componentes.

Esta situação, nos dias de hoje, pode ser considerada, através de um fator de correção que os programas informáticos de medição apresentam. Porém, nem todos os agentes causadores de inconformidades têm estes índices de correção, como veremos no caso de estudo da “Igrejinha”.

O estudo em causa deve-se à falta de conformidade que a componente “Igrejinha” apresenta, quando medida. Para melhor compreender o problema apresenta-se primeiro a que tipo de medição é esta componente sujeita.

A figura apresentada no Anexo B, apresenta a avaliação a que a superfície extradorso da asa do avião é submetida. Esta avaliação referencia que o valor máximo admitido para o plano HJ é de 1,20, como pode ser visto na figura 6.20.



Figura 6. 20 - Tolerância de superfície admitida

Como visto no capítulo 3, “Toleranciamento GD&T”, este valor de 1,20 é um valor absoluto, que se encontra num intervalo entre [-0,6; 0,6].

Mas esta avaliação não é sobre todo o produto da asa. Trata-se de uma avaliação local formada pelo plano HJ (de notar, que na Embraer S.A, os desenhos que apresentem tolerância GD&T, têm os *datums* primários, secundários e terciários, A, B e C, respetivamente, como os utilizados para definir a asa)

O plano HJ é definido como a figura 6.21 indica:

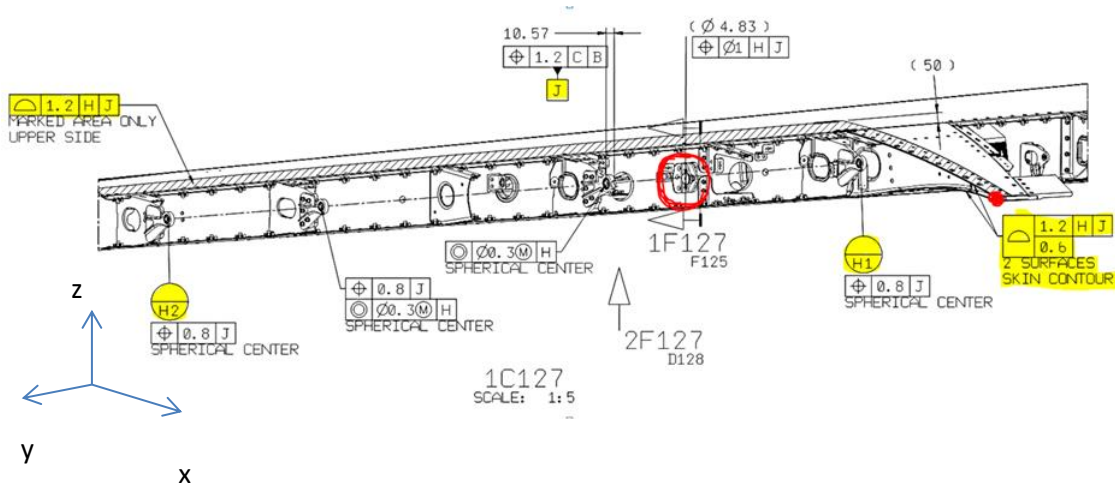


Figura 6. 21 - Definição do plano HJ, utilizado para medição local

Ou seja, temos a *hinge* 1 (mais próxima da “Igrejinha”) definida como H1, que juntamente com a *hinge* 4 (junto à ponta da asa), definida como H2, irão formar o *datum* H. Como o objetivo dos *datums* é travar os graus de liberdade existentes, este *datum*-linha impede a translação e rotação em *x*, e a translação e rotação em *z*. Por fim, temos a criação do *datum* J, na *hinge* 2 do aileron, que irá travar o movimento de translação em *y*, ficando apenas a rotação sobre o eixo dos *Y* por travar.

Desta forma temos a criação espacial do plano HJ, que tem rotação sobre o eixo *Y*, e que é um plano muito importante para a aerodinâmica da ponta da asa, porque é ele que vai ditar qual a posição relativa da “Igrejinha” com os *ailerons*. Os *ailerons*, que serão instalados *a posteriori*, têm a ponta da “Igrejinha” (assinalado com um ponto vermelho na imagem) como o ponto de referência para a sua instalação. Isto significa que a tolerância da superfície apresentada é mais apertada que a tolerância final do produto, exatamente para garantir o posicionamento, sem *step*, entre a “Igrejinha” (parte estrutural da asa) e os comandos de superfícies da asa, os *ailerons*.

Na medição apresentada no Anexo B, o valor mais alto encontra-se na ponta da “Igrejinha”, igual a 0,54. Em toleranciamento GD&T, a medição da tolerância de superfície é dada pelo módulo do dobro do valor mais proeminente. Daí surgir o valor 1,08, que está dentro da tolerância de 1,20.

Da mesma maneira que é feita esta medição para a parte de cima da asa (extradorso), é feito também para a parte de baixo da asa (intradorso) como se vê na figura apresentada no Anexo C.

Por fim, a última medição a que a “Igrejinha” é submetida volta a ser uma medição de tolerância de superfície, em relação ao mesmo plano HJ, no entanto agora a avaliação é feita pela lateral da “Igrejinha”. A figura 6.22 traduz a distância *Y*, a que os revestimentos extradorso e intradorso da “Igrejinha”, encontram-se da *hinge* 2, que é de onde surge o *datum* J. Assim, é possível ter uma noção se os revestimentos encontram-se torcidos ou desviados, tanto em relação à referência *hinge* 2, como entre eles.

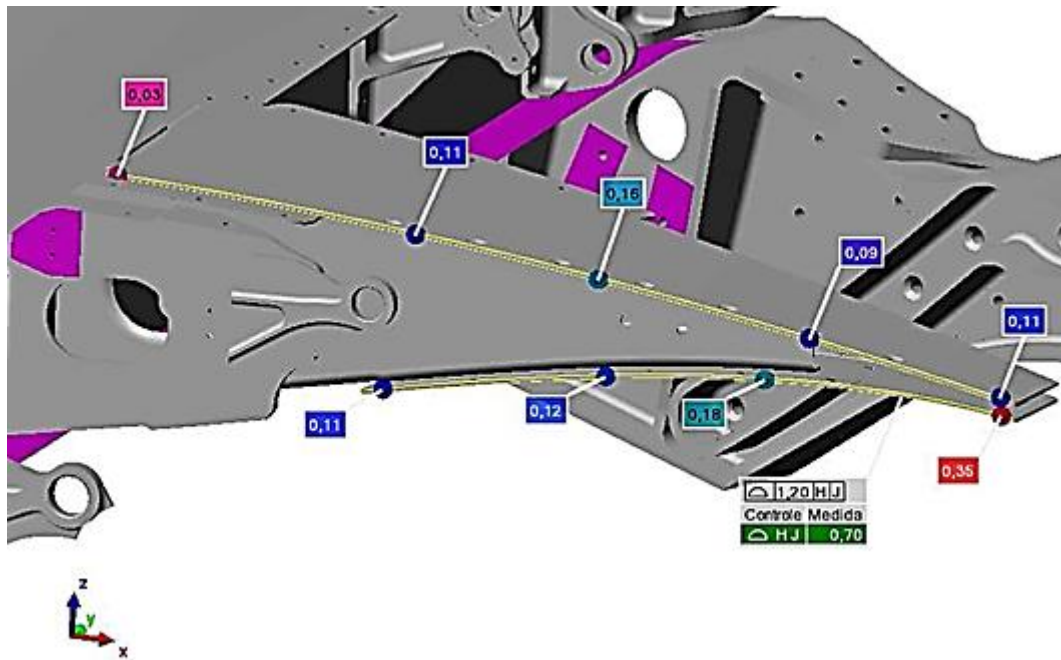


Figura 6. 22 - Medição lateral da Igrejinha em relação ao plano HJ

É então que surge o problema. É que as medições apresentadas no Anexo B e C e na figura 6.22, com os valores a verde, que significam que a tolerância foi conseguida, foram medidas depois de ter sido realizado o retrabalho. Isto porque, de todas as vezes que uma asa chega ao seu fim de ciclo de produção e é medida, a “Igrejinha” tem de ser retrabalhada por não estar dentro de tolerâncias.

Os retrabalhos necessário da “Igrejinha” implicam voltar a instalá-la dentro dos limites de tolerância do plano HJ. É como se houvesse um volume de manobra, demonstrado na figura 6.23 Assim, a tolerância GD&T permite ter mais liberdade de movimento dentro do retângulo a verde, desenhado na figura 6.23. É como se a “Igrejinha” (a vermelho) tivesse graus de liberdade de posicionamento, mas sempre dentro dos limites de tolerância dados pelo projeto.

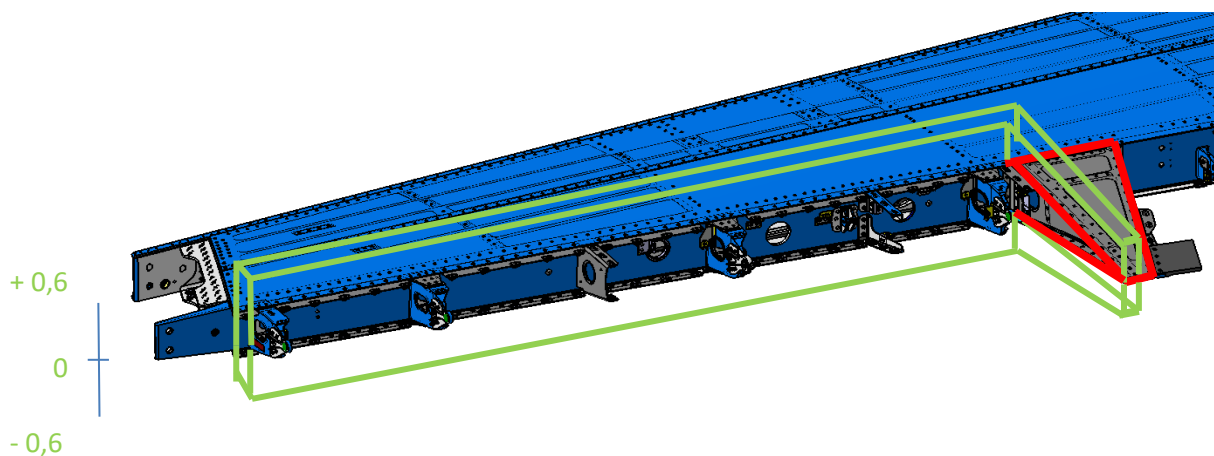


Figura 6. 23 - Volume de manobra para posicionamento da Igrejinha

A figura 6.23 simula o posicionamento da “Igrejinha”, no ponto zero da sua montagem, como se tivesse perfeitamente posicionada. As variações do seu posicionamento podiam ser de mais 0,6 mm para cima ou para baixo, de modo a continuar dentro do volume apresentado a verde.

Para ajudar no estudo a este problema, fez-se um pequeno questionário aos engenheiros, operadores, e monitores de linha, que já tiveram contacto com esta componente, com o objetivo de saber os 3 maiores problemas que se levantam, no que diz respeito a esta componente. No anexo D, é apresentado o *layout* do questionário.

No total, foram realizados 10 inquéritos. Das 30 respostas obtidas, fez-se uma análise e organizaram-se os problemas em diferentes categorias para perceber quais as áreas que mais impactos estavam a ter na componente.

Com o objetivo de cumprir os requisitos de forma e posicionamento, que as medições exigem, desenhou-se um diagrama para melhor compreender as conclusões provenientes do uso dos inquéritos. Nas figuras 6.24 e 6.25 ilustra-se as categorias dos problemas.

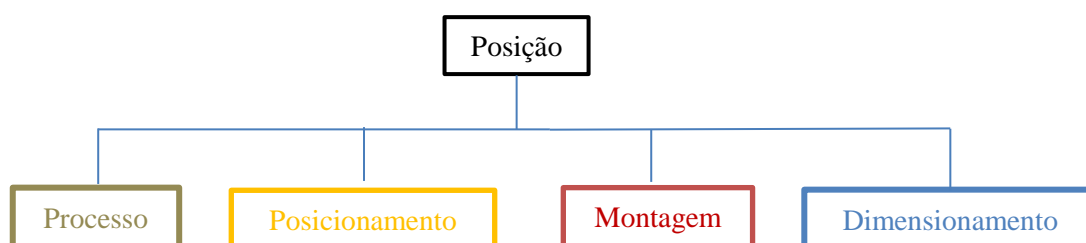


Figura 6.24 - Categorias dos problemas levantados nos inquéritos quanto à tolerância de posição

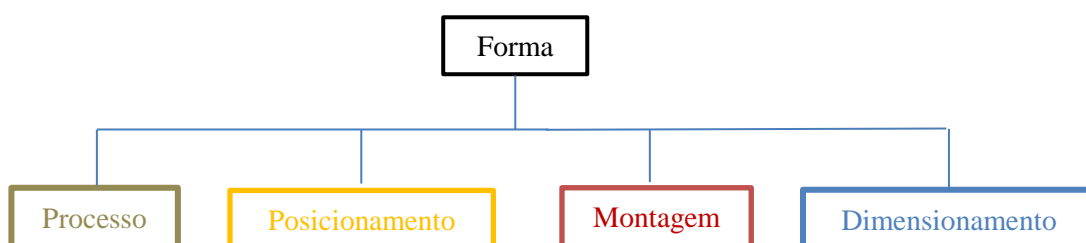


Figura 6.25 - Categorias dos problemas levantados nos inquéritos quanto à tolerância de forma

Com este diagrama verifica-se que tanto o requisito de forma como o de posição dependem dos mesmos 4 fatores, no entanto a dependência não é a mesma.

Estes 4 fatores, traduzem-se no Processo, Posicionamento, Montagem e Dimensionamento, que serão de seguida apresentados individualmente com impacto nas duas tolerâncias em causa.

6.6.1 Processo

Começando pela primeira categoria, o Processo, é compreensível que ao longo de todo o processo de montagem da linha, que incluem constantes processos de furação e de cravação, executados diretamente na *spar* II (onde a “Igrejinha” é assente), que esta sofra pequenas

deformações. No entanto, o acumular dessas pequenas deformações, passo-a-passo, de estação em estação, pode provocar desvios maiores no fim da montagem, visto estar a lidar-se com tolerâncias na ordem das décimas de milímetro.

Este facto pode ser comprovado através de duas medições laser, visíveis nas figuras 6.26 e 6.27, que foram realizadas no início do processo produtivo da asa e no fim. Assim, o caso apresentado é o da medição das *hinges* do aileron, mal a *spar* II sai da estação do Bordo de Fuga (onde as *hinges* foram posicionadas) e quando chega à estação da complementação. Lembrar que o posicionamento e a forma da “Igrejinha” dependem da *hinge* 2, como visto acima.

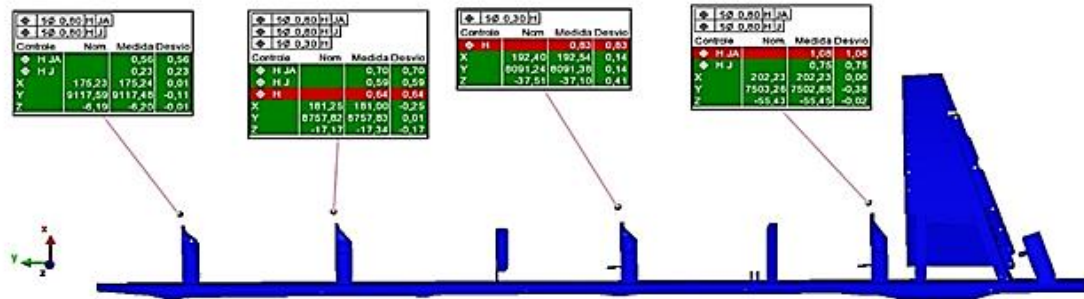


Figura 6. 26 - Resultado da medição feita após operações no Bordo de Fuga

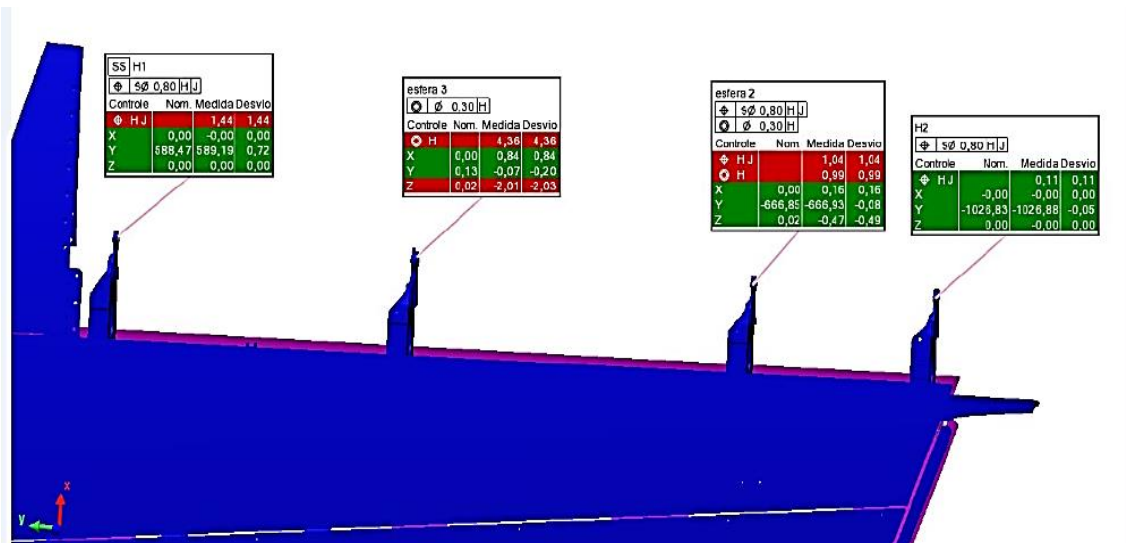


Figura 6. 27 - Resultado da medição feita na Complementação

Nestas medições, as *hinges* 1 e 4, são tidas como referência (ou zeradas) tanto na componente “x” como na componente “z”, como é possível ver nas coordenadas apresentadas. Analisando a tolerância de posição da *hinge* 1, na componente livre “y”, podemos verificar que da primeira medição para a segunda medição a variação vai de -0,38 até 0,72 positivos. Trata-se de uma variação de 1,1 mm. Pode até parecer uma variação mínima, no entanto, no plano HJ, sobre o qual a tolerância está a ser medida, é o suficiente para a colocar fora do intervalo pretendido, e exigir um retrabalho adicional o que implica um maior gasto de recursos.

De notar que a ponta da “Igrejinha” situa-se a um distancia ou “braço” superior da *spar II*, quando comparada à ponta da *hinge*. Se pequenos desvios acontecem nas *hinges*, pode-se prever um pior comportamento da extremidade da “Igrejinha”.

6.6.2 Posicionamento

A segunda categoria de influência que se considerou foi o Posicionamento. O posicionamento em causa tem a ver com o método utilizado para a instalação da “Igrejinha”, na *spar II*, por forma a respeitar a medição de forma e de posicionamento.

Na estação do Bordo de Ataque (a primeira), a “Igrejinha” é fixa à *spar II*, por meio de duas emendas em forma de “L”.

A cravação para fixação dos L’s à *spar* é a cravação final, figura 6.28. Isto quer dizer, que desde a primeira estação de trabalho a posição em Y, da base da Igrejinha está definida e não vai mais ser retrabalhada. Porém a cravação dos L’s à “Igrejinha” é executada apenas de forma provisória. Isto porque, se a ponta da “Igrejinha”, ao longo do processo, se movimentar mais para a esquerda ou mais para a direita, o seu posicionamento pode ser ainda alterado na estação da Complementação.

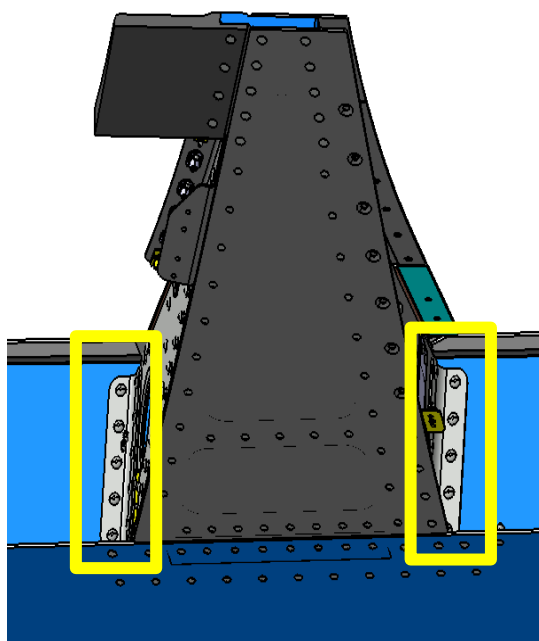


Figura 6. 28 - Emendas em "L" que são fixas definitivamente na *Spar*

No entanto, referir que estas duas emendas, não são suficientes para garantir que a distância $d1$ é igual à distância $d2$, em relação à *hinge 2*, e com isto garantir a medição de Posição, como ilustrado na figura 6.29.

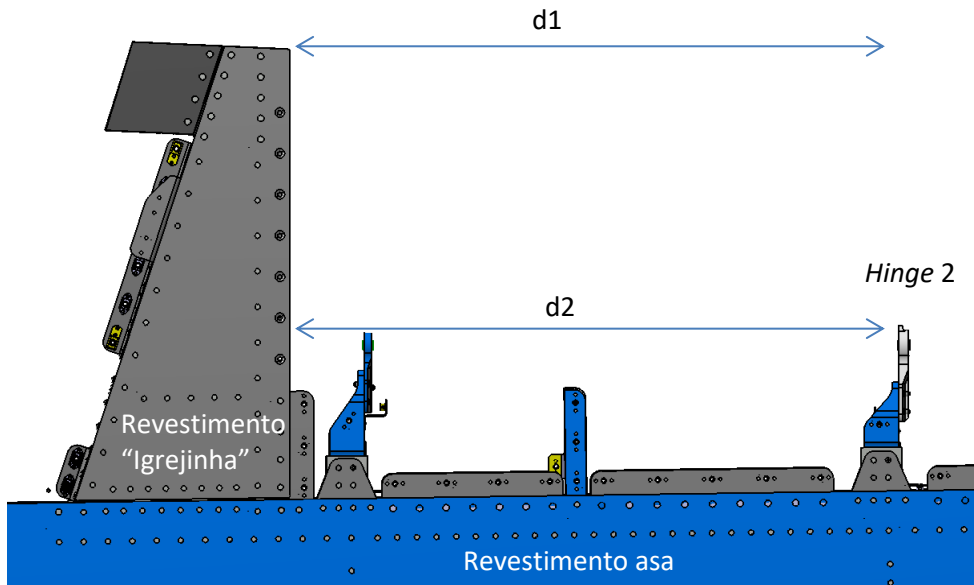


Figura 6. 29 - Distância d1 e d2 com relação direta ao Datum J, da hinge 2

Sendo o Bordo de Fuga a primeira estação, os revestimentos das asas ainda não foram sequer posicionados. Por isso, seria muito difícil prever o alinhamento que vai existir entre o revestimento da “Igrejinha” (a cinzento na figura 6.29) e o revestimento da Asa (a azul na mesma figura) e que garantiria a inexistência de *step* entre as duas superfícies (relacionado com a medição de Forma).

É na estação 5, que se tenta executar este Posicionamento, que garantirá o posicionamento da ponta da “Igrejinha” para a medição final.

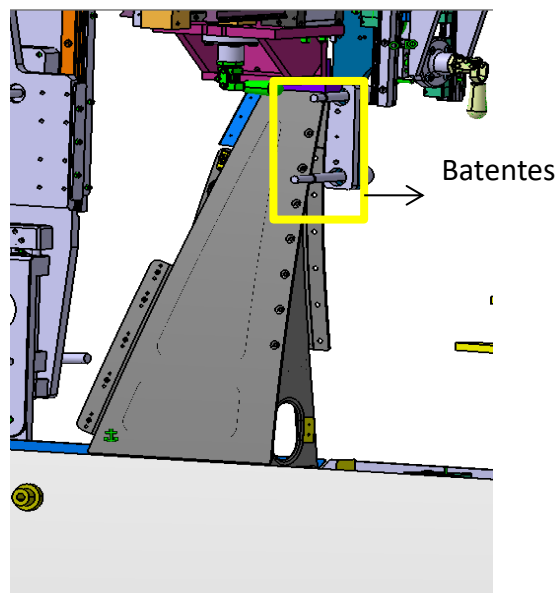


Figura 6. 30 - Batentes do gabarito em relação à hinge 2

O problema levanta-se quando os revestimentos da “Igrejinha” encontram-se torcidos. Isso significa que o gabarito pode dar batente no revestimento extradorso da “Igrejinha”, no entanto o revestimento intradorso não encostar no batente. Consequência disso, é a tentativa por

por parte dos operadores, de remediarem a situação, através de técnicas pouco precisas, como ilustra a figura 6.31.



Figura 6. 31 - Técnica adotada pelos operadores para posicionamento da “Igrejinha””

A medição apresentada na figura 6.32, trata-se exatamente da mesma asa da qual foi tirada a fotografia da “Igrejinha” da figura 6.31. O valor na ponta da “Igrejinha” é de 0,93 é positivo e no sentido de Y, precisamente no sentido que está a ser puxado.

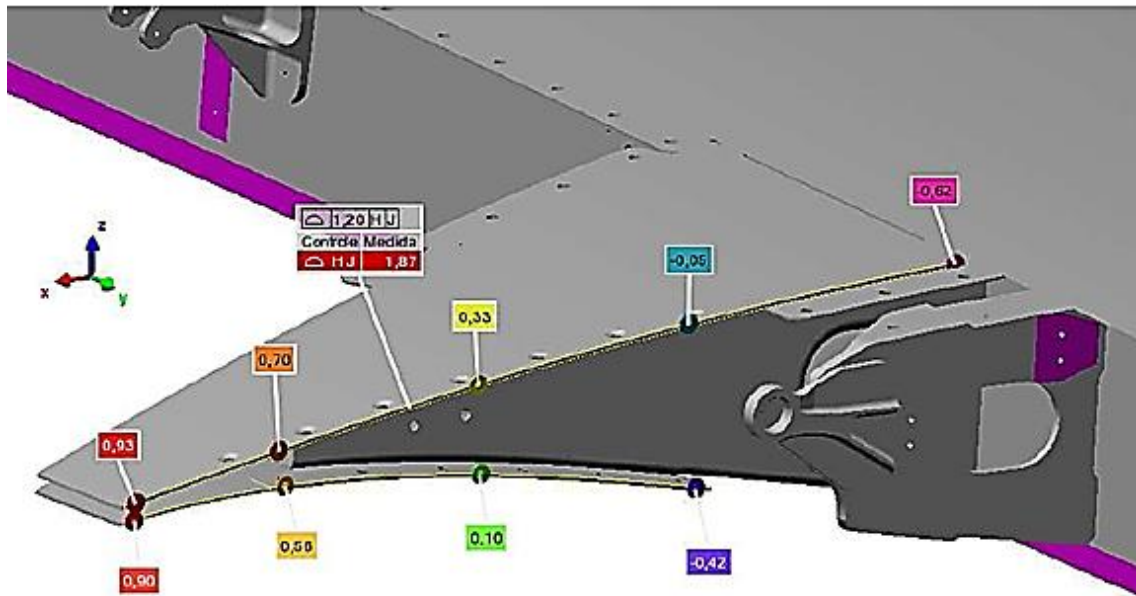


Figura 6. 32 - Resultado da medição de posição das laterais da "Igrejinha"

Em suma, está em falta um gabarito mais preciso que consiga relacionar o posicionamento da “Igrejinha”, tendo em conta a medição que é realizada.

6.6.3 Montagem

A categoria Montagem tem algumas subcategorias intrínsecas a serem discutidas.

A montagem da “Igrejinha” depende de como vêm as peças de fábricas, do gabarito de montagem e da sequência de cravação utilizada. Assim, é como se tivéssemos a divisão apresentada na figura 6.33.

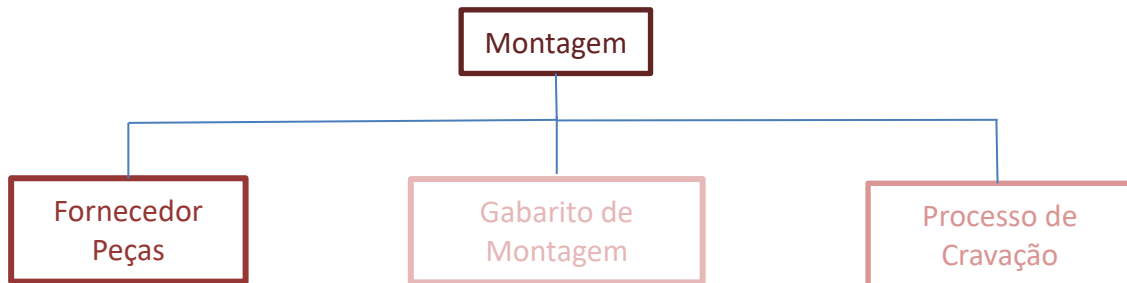


Figura 6.33 - Subcategorias da Montagem

6.6.3.1- Fornecedores de Peças

O conjunto “Igrejinha” é composto por 12 peças, como mostra a figura 6.34. Umas mais pequenas que outras, com geometrias diferentes e requisitos de pré-furo apertados.

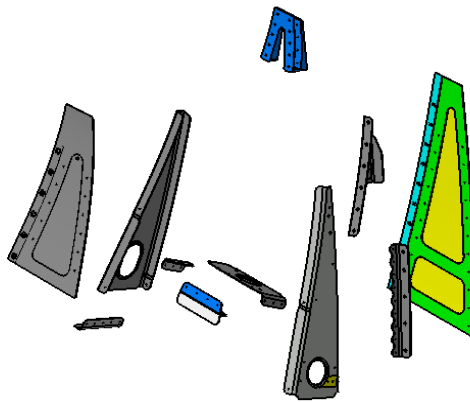


Figura 6. 34 - Peças que consituem a "Igrejinha"

As peças da “Igrejinha”, não são feitas na própria fábrica da Embraer Portugal S.A., e como tal, recebem-nas de empresas dedicadas à fabricação deste tipo de produtos.

Uma vez que esta componente apresenta problemas na forma, foi pedido uma medição tridimensional de algumas peças. Do total de 12 peças, 5 delas têm influência direta na Forma da “Igrejinha” e são apresentadas na figura 6.35. São elas as *ribs*, os revestimentos intradorso e extradorso e o Selo. Importante assinalar que tanto as *ribs* como os revestimentos são peças obtidas pelo processo de estampagem e que apenas o Selo é maquinado.

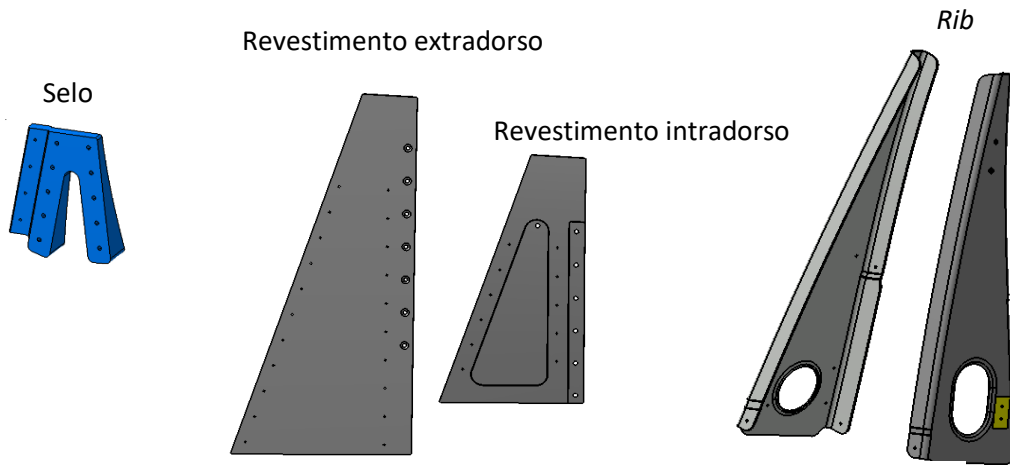


Figura 6. 35 - Peças com influência na forma final da "Igrejinha"

A avaliação GD&T das peças a que o fabricante tem acesso é definido para o estado de conformação final do conjunto. Por isso os revestimentos, apesar de também terem sido avaliados, pouco interesse tinham para a conclusão do estudo, uma vez que a sua medição fez-se em estado livre. Na realidade, o importante da medição, era descobrir em que estado as abas das *ribs* estavam e também se o Selo se encontrava nas conformidades do desenho Embraer.

A medição foi realizada a um total de 6 conjuntos (12 *ribs* medidas), 3 conjuntos de "Igrejinhas" do lado esquerdo da asa e outros tantos de "Igrejinhas" do lado direito da asa. Apresenta-se na figura 6.36, o resultado de uma medição efetuada, sendo que o relatório completo é apresentado no Anexo E.

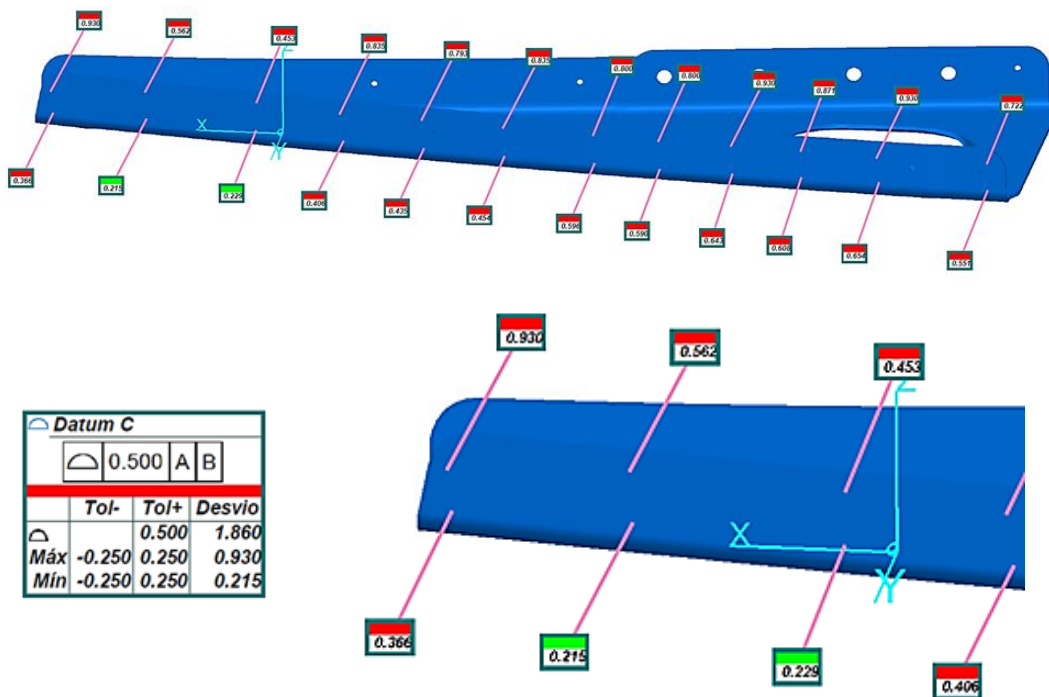


Figura 6. 36 - Resultado da medição de uma das Ribs

A peça foi desenvolvida em projeto para ter no máximo uma tolerância de superfície na aba extradorso de 0.5mm e apresenta um valor total de 1.86mm, três vezes superior ao permitido, como é possível ver na figura 6.36. Traduzindo os resultados obtidos na medição, o facto de os valores de cima da aba serem significativamente superiores aos valores de baixo, significa que a aba apresenta uma abertura acima do esperado e que o processo de estampagem não foi bem conseguido.

Do total de *ribs* medidas, apenas duas delas apresentaram valores dentro da tolerância, tanto na aba onde iria ser cravado o painel extradorso, como na aba onde seria cravado o painel intradorso. A figura 6.37, ilustra uma dessas duas *ribs* aprovadas e serve para se visualizar os valores a verde, que significam que se encontram dentro das tolerâncias.

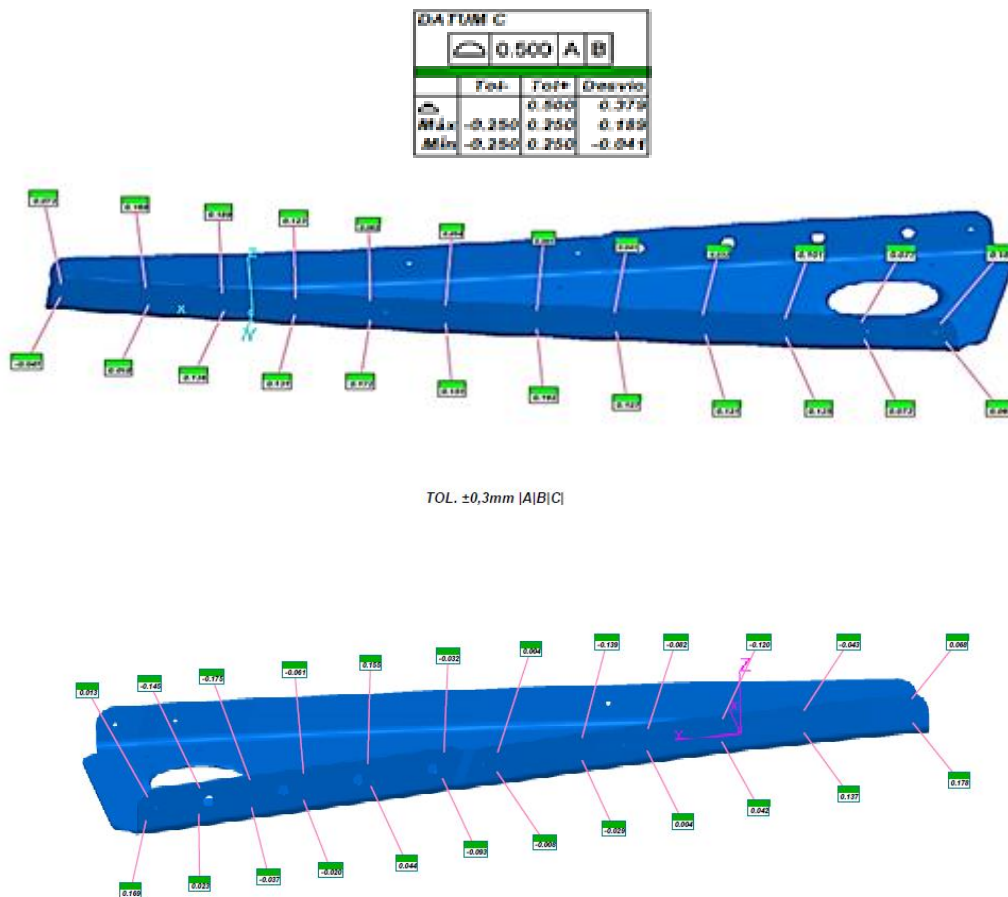


Figura 6. 37 - Peça aprovada após medição tridimensional

A *rib* apresentada era do lote C000152354 e de PN – 550-01927-005. Para uma conclusão ideal de estudo, seria necessário colocá-la na mesmo conjunto que o PN – 550-01928-003, do lote C000152338, a outra *rib* medida que se encontrava dentro das tolerâncias, e fazer a montagem de uma “Igrejinha” com estas duas peças.

A juntar a estas duas *ribs* aprovadas, qualquer um dos 5 selos que foram pedidos para medir, poderia fazer parte desse mesmo conjunto, por terem sido também eles aprovados.

Na figura 6.38 são apresentados os resultados da medição de 1 selo, ilustrativo dos restantes 4.

TOL. $\pm 0,3\text{mm}$ |A|B|

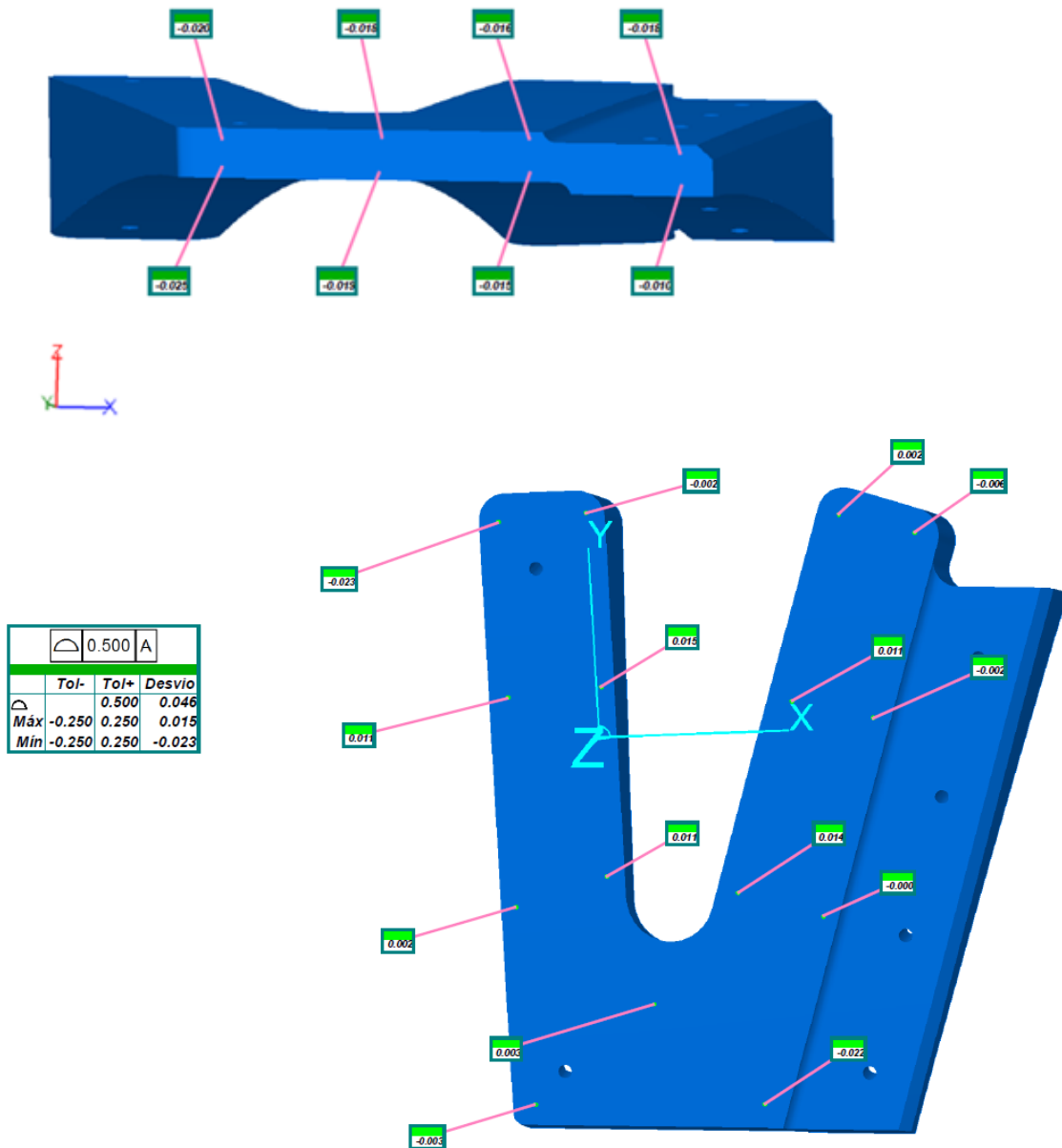


Figura 6. 38 - Resultados da medição tridimensional de um Selo

A figura 6.38 tem como finalidade apresentar as cores verdes dos valores medidos, apenas para ilustrar a aprovação da peça. No anexo F, é apresentado o relatório deste mesmo selo, com uma imagem mais nítida para análise dos valores.

Uma tolerância de 0,3 mm, significa algo tão pequeno como o diâmetro de um cabelo de um ser humano. Isto prova que as peças maquinadas conseguem garantir as tolerâncias exigidas de forma bem mais precisa que as peças estampadas.

6.6.3.2- Gabarito de montagem

Muito importante para todo o processo da passagem da montagem da “Igrejinha” de conjunto para subconjunto, é o gabarito que foi totalmente desenvolvido a pensar nesta componente, figura 6.39.

Inicialmente a “Igrejinha” era montada como Conjunto, isto é, no Bordo de Fuga, através de um gabarito bastante dúbio, pela falta de conformidade que a componente apresentava sempre que chegava à Complementação e era medida.

Assim desenvolveu-se um novo gabarito, há 4 anos atrás, para a sua montagem. No entanto, os primeiros *tryouts* realizados neste gabarito chumbaram porque a “Igrejinha” ficava fora de tolerância e o gabarito tinha de ser reparado.

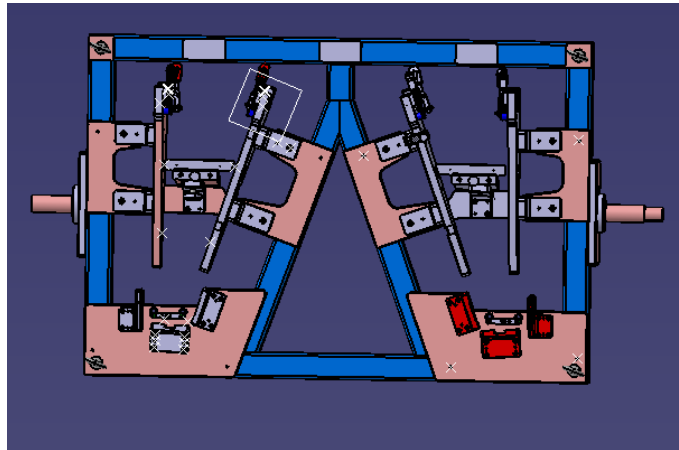


Figura 6. 39 - Gabarito desenvolvido especificamente para a montagem da "Igrejinha", como subconjunto

A forma mais rápida de colocar o gabarito em funcionamento foi através de engenharia inversa, que consistiu na montagem da “Igrejinha” no gabarito do conjunto do Bordo de Fuga e antes de se efetuar a cravação final, posicionaram-se as peças no gabarito “novo” de subconjuntos e alinharam-se os furos que tinham sido feitos.

O resultado foi o posicionamento errado do suporte da bandeja, que não permitia o perfeito alinhamento entre as *ribs* e o suporte, como mostra a figura6.40.

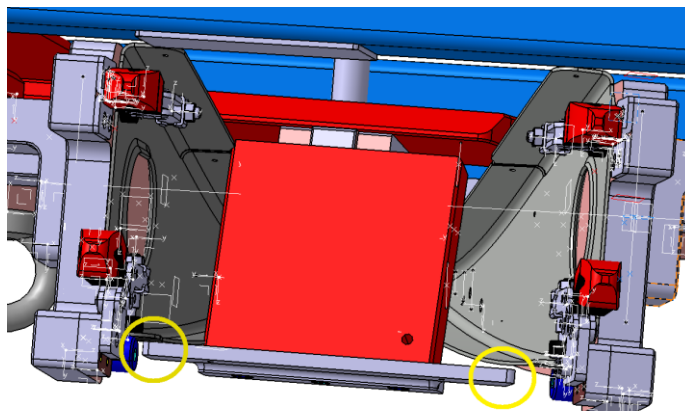


Figura 6. 40 - Desalinhamento entre o suporte da bandeja e as ribs

É possível visualizar do lado esquerdo da imagem, marcado com um círculo a amarelo, o contacto suposto entre o suporte e a *rib*. Do lado direito, o mesmo já não acontecia.

De modo a corrigir esta situação, fixou-se o suporte no posicionamento correto e retiraram-se os parafusos de fixação do suporte ao gabarito, ilustrado na figura 6.41.

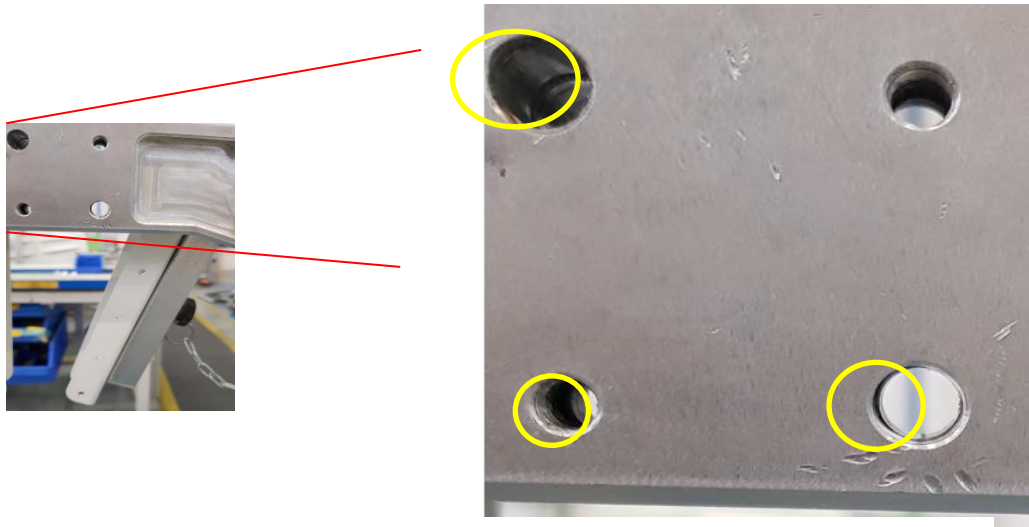


Figura 6. 41 - Desalinhamento entre furos que provocava o desalinhamento entre o suporte e as ribs

Tornou-se visível o desalinhamento entre os furos do gabarito e os furos do suporte quando posicionados corretamente. Desta forma, a tração originada pelo aperto do parafuso, forçava o alinhamento entre os dois furos, e conseqüente mau posicionamento. Para suprir este desalinhamento foi colocada adesivo epóxi, com um tempo de cura de 24 horas, que permitiu iniciar a montagem das “Igrejinhas” neste gabarito de subconjuntos.

Este procedimento foi realizado tanto para o lado esquerdo como para o lado direito, visto que no gabarito, e apesar de serem duas montagens completamente independentes uma da outra, é possível realizar a montagem da “Igrejinha” da asa esquerda como a “Igrejinha” da asa direita e ambos os lados apresentavam a mesma situação.

Após esta correção o gabarito foi sujeito a uma medição tridimensional para validação dimensional. A medição é feita com base no toleranciamento exibido nos desenhos Embraer. No entanto, numa interpretação desses desenhos, os dois lados da montagem, apesar de serem independentes, tinham tolerâncias definidas com os mesmos *datums*. Figura 6.42.

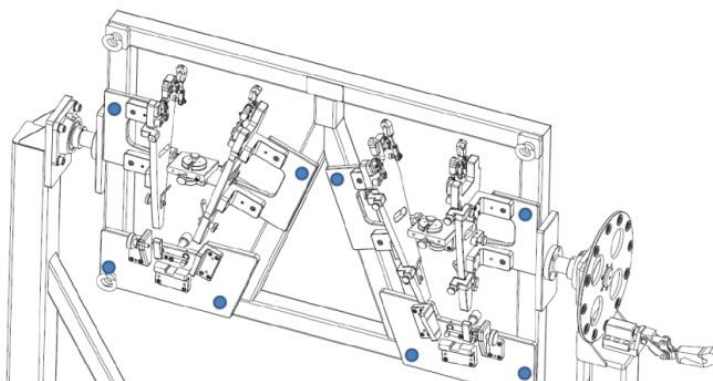


Figura 6. 42 - Definição do Datum A pelos pontos azuis

Os pontos marcados a azul na imagem seriam considerados para formar o *datum* A (referencia primária), sendo que tanto do lado direito como do lado esquerdo seria tido em consideração este mesmo *datum*.

Porém durante a medição verificou-se que este plano A não apresentava uma tolerância de planicidade adequada como apresentado na figura 6.43, e assumiu-se uma divisão coerente dos dois lados, tendo por base os desenhos Embraer e a ASME Y14.5.1M-1994, criando mais 3 *datums*: D como primário, E como secundário e F o *datum* terciário, para o lado direito, mantendo os *datums* A,B e C para o lado esquerdo, o que permitiu obter resultados mais reais, como ilustram as figuras 6.44 e 6.45.

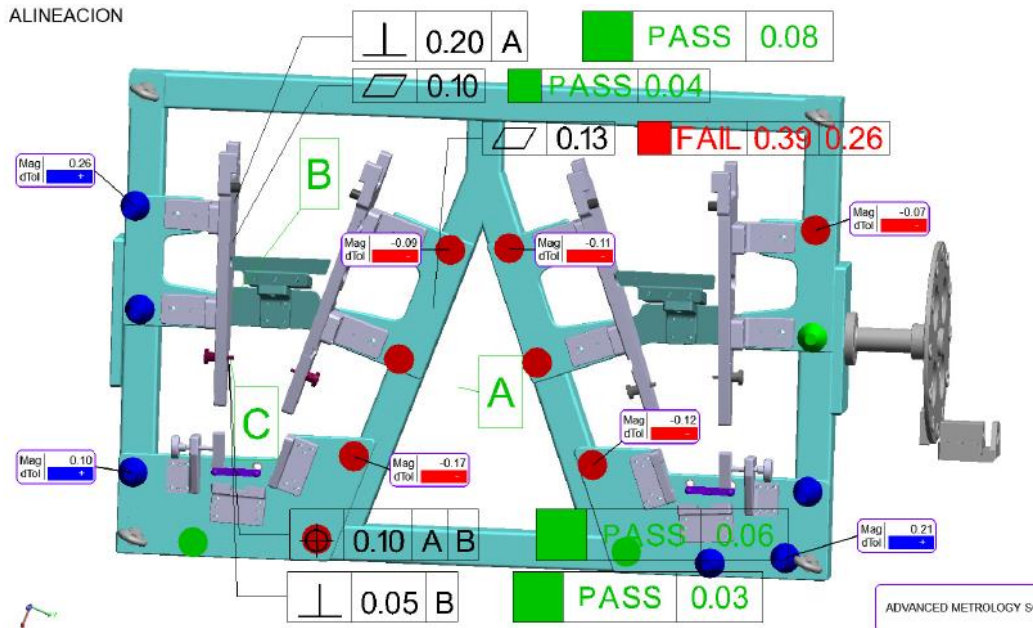


Figura 6. 43 - Resultados da medição de planicidade com os Datuns iniciais

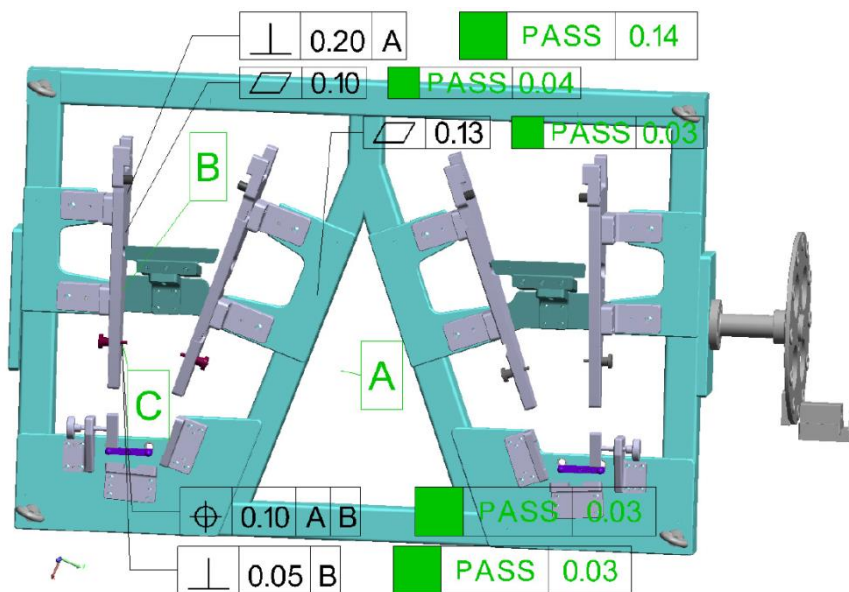


Figura 6. 44 - Resultado da medição de planicidade com os Datuns adaptados A, B e C

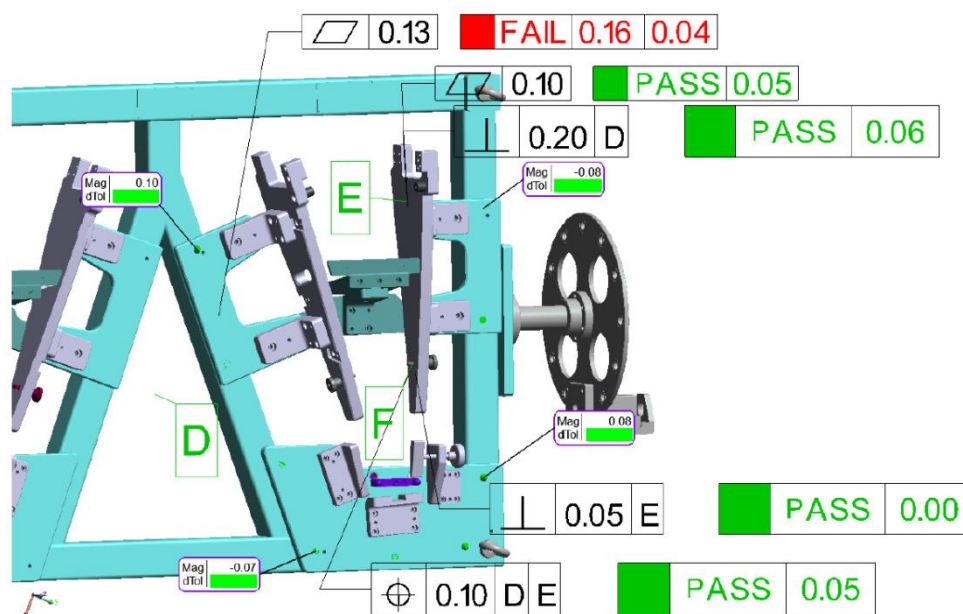


Figura 6. 45 - Resultados da medição de planicidade com os Datuns adaptados D,E e F

O restante dos resultados da medição, não se encontram perfeitos, e variam da montagem do lado direito para o lado esquerdo, sendo que o esquerdo é o que se encontra em pior estado.

Este facto torna-se curioso, uma vez que as referências dos desenhos entregues para o desenvolvimento de gabaritos, são sempre os esquerdos, sendo usada a técnica de “espelho” para desenvolver o lado direito.

É importante referir que o gabarito de montagem não dá forma à “Igrejinha”. As peças são apenas posicionadas entre si, e é realizada a furação nas peças, no entanto é o processo de cravação onde se tem de ter mais atenção.

6.6.3.3- Processo de cravação

O processo de cravação é o procedimento mais importante de toda a montagem da “Igrejinha”. Com os furos já realizados nas peças, a conformação final é ganha com a cravação dos últimos rebites, e as torções que os painéis apresentam nos relatórios de medição, são originados durante este processo.

Como foi anunciado no capítulo 5 - Processos de cravação, com os poucos estudos que existem sobre deformação física nas peças após a cravação, não existe a melhor técnica para evitar deformações na peça, por isso a técnica utilizada passa pela tentativa-erro, até alcançar-se o melhor resultado possível.

Outro aspeto a ter em atenção durante este processo é a origem de fabricação das peças, para saber quais as peças maquinadas e quais as peças estampadas. A conformação das peças estampadas às maquinadas provoca na maioria dos casos desalinhamento entre furos que já tinham sido feitos com relação a outras peças. E a “Igrejinha” não foge à regra.

Algumas sequências de cravação foram experimentadas para compreender o comportamento dos materiais, mas nem todas as “Igrejinhas” puderam continuar o seu percurso depois das experiências, porque havia uma grande probabilidade de chumbarem.

Essa validação é feita, através de uma máscara com a forma final da “Igrejinha”, onde depois do processo de cravação assenta-se a componente para perceber se a curvatura que apresenta está dentro das conformidades. Todavia, a validade desta máscara não é a melhor porque foi em tempos utilizada como base para o processo de cravação realizado através de martelete, o que implicava que a máscara era sujeita a muitas batidas, e com isso a possibilidade do surgimento de pequenas deformações.

Na “Igrejinha”, o processo inicia-se entre a junção das duas *ribs*, da bandeja, de uma emenda em “L” e outra em “T”, visível na figura 6.46.

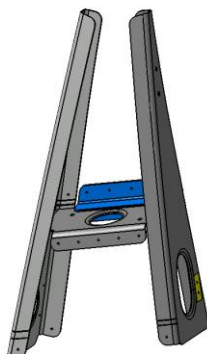


Figura 6. 46 - As primeiras peças a serem cravadas sem relação à forma posicionamento final

De seguida é cravado o revestimento extradorso, às *ribs*, figura 6.47. Neste processo o revestimento irá conformar-se às abas laterais das *ribs*. Isto quer dizer que a forma que as abas apresentarem, será a forma que o revestimento adotará. Como visto anteriormente, uma vez que as *ribs* são fabricadas através de processos de estampagem, torna-se difícil garantir a sua forma, sendo este o primeiro problema.

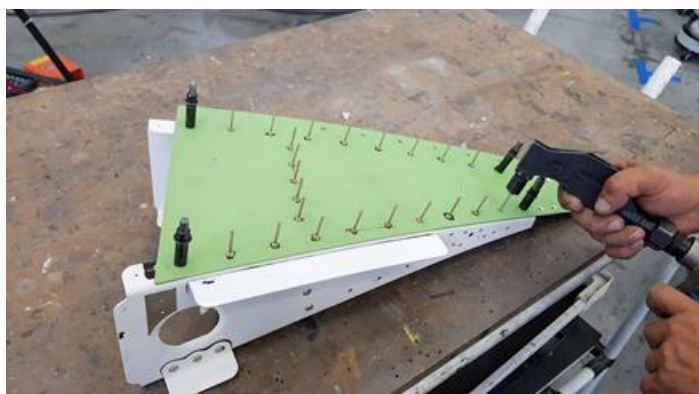


Figura 6. 47 - Cravação do revestimento extradorso

Continuando o processo, o passo seguinte é a cravação do Selo com os revestimentos intradorso e extradorso.

Para este procedimento é utilizado outro tipo de rebite (rebite “sólido”) pelo facto de ser uma peça mais robusta. Posiciona-se o selo e o revestimento intradorso junto do revestimento extradorso. Este processo é realizado, através de uma punção hidráulica, com velocidade de conformação controlada pelo operador. Estudos prévios (Schijve, 1998), demonstram que a velocidade de conformação é uma das variáveis estudadas que mais influência apresenta na conformação final da peça, requerendo assim a participação de um operador experiente no processo. A figura 6.48 ilustra o resultado.



Figura 6. 48 - Processo de cravação do revestimento intradorso e do selo ao revestimento extradorso

É após este processo que é verificado o segundo problema. A cravação dos rebites sólidos provocou um desvio entre os furos do painel intradorso e os furos das *ribs*, que tinham sido feitos em conjunto no gabarito de montagem de subconjuntos. Este processo é o principal responsável pela inconformidade lateral da “Igrejinha”, ou seja, é o principal responsável por não ser possível garantir a distância entre a lateral da “Igrejinha” e a *hinge 2*.

A medição apresentada na figura 6.49, é de uma “Igrejinha” que teve todo o seu processo de montagem acompanhado e que estava referenciada para um possível desalinhamento do revestimento intradorso, precisamente pela verificação do desalinhamento de furos que houve na cravação do revestimento intradorso às *ribs*, após o Selo ter sido cravado. O valor de 1,03 na ponta, e o valor de -0,53, mais perto da base, no lado intradorso, validaram a necessidade de se alterar a sequência de cravação.

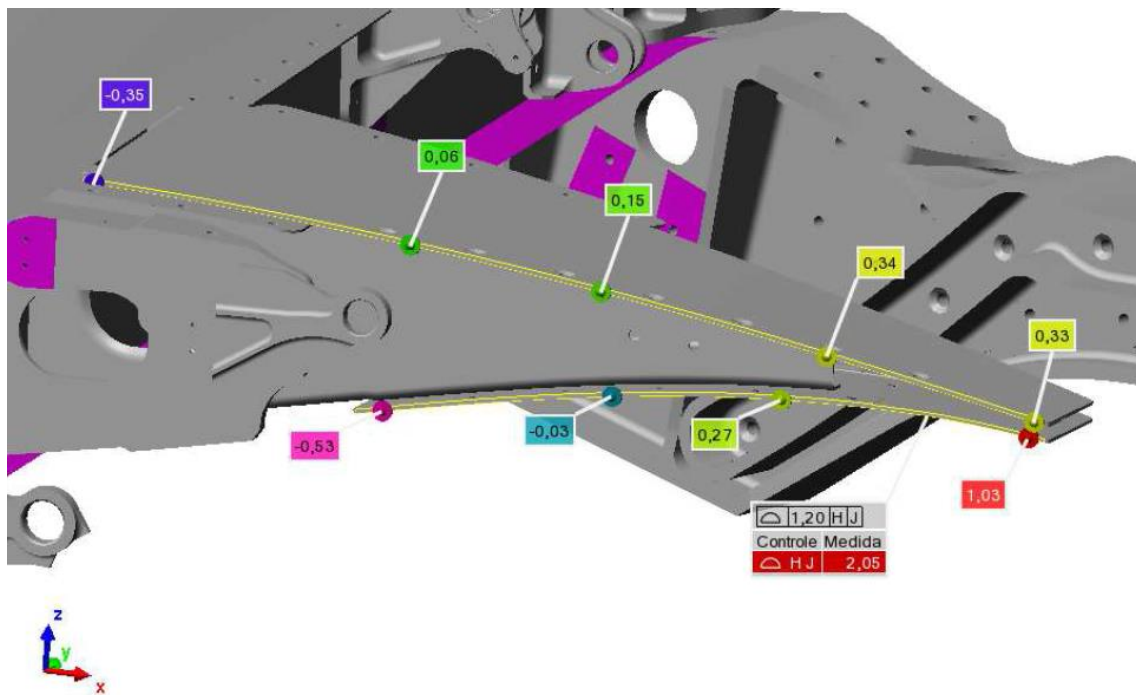


Figura 6. 49 - Resultados do relatório de medição da lateral da "Igrejinha"

Uma sequência testada, com o objetivo de eliminar os desvios entre os furos do revestimento intradorso e as *ribs*, após o Selo cravado aos dois painéis, era realizar inicialmente a cravação dos dois revestimentos, e só no fim o Selo. Mas o resultado não foi positivo. A cravação do selo cria muitas tensões. Se o revestimento intradorso tiver já cravado nas *ribs*, as tensões geradas forçarão o conjunto a ganhar nova forma, mais encurvada que o pretendido, como visível na figura 6.50.

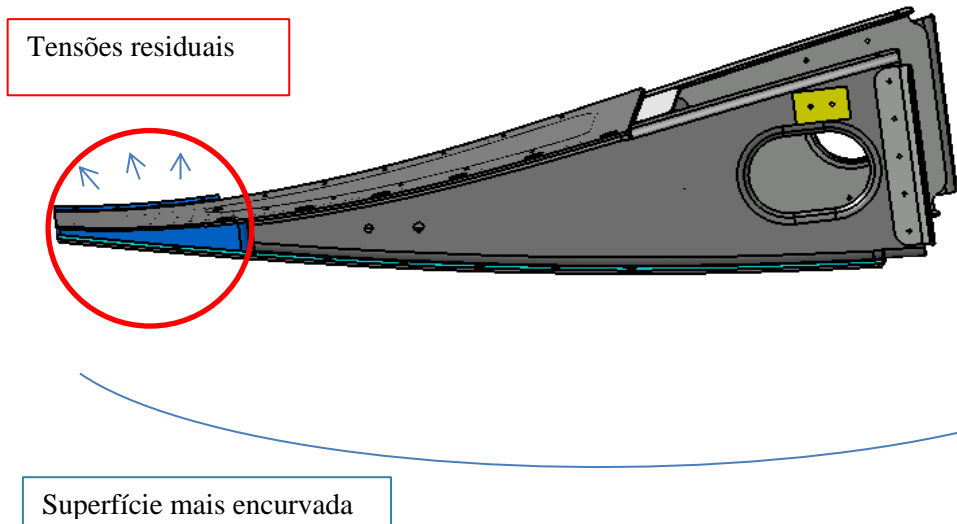


Figura 6. 50 - Encurvamento originado pela cravação da zona do Selo

6.6.4. Dimensionamento

Esta questão do dimensionamento é a mais difícil de ser resolvida. Isto, porque se trata de um departamento, que se manteve sempre na empresa-mãe, no Brasil. O que quer dizer, que qualquer alteração ao produto, aos desenhos, ao toleranciamento que seja pretendido realizar, terá um atraso maior do que a própria modificação já requer.

Este fator é aqui mencionado pela necessidade de ser repensada a concepção do produto “Igrejinha”. Trata-se de um componente da asa com um impacto enorme no comportamento aerodinâmico da asa.

O facto de ser constituída por 12 peças, de variadas dimensões, e com necessidade de processos de cravação para as unir, torna-a ainda mais vulnerável. Apenas uma das peças que a constitui é maquinada, todas as restantes são peças estampadas e isso tira robustez ao conjunto. As peças estampadas exibem também uma menor garantia de qualidade de produto. Nos processos de cravação, são as peças estampadas que se conformam às peças maquinadas, por exemplo. Com os resultados obtidos da medição das *Ribs* torna-se imperativo que haja alterações à fabricação das peças, de modo a garantir as tolerâncias que se pretendem.

Outra questão a ser referenciada é a tolerância que a “Igrejinha” apresenta. As tolerâncias dos produtos são definidas conforme os processos pelos quais os produtos terão de passar. O ponto de partida é a tolerância final, que vai sendo apertada em processos primários até chegar à conformidade final esperada. Neste aspeto a “Igrejinha” passa por uma montagem, um posicionamento e uma instalação final. Processos que exigem um aperto das tolerâncias que por vezes podem ser excessivos de alcançarem.

6.7. Propostas de melhoria

Após uma profunda e cuidada análise a todos os processos que envolviam a componente “Igrejinha”, e dos resultados das medições, foram várias as oportunidades de melhoria identificadas.

Das 30 respostas obtidas pelos inquéritos, 11 foram para a categoria de Montagem, 8 para a categoria de Dimensionamento, 7 para questões relacionadas com o Posicionamento, 2 na categoria de Processo, 1 na categoria de Engenharia (de Ferramental) e também na Geral. Importante relembrar que na questão do Dimensionamento, aqui com uma percentagem de ocorrência muito elevada, o espaço de manobra é muito curto. As alterações ao produto que se pretendam realizar, são feitas através dos *kaizens* (ferramenta do *Lean*). No último *kaizen* realizado, a proposta apresentada em relação à “Igrejinha” consistiu em que uma das *ribs* e o Selo da “Igrejinha” passassem a ser uma só peça, toda ela maquinada, de modo a garantir a forma desejada.

Para dar início ao processo de melhoria do processo produtivo da “Igrejinha”, a categoria Processo seria a que mais rapidamente poderia deixar de ter influência nas inconformidades que a componente apresentava. Desta forma a proposta de melhoria consistia no seguinte: montagem (furação e cravação) realizada como subconjunto no gabarito desenvolvido especificamente para a “Igrejinha”; seguia para a Estação do Bordo de Fuga, somente para fixar os “L’s” à *spar* e era removida deixando os “L’s”. Apenas no final da linha de montagem, já na Complementação, é que seria instalada.

Desta forma, a “Igrejinha” não acompanhava a *spar* da Estação 1 à 5, e o seu percurso na linha iria ficaria como ilustrado na 6.51.

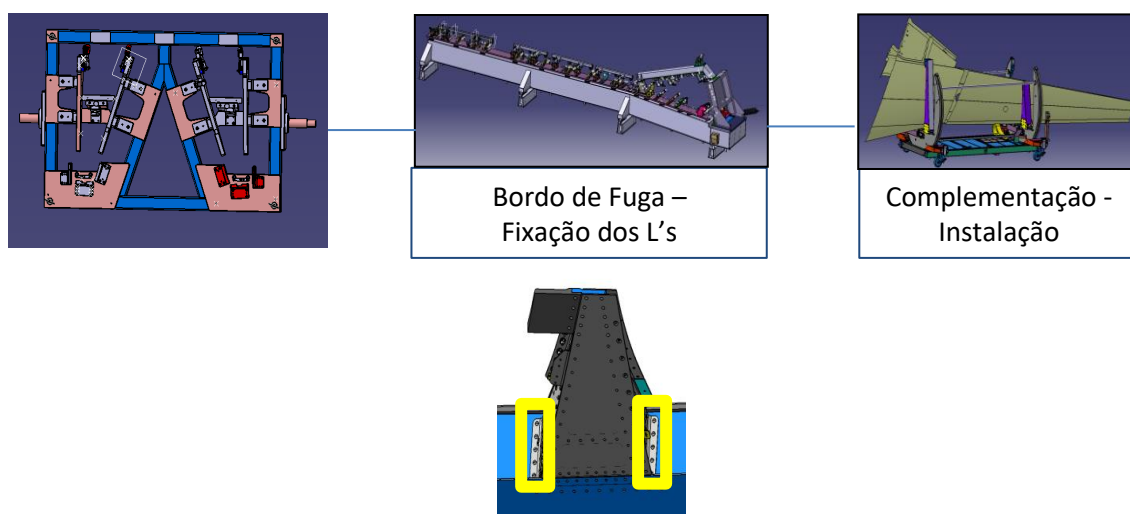


Figura 6. 51 - Proposta para nova linha de montagem e instalação da "Igrejinha"

Comparando com o processo atual, esta solução traria ganhos de tempo e consequentemente de custos. O facto de a “Igrejinha” acompanhar todo o processo posicionada na *spar*, em nada lhe acrescenta valor, até pelo contrário, como provado no caso das *hinges*. No que diz respeito ao tempo despendido, hoje em dia são despendidas 2 horas com a “Igrejinha” na sua instalação: 1 hora na estação 5 para a instalar, mais 1 hora na complementação para a retrabalhar, porque veio mal instalada da estação 5.

Para que a instalação fosse possível realizar na Complementação, sem necessidade de retrabalhos, seria necessário desenvolver um gabarito de Posicionamento para a Complementação.

Analisando assim na categoria de Posicionamento, com o objetivo de continuar a melhorar o processo de montagem da “Igrejinha”, este gabarito teria de ser desenvolvido tendo como referência o posicionamento da *hinge 2*, como foi visto anteriormente, mas também tendo em atenção o suporte do LVDT (sensor de transformação de movimento linear em rotacional).

Quando a asa chega à Complementação, apenas a *hinge 1* e 4 estão totalmente montadas (ferragem e suporte da *hinge*) e cravadas. As *hinges 2* e 3, apenas têm as ferragens (peça que fixa a *hinge* à *spar*) cravadas. Na figura 6.52 é possível ver as peças que constituem as *hinges*.

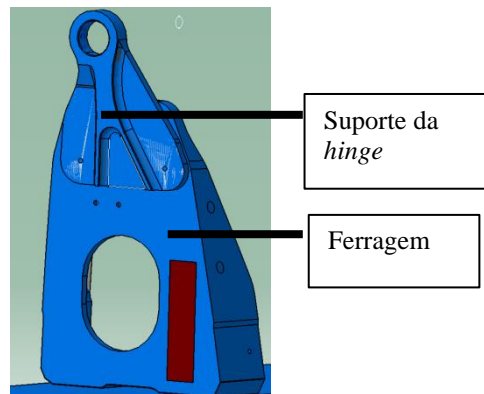


Figura 6. 52 - Peças que constituem as hinges

Para a montagem dos suportes da *hinge 2* e 3, é utilizado um gabarito que garante a concentricidade entre a *hinge 1*, 2, 3 e 4. Este gabarito quando posicionado na H1 e H4, fica ainda com a rotação sobre o eixo de concentricidade livre, que apenas será restringido no suporte do LVDT, figura 6.53. Só depois do movimento de rotação estar fixo é que é o plano HJ (analisado no início do presente capítulo) fica totalmente definido e a ponta da “Igrejinha” pode ser posicionada.

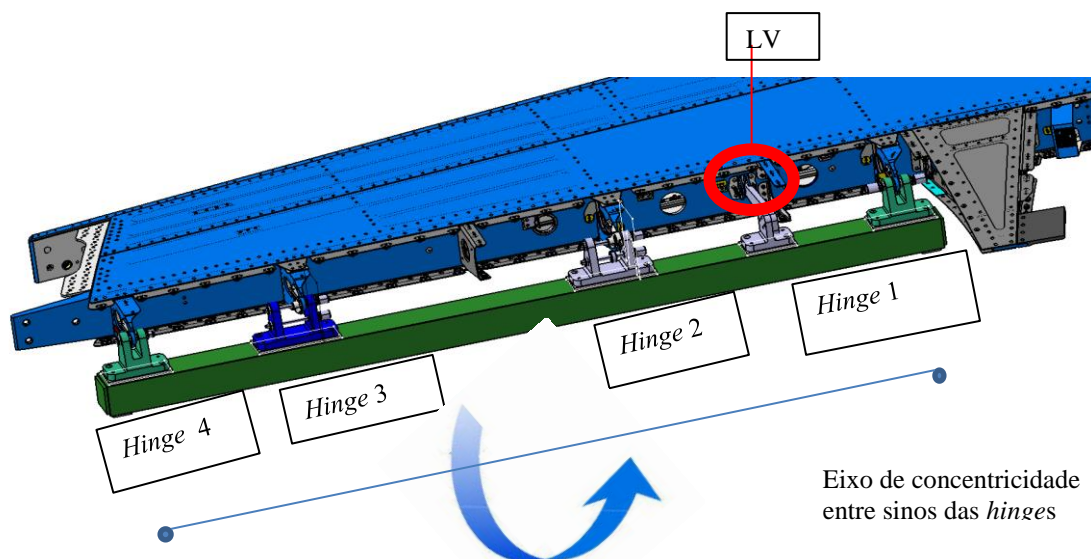


Figura 6. 53 - Gabarito de instalação das hinges 2 e 3

Para que este processo venha a ser realizado, a montagem da componente no gabarito de subconjuntos, tem de ser eficiente. Assim, foi apresentada uma proposta para alteração de algumas peças da “Igrejinha”, também apresentada no último *kaizen*, com a introdução de alguns pré-furos e a eliminação de outros, como por exemplo, demonstra a peça de PN 550-01926-003: da figura 6.54



Figura 6. 54- Alteração proposta às peças da Igrejinha

Os referidos pré-furos nas peças, têm o objetivo de garantir o posicionamento relativo entre peças que não tenham gabaritos dedicados. No entanto, se vierem mal posicionados de fábrica, tornam-se um grande problema.

Estas alterações de produto sugeridas podem ser definidas graças ao gabarito de subconjuntos, que garante o posicionamento relativo das peças através de ferramentais dedicados, deixando de ser necessário a existência destes referidos pré-furos.

Num *tryout* realizado para o *kaizen* referido, os pré-furos sugeridos foram executados nas peças da “Igrejinha” de modo a simular-se uma montagem com a configuração desejada. A operação da montagem da “Igrejinha”, no bordo de Fuga, estava definida para ter uma duração de 8 horas de trabalho, como demonstra a tabela 6.1. Na Embraer, significa mais que 1 dia de trabalho do operador para fazer a montagem desta componente, uma vez que os turnos são de 7 horas.

Tabela 6. 1 - Tempo de Montagem da componente "Igrejinha" no roteiro de montagem anterior

Seq	Oper Code	Description	Status	Basic Qty	Predecessors	Setup Man	Man Power Hours	Setup Machine	Machine Hours
0010	PROD	INSPEÇÃO DE FERRAMENTAL	COMPLETE	1		0	0.5	0	0
0020	PROD	POSICIONAMENTO E FURAÇÃO DAS CINTAS E EMENDA DA LO...	AVAILABLE	1		0	7.5	0	0
0840	PROD	POSICIONAMENTO DAS HINGES POS 74 A 79	COMPLETE	1	0410	0	2	0	0
0850	PROD	MONTAGEM DA IGREJINHA	AVAILABLE	1	0410	0	8	0	0
0860	PROD	INSPEÇÃO DA QUALIDADE (DELEGADA): FURAÇÃO HINGES , F...	COMPLETE	1	0410	0	0.5	0	0

Os resultados do *kaizen* demonstraram que a montagem passaria para quase metade do tempo de execução, num total de 4,5 horas de trabalho, visível na tabela 6.2.

Tabela 6. 2 - Tempo de Montagem da componente "Igrejinha" no novo roteiro

Seq	Oper Code	Description	Status	Basic Qty	Predecessors	Setup Man	Man Power Hours	Setup Machine	Machine Hours
0010	PROD	INSPEÇÃO DE FERRAMENTAL	ACTIVE	1		0	0.5	0	0
0020	PROD	MONTAGEM DA IGREJINHA	ACTIVE	1	0010	0	2.0	0	0
0030	PROD	PREPARAÇÃO E CRAVAÇÃO	ACTIVE	1	0020	0	1.5	0	0
0040	PROD	CONFORMIDADE FINAL	ACTIVE	1	0030	0	0.5	0	0

Também nos processos de cravação foram realizadas algumas sequências diferentes, para perceber o comportamento dos materiais. A primeira proposta era relativa à eliminação da barriga que se formava no espaço entre a *rib* e o Selo, representado pelo valor de 0,88 na figura 6.55

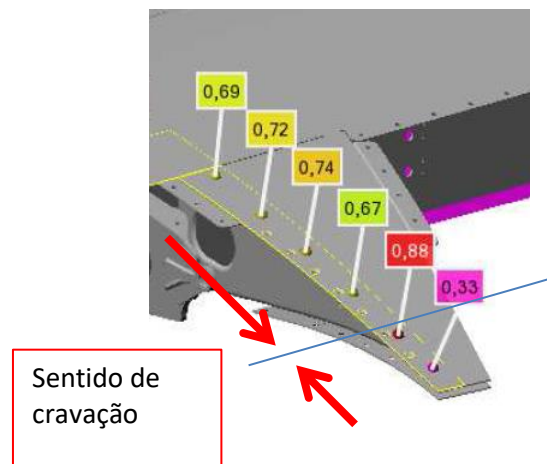


Figura 6. 55 - Sentido de cravação utilizado que promovia "barriga"

Verificou-se que este fenómeno ocorria pela cravação que o operador realizava com sentidos opostos, transportando o erro para o meio.

Neste tipo de processo de cravação, antes de cravar as peças, é colocado selante na interface das mesmas, para garantir uma maior estanquicidade. Por isso, existe uma Norma Embraer que indica que a sequência de cravação para superfícies que requerem selante, deve ser feita do meio para as extremidades, de modo que os excessos de selante escoam para fora da peça.

A medição a que a "Igrejinha" é sujeita é realizada apenas no lado não inclinado. Tendo em conta esse mesmo lado propôs-se uma sequência de cravação para impedir o desalinhamento entre os furos. Essa sequência foi a que se demonstra na figura 6.56:

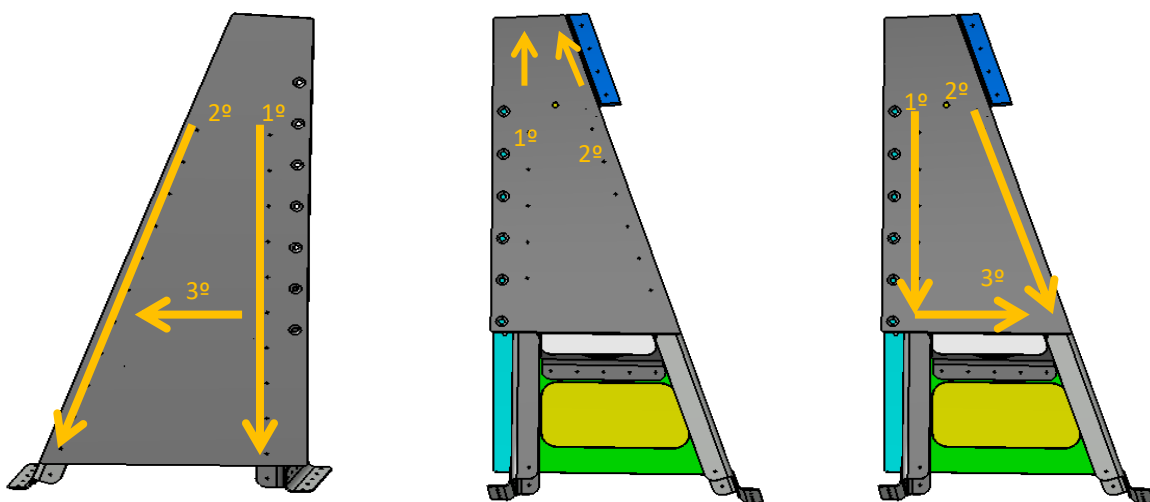


Figura 6. 56- Sequência de cravação sugerida e adotada tendo em conta o lado de medição

Os resultados dimensionais com esta sequência de cravação foram os apresentados nas figuras 6.57 e 6.58.

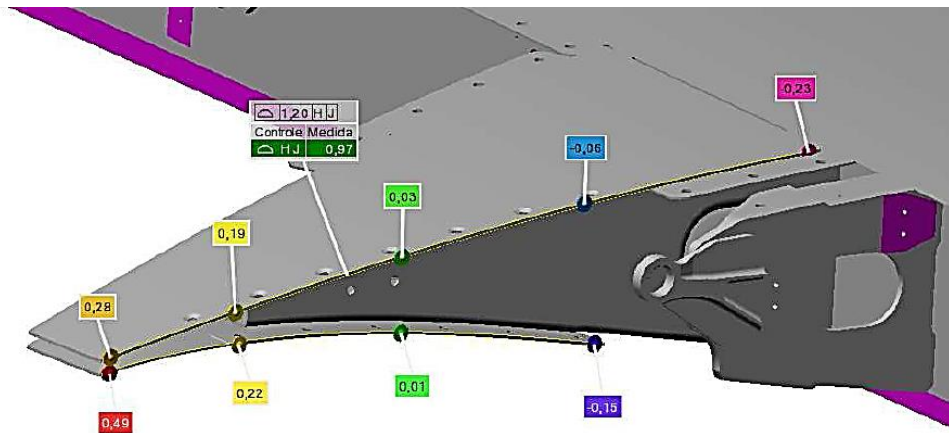


Figura 6. 57 - Resultado da medição da asa direita após adotada sequência de cravação sugerida

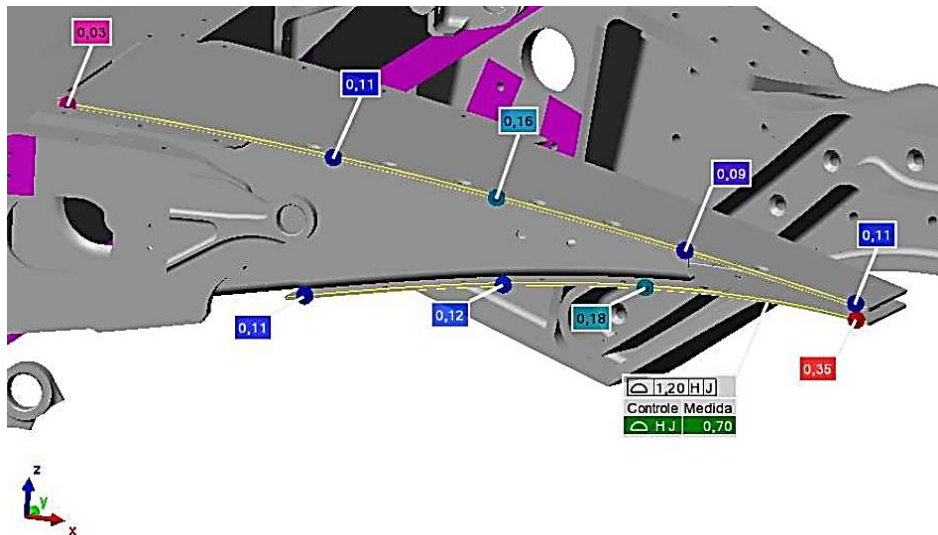


Figura 6. 58 - Resultado da medição da asa esquerda após adotada sequência de cravação sugerida

Estas 2 figuras dizem respeito às asas esquerda e direita de um dos aviões. Apresentam resultados que demonstram que a sequência de cravação utilizada tem influência no comportamento final das peças. Mesmo não estando totalmente alinhados, os revestimentos apresentam valores mais reduzidos de torção.

7-Conclusões Finais

No âmbito das conclusões finais, presentes neste último capítulo, são discutidos os resultados obtidos ao longo do estudo em causa e apresentadas as conclusões de estudo.

7.1- Discussão de resultados

As alterações realizadas ao gabarito de montagem de subconjuntos (que já existia, mas que estava sem uso) foi a primeira melhoria a ser concretizada. Graças a isso, foi possível ao longo do período de estudo, realizar 10 montagens de “Igrejinhas” nesse gabarito, tendo apenas uma sido totalmente rejeitada e sem possibilidade de retrabalho, como mostra a figura 7.1.

Tabela 7. 1 - Lista dos aviões onde foi instalada "Igrejinha" desenvolvida no gabarito subconjuntos

1ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos c/calço	10051 ESQ/DRT
2ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	85 DRT
3ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	85 ESQ
4ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	10054 DRT
5ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	90 ESQ (<i>tryout</i> de kaizen)
6ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	90 DRT
7ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	91 DRT
8ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	88 DRT
9ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	10056 DRT
10ª Montagem “Igrejinha” Vira Frangos s/calço	10056 ESQ

Como é visível na tabela acima, a “Igrejinha” do avião 85 ESQ encontra-se a vermelho, por não ter sido possível recuperá-la. A figura 7.1, apresenta os valores de medição obtidos dessa componente.

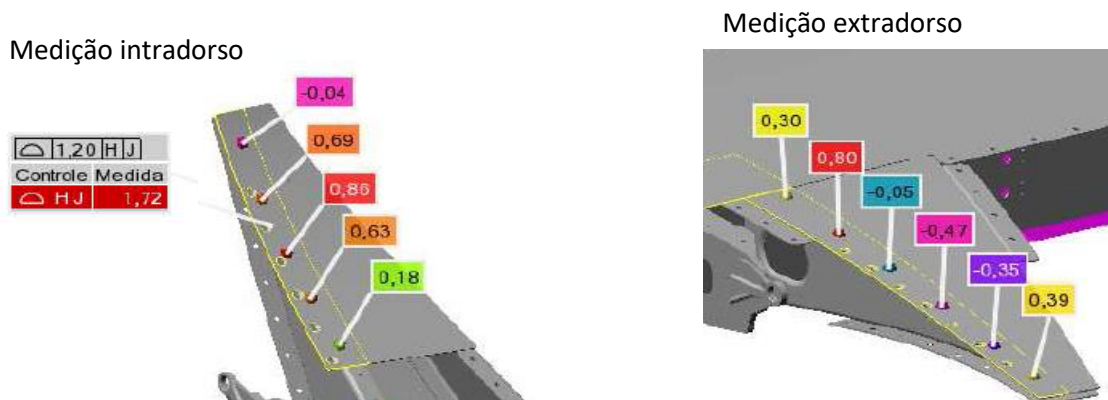


Figura 7. 1 - Resultados da “Igrejinha” que chumbou na medição tridimensional

Pelos valores negativos apresentados no revestimento extradorso seria possível recuperar os valores centrais da medição que o revestimento intradorso apresenta, 0.69, 0.86 e 0.63, através de uma subida da “Igrejinha”. Contudo, o valor de 0,80 positivo no extradorso que já se encontra fora da tolerância, ficaria ainda mais fora.

Em contrapartida, apresenta-se na figura 7.2 os resultados da ”Igrejinha” da asa direita do avião 10051, a primeira a ter a montagem realizada no gabarito já depois da sua reparação.

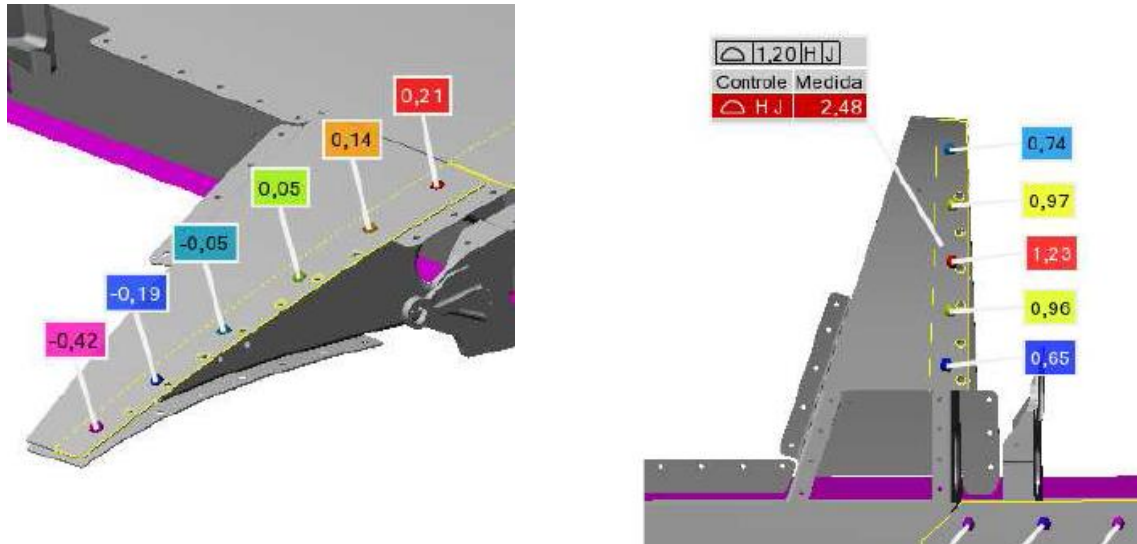


Figura 7. 2- Resultados do relatório de medição do avião 10051

À primeira vista os valores apresentados não se encontram dentro das tolerâncias, no entanto, a “Igrejinha” apresenta a forma pretendida, isto é, os valores baixos que o revestimento extradorso apresenta, dão espaço de manobra para haver um novo posicionamento e “puxá-la” para cima, de modo a diminuirmos os valores que o revestimento intradorso apresenta. Depois do retrabalho de posicionamento os resultados foram:

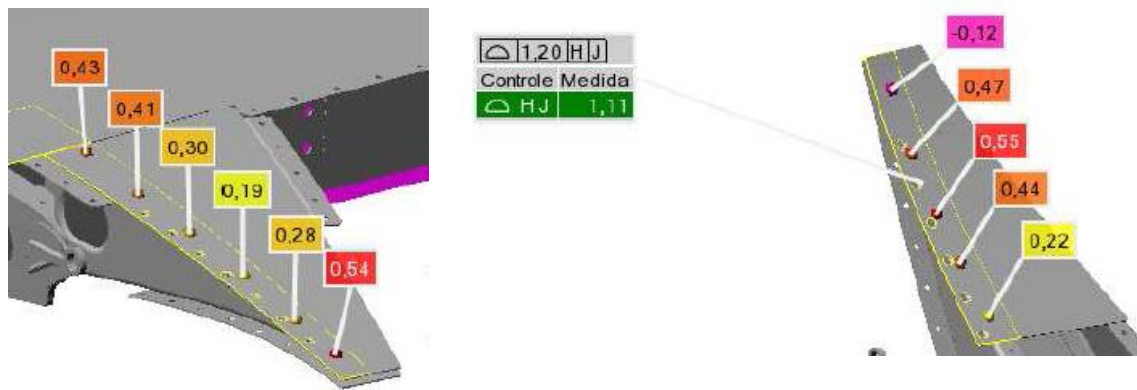


Figura 7. 3- Resultados dos relatório de medição do avião 10051 após retrabalho de posicionamento

Os resultados destas 10 montagens foram bastante esclarecedores quanto à montagem da “Igrejinha” da asa direita. No entanto, o mesmo não poderá ser afirmado quanto ao lado esquerdo. Por isso, uma das necessidades é o retrabalho do gabarito para tentar igualar os valores de medição do lado esquerdo aos valores do lado direito.

Apesar de ter havido uma “Igrejinha” impossível de recuperar, o problema identificado não pode ser relacionado somente ao gabarito, uma vez que a medição tridimensional que foi realizada às peças demonstrou, por exemplo, que 10 das 12 *ribs* medidas, não se encontravam em conformidade e estavam a vir mal de fábrica.

Comparando os valores de medição das peças estampadas com os resultados obtidos na medição das peças maquinadas, é bastante visível a elevada precisão que as peças maquinadas apresentam. Os seus desvios dimensionais são na ordem das centésimas, enquanto que nas peças estampadas os desvios são na ordem da unidade.

Em relação à remoção da “Igrejinha” após fixação dos “L’s” à *spar*, passando a sua instalação para a Complementação, foi uma proposta que foi de encontro ao que já tinha sido discutido internamente na empresa. Essa necessidade foi confirmada pelos resultados das medições feitas às *hinges*, que exibiam valores demasiado *dispares* entre o Bordo de Fuga e a Complementação. Esta medida vai permitir que o processo não retire valor ao produto.

No que diz respeito ao novo gabarito para instalação da “Igrejinha” na Complementação, há vários passos que devem ser cumpridos antes de se obter o gabarito. O primeiro deles é o desenvolvimento de uma Especificação Técnica do Ferramental (que já está em desenvolvimento) onde é apresentada a ideia do que se quer, com todas as restrições implícitas. É muito importante estar bem expressa a relação entre o eixo de rotação do LVDT e a ponta da “Igrejinha”, assim como bem definida a distância nominal entre a lateral da “Igrejinha” e a *hinge 2*. Futuramente serão analisadas as propostas dos fornecedores interessados, reuniões para melhorar a conceção do produto e por fim a aquisição do gabarito. Este novo gabarito de instalação vai permitir a eliminação do retrabalho o que implica uma redução grande de custos.

Todas estas sugestões foram bem-recebidas e validadas pela equipa de Engenharia e também pelos operadores. As mudanças que implicavam alterações aos roteiros das ordens de desenvolvimento de produto foram prontamente elaboradas e adotadas no sistema operacional da Embraer Portugal S.A., não tendo havido qualquer tipo de resistência. A redução do tempo de execução das operações, o facilitismo na montagem com o novo gabarito, demonstra a organização e motivação coerentes com os valores da empresa.

7.2- Conclusões e trabalhos futuros

O sector industrial aeronáutico em Portugal é muito prematuro e a falta de conhecimento é ainda uma realidade. Faltam profissionais, que trabalhem há 20 ou 30 anos na área e que encurtem o caminho da aprendizagem em prol do sustentável desenvolvimento da empresa.

Com base no provérbio “Dá o peixe a um homem faminto e ele alimenta-se por um dia; ensina o homem a pescar e ele alimentar-se-á a vida toda”, pode-se também ensinar o homem a colocar o anzol e o isco. É nesta ótica que o sector poderia ser melhorado.

A “Igrejinha”, apesar de ser uma peça pequena para a dimensão que a asa tem, é um componente muito importante para a aerodinâmica da mesma e tem em toda a sua conceção conhecimento fundamental no mundo da aviação: processos de furação e cravação, conhecimento de tolerâncias e a necessidade da melhoria contínua dos processos de produção (*Lean*) relacionados com este produto, exigem um dimensionamento mais minucioso. O objetivo é adicionar sempre valor ao produto.

Outra necessidade evidente proveniente da análise dimensional a que as peças vindas de fornecedor foram sujeitas, é a obrigatoriedade de os mesmos apresentarem relatórios dimensionais que validem a sua fabricação e, temporariamente, a Embraer Portugal S.A. confirmar esses relatórios realizando ela própria as medições.

Estando inserido o tema desta dissertação na melhoria contínua de processos, é importante dar continuidade à monitorização desta componente. Com a aquisição do novo gabarito será necessário continuar a acompanhar os relatórios dimensionais realizados na Complementação, trocando ideias com os responsáveis pelas medições. A utilização de ferramentas como o *brainstorming* e os projetos *kaizen* fazem parte da cultura *Lean* e como tal deve-se continuar a usá-los no futuro, quem sabe com mais frequência.

Bibliografia

- ASME Y14.5.1M-1994, Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing Principles, 1994
- Cogorno, G. R., Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design - New York: McGraw-Hill, 2006.
- Chaves, N. D., Solução em equipe. 4.ed. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 2000
- Courtois, A., Pillet, M. & Martin, C., Gestão da Produção. 4ª ed. Lisboa: Lidel - Edições Técnicas, 1997
- Duguay, C. R., Landry, S., & Pasin, F., From mass production to flexible/agile production. International Journal of Operations & Production Management, 1997
- Estrela, A., Pedagogia, Ciências da Educação. Porto: Porto Editora Lda, 1992
- Faishal, K., Impact of riveting sequence, pitch and gap between sheets on quality of riveted lap joints. Master's Degree Thesis. Wichita State University, 2006
- Falkowski, P. & Kitowski, P., The 5S methodology as a tool for improving organization of production. PhD Interdisciplinary Journal, pp. 127-133, 2013
- Fitzgerald, T., Residual stresses in and around rivets clad aluminum alloy plates, 1994.
- Ghicajanu, M., Romanian Companies Dilemmas - Business Reengineering or Kaizen. Annals of University of Petrosani Economics, 11(1), pp. 97-104, (2011).
- Gupta, S. & Jain, S. K., A literature review of lean manufacturing. International Journal of Management Science and Engineering Management, 8(4), pp. 241-249, 2013
- Holweg, M., The genealogy of lean production. Journal of Operations Management, 25(2), 420-437, 2007
- Jacob, F., Chase, R. & Aquilano, N.: Operations & Supply Management. McGraw-Hill/Irwin; 12º ed., 2009.
- Krisztina, D., Attila, C., & Zsolt, M., Labour productivity change: Drivers, business impact and macroeconomic moderators, International journal of production economics 131: (1 / Special Issue, 2011.
- Krulikowski, A., Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing. 2nd ed. USA: Delmar Publishers, 1997.
- Larman, C. & Vodde, B., Lean Primer. Version 1.5, 2009.

- Liker, J., “The Toyota Way :14 Management Principles from the World’s Greatest Manufacturer”, 1st edition. McGraw- Hill, New York, USA., 2004.
- Lindgren, P., Implementação do sistema de manufatura enxuta (lean manufacturing) na Embraer, 2001
- Miranda, R., Embraer: Tolerância Geométrica. São José dos Campos: Palestra interna 2001
- Muller, R., An Experimental and Analytical Investigation on The Fatigue Behavior of Fuselage Riveted Lap Joints. Doctor Degree Thesis. Delft University, 1995.
- Navas, H. TRIZ- Uma Metodologia para Resolução de Problemas. In: Guia de Empresas Certificadas, Ed. 2013, p. 28-32, 2013.
- Navas, H., Brainstorming - Gerador de Ideias Criativas. Inovação e Empreendedorismo, vol. 78, pp. 4, 2016.
- Negroni, D.Y., Deformação induzida pelo processo de rebitagem. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP: ITA, 73p, 2006.
- Neumann, B., Calmon, A. & Aguiar, M., Aplicação do ISA e Diagrama de Pareto como Ferramentas de Gestão de Loteamentos. Latin American Journal of Business Management, vol. 4, pp. 44-65. Junho 2013. 87, 2013.
- Oxborn, A., Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Problem-Solving New York: Charles Scribner's Sons, 1953.
- Piechnicki, A., Proposta de um Método de Análise e Solução de Perdas. XI Simpósio de excelência em gestão e tecnologia, Brasil: Rio Janeiro. 22-24 outubro 2014.
- Pinto, J., Pensamento Lean - A filosofia das organizações vencedores. Lidel, 2009.
- Schijve, J., Some considerations on the correlation between rivet squeezing force and the dimensions of the driven rivet head. Memorandum M-837. Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Mar. 1998.
- Singh, J. & Singh, H., Kaizen Philosophy: A Review of Literature. The Icfai University Journal of Operations Management, VIII (2), pp. 51-72. 2009.
- Strafacci, G., GD&T: Porquê? São Paulo. Setec, 2010.
- Suzuki, K., New Manufacturing Challenge: Techniques for Continuous Improvement. USA - New York: New York Free Press, 1987.
- Suzuki, K., Gestão de operações Lean: Metodologias Kaizen para a Melhoria Continua. USA - New York: LeanOp Press, 2010.

- Szolwinski, M. P., Farris, T. N. Linking riveting process parameters to the fatigue performance of riveted aircraft structures. *Journal of aircraft*. v. 37, n. 1, p. 130-137, 2000.
- Wandeck, M., *Análise funcional e metrologia dos princípios de Taylor e da independência na especificação internacional de metrologia*, 2008.
- Wandeck, M., *GD&T on Line*. GD&T Engenharia Ltda. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- Weigel, A. L., *A Book Review: Lean Thinking by Womack and Jones*. 1ª ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- Wilson, L., *How to Implement Lean Manufacturing*. 1ª ed. Estados Unidos da América: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2010.
- Womack, J. P., & Jones, D. T., *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth In Your Corporation* (2003 ed.). New York: Free Press, 1996.
- Womack, J. & Jones, D., *Lean Thinking*. 2ª ed. Nova Iorque: Free Press, 2003.
- Zhengping Chang et al., *Thin-walled sheet metal parts riveting deformation*, Volume 36 Number 3, 2016

Anexos

Anexo A – Linha de Montagem

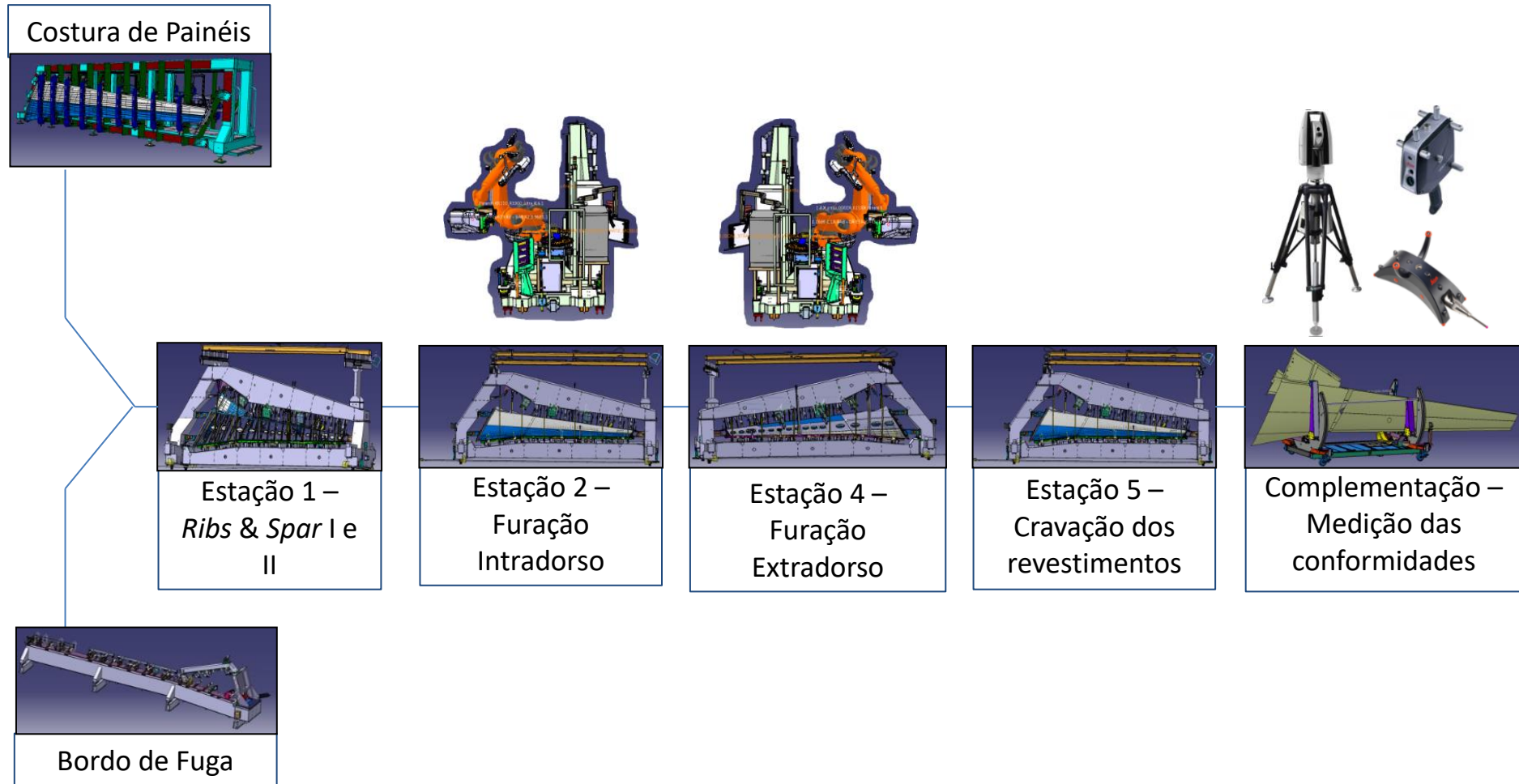
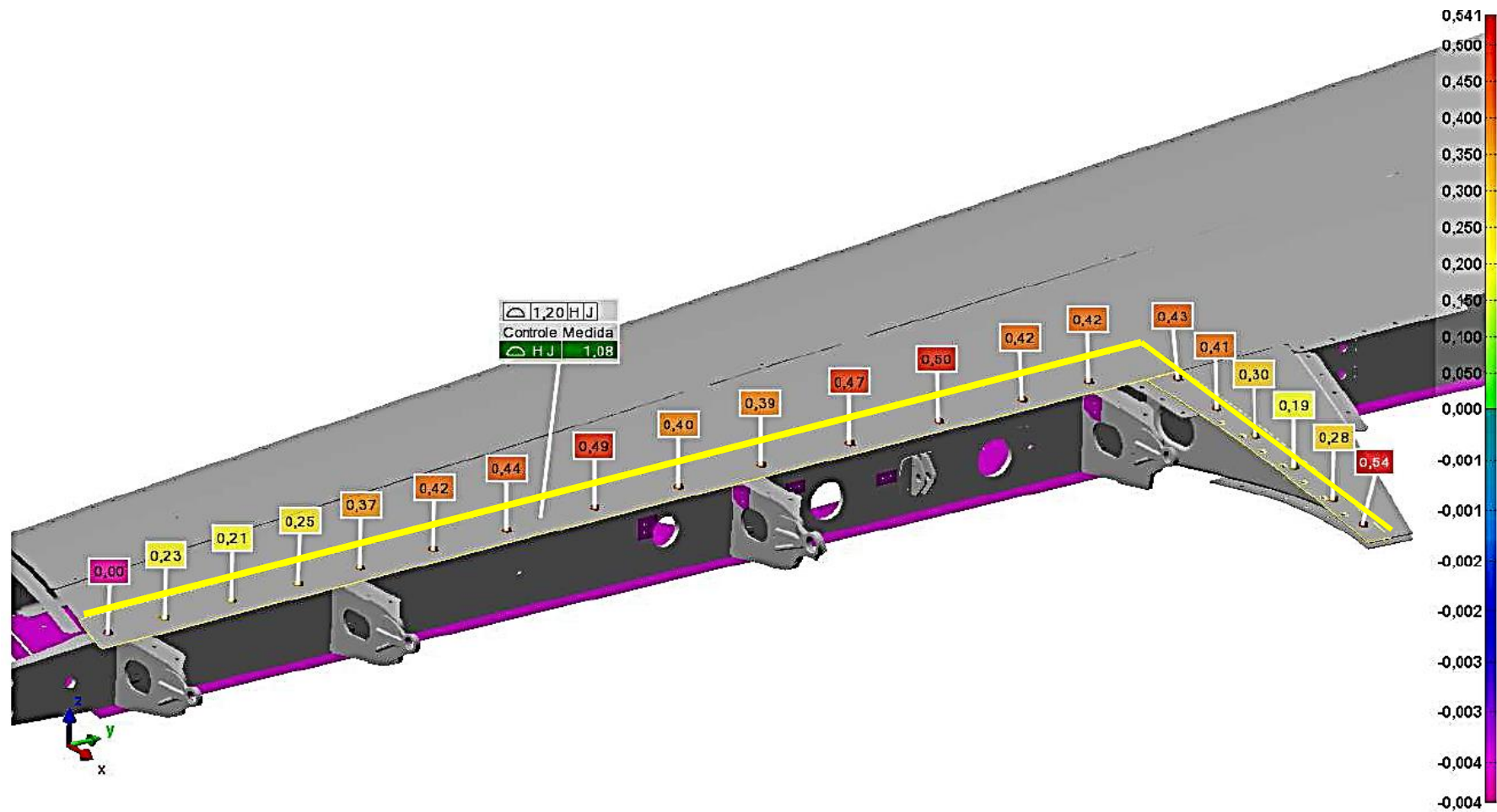
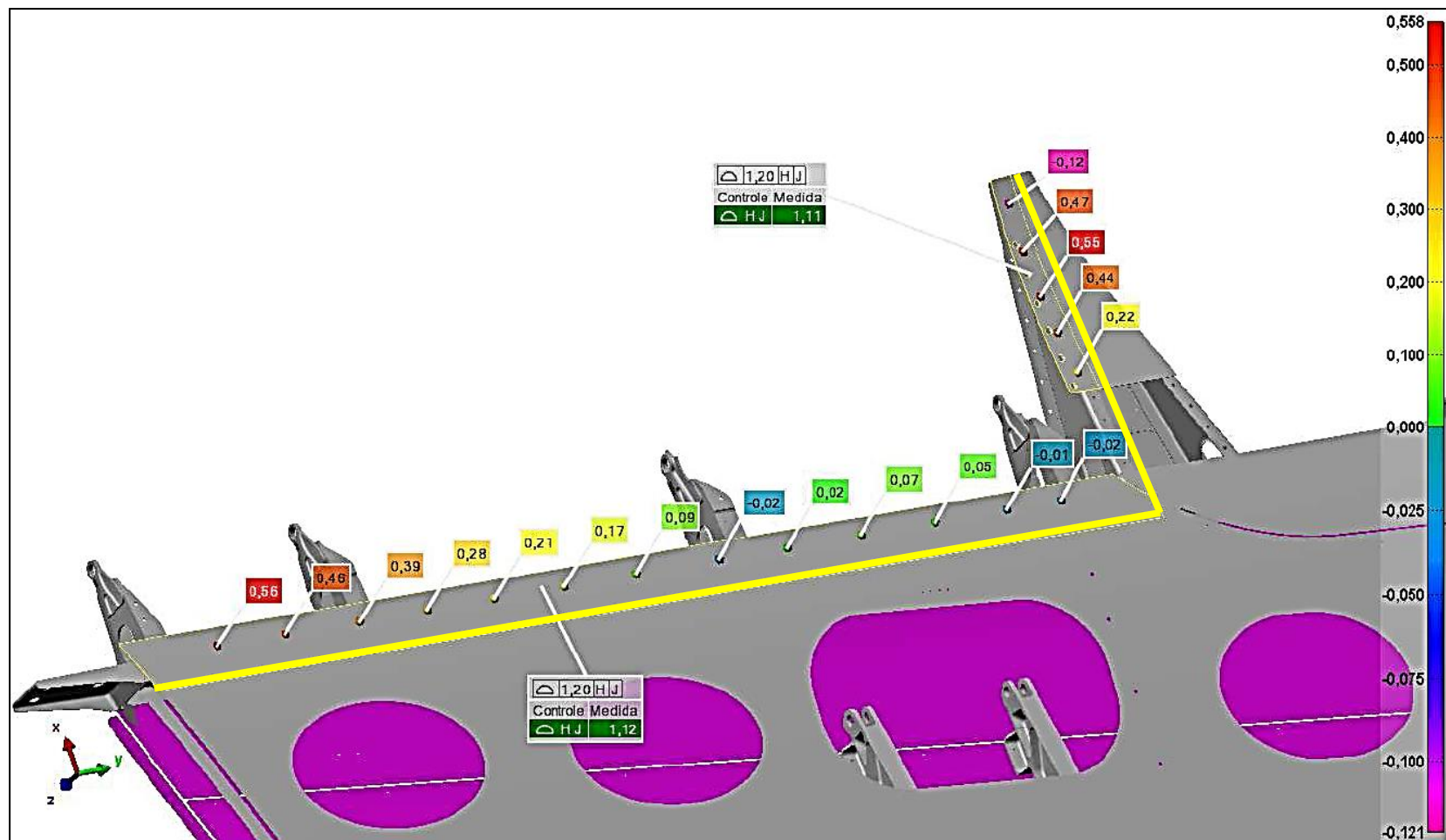


Figura A. 1 - Linha de montagem da asa de uma aeronave

Anexo B – Medição local do revestimento extradorso



Anexo C – Medição local do revestimento intradorso



Anexo D – Exemplo do layout do Inquérito


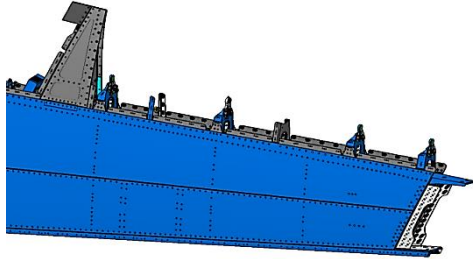
		<p>Categorias:</p> <p>Pr – Processo M – montagem P – Posicionamento D- Dimensionamento G – Geral E - Engenharia</p>
<p>Indicar os 3 maiores problemas relacionados com a componente</p>	<p>“Igrejinha” (Vanda – Programadora)</p>	
<p>1</p>		
<p>2</p>		
<p>3</p>		

Figura A.4 - Layout do inquérito realizado aos trabalhadores

Anexo E – Relatório de medição tridimensional de uma Rib

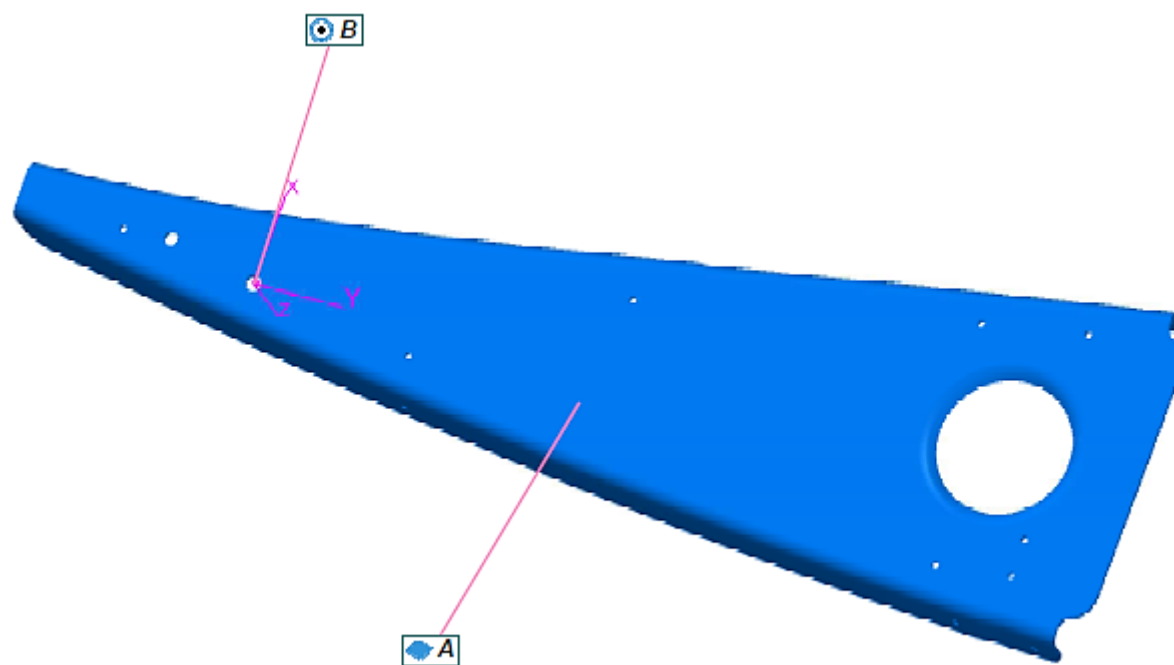




Figura A.5 - Datums definidos para medição tridimensional da Rib

DATUM C			
	0.500	A	B
	Tol-	Tol+	Desvio
		0.500	0.998
Max	-0.250	0.250	0.499
Min	-0.250	0.250	0.193

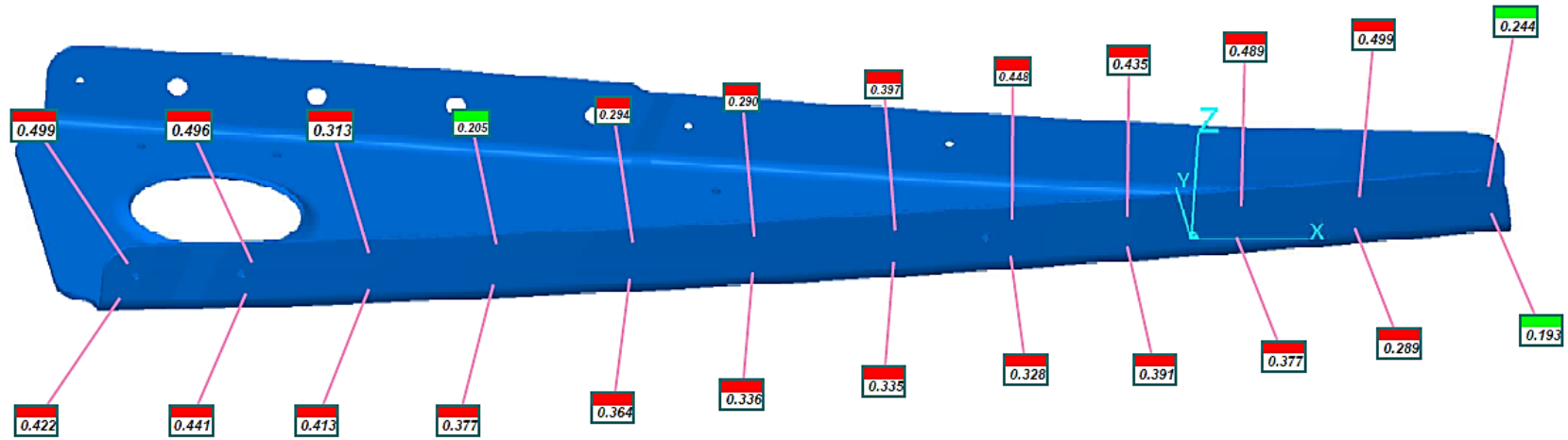


Figura A.6 - Resultados de medição tridimensional da aba extradorso

TOL. $\pm 0,3\text{mm}$ |A|B|C|

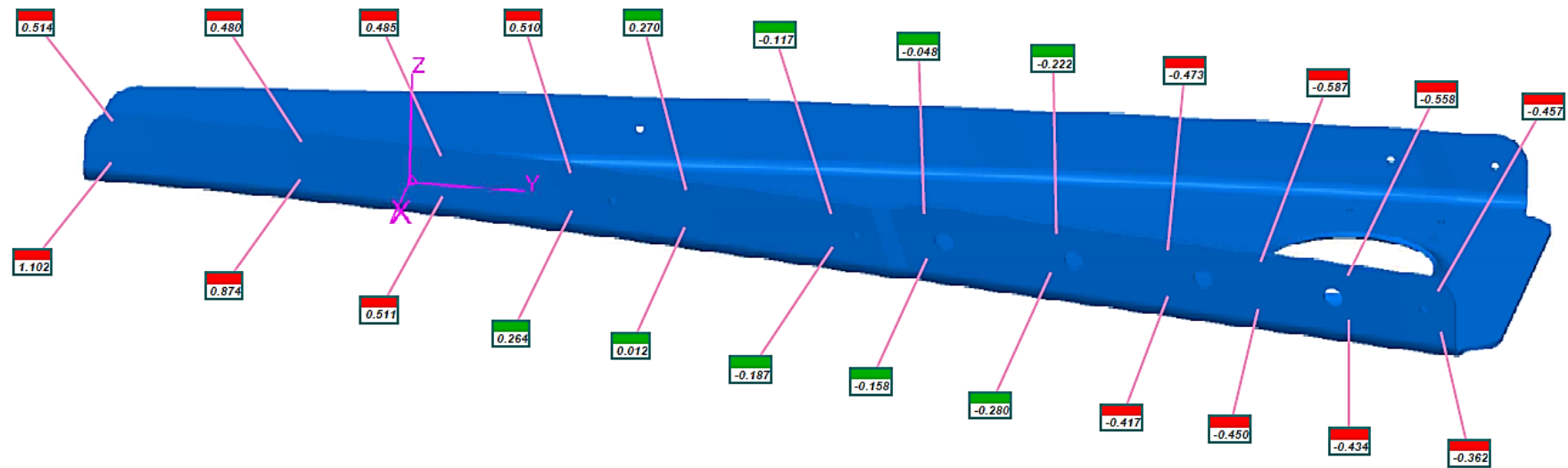
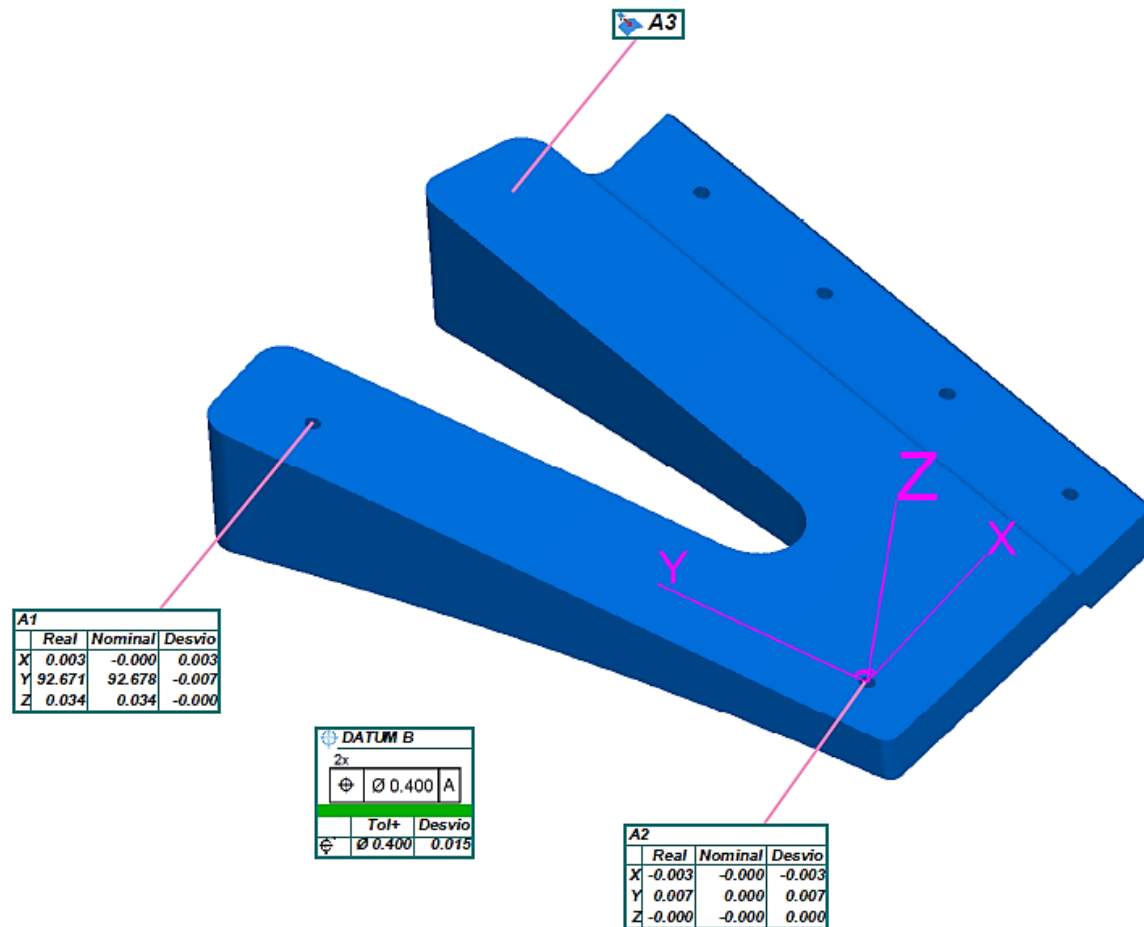


Figura A.7 - Resultados de medição tridimensional da aba intradorso

Anexo F – Relatório de medição tridimensional de um Selo



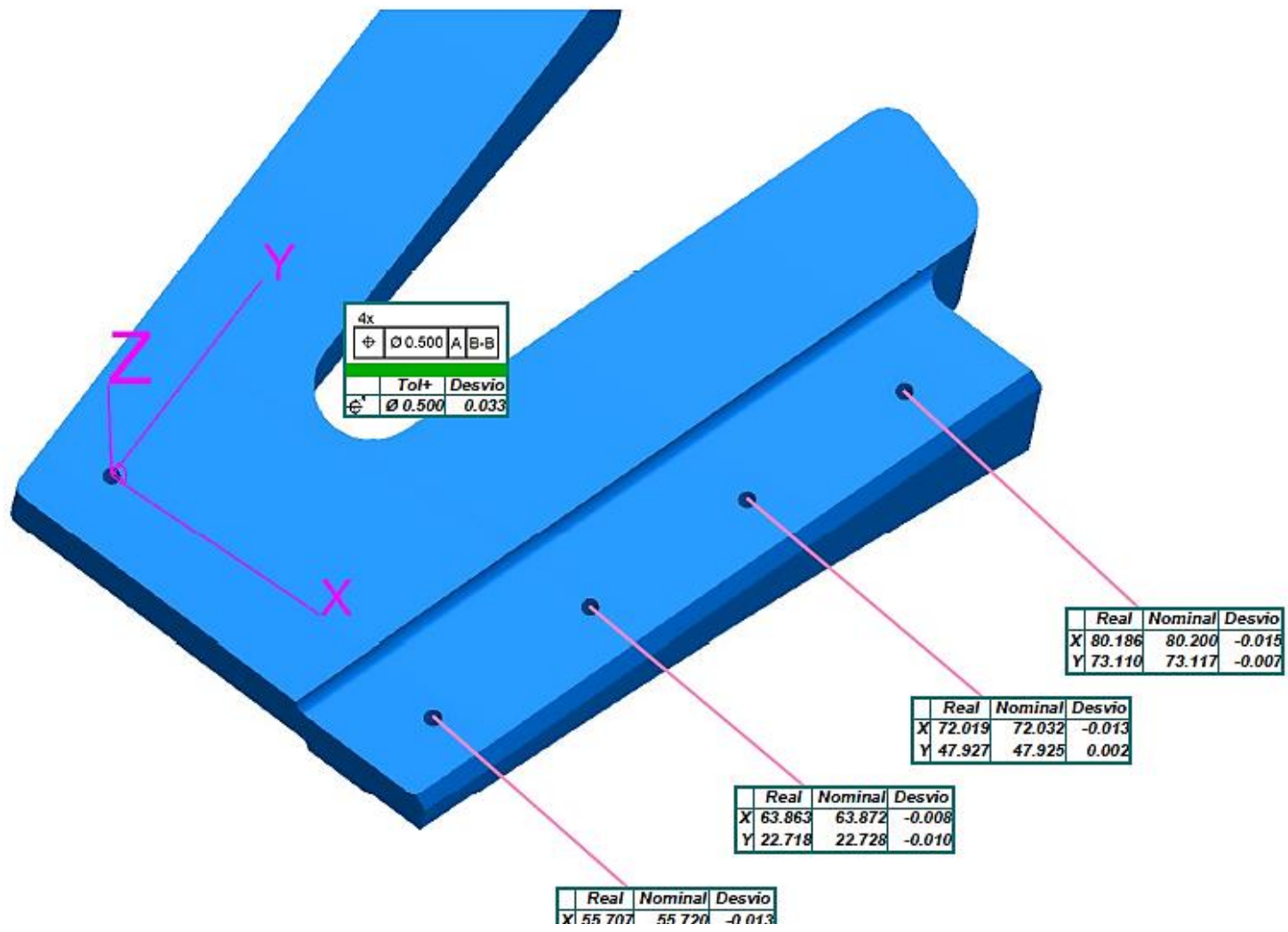


Figura A.9 - Resultados de medição tridimensional do extradorso do

	Tol-	Tol+	Desvio
$\overline{\Delta}$	0.500	0.500	0.039
Máx	-0.250	0.250	0.019
Mín	-0.250	0.250	-0.004

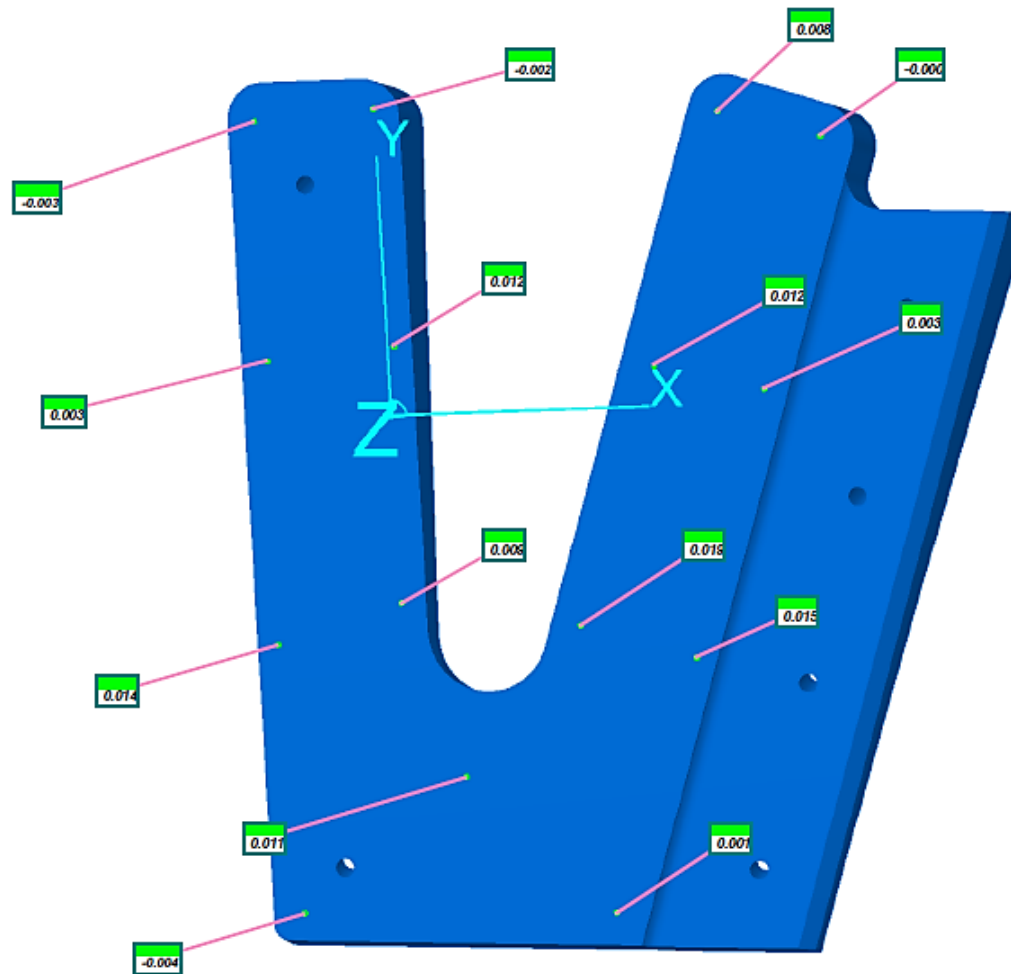


Figura A.10 - Resultados de medição tridimensional do intradorso do Selo

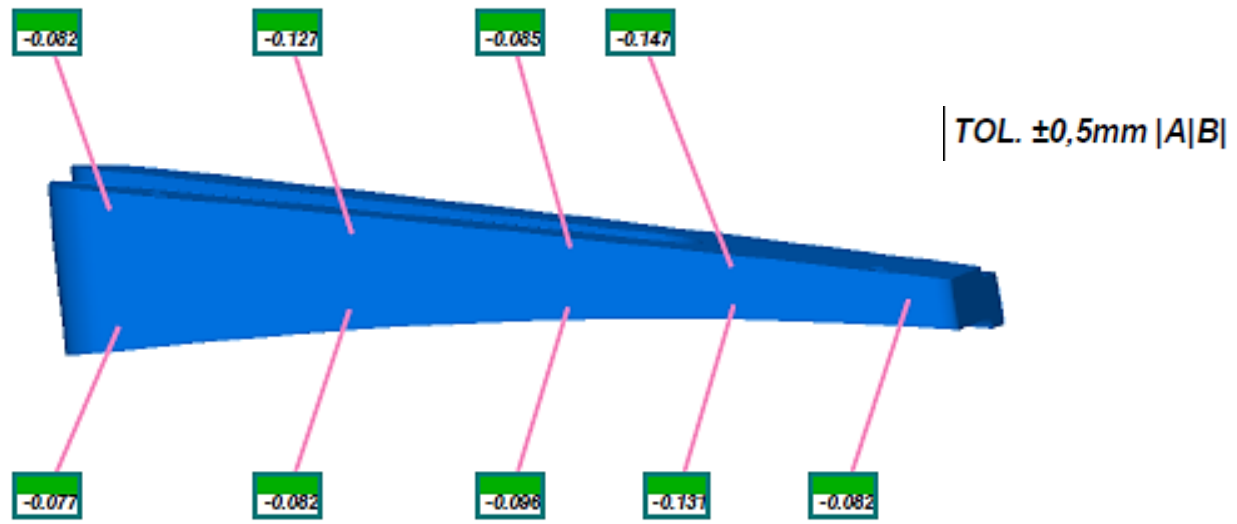


Figura A.11 - Resultados de medição tridimensional de uma lateral do Selo

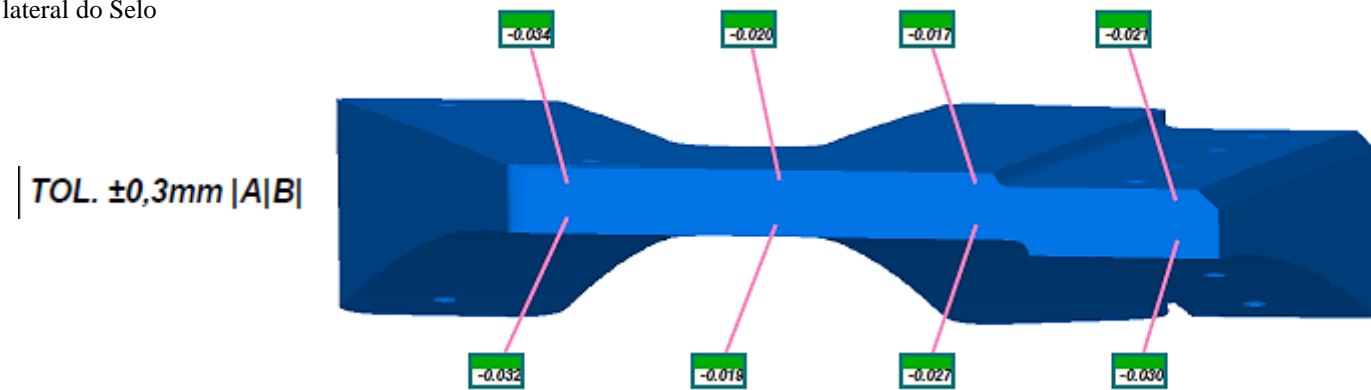
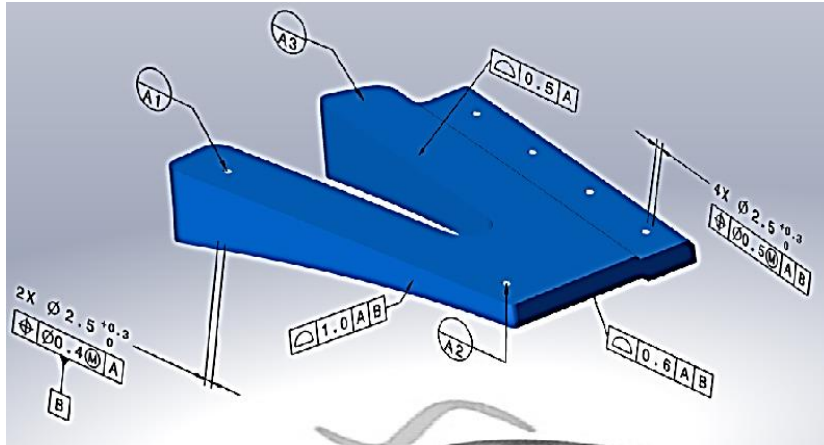


Figura A.12 --Resultados de medição tridimensional da ponta do Selo

Anexo G – Exemplo das alterações sugeridas

WAS 550-02750-003



IS 550-02750-005

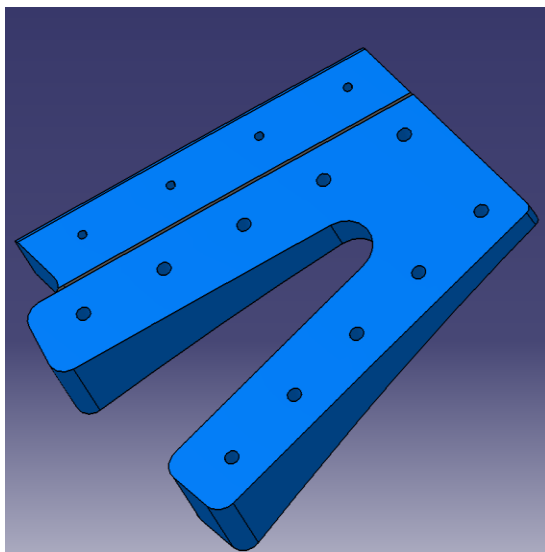


Figura A.13 - Proposta para adicionar pré-furos na Selo