

RENATA DE ALMEIDA MAGNER PEREIRA

**Metodologia para validação de projetos de dispositivos de fixação no processo de
montagem mecânica de peças aeronáuticas**

Guaratinguetá - SP
2018

Renata de Almeida Magner Pereira

Metodologia para validação de projetos de dispositivos de fixação no processo de montagem mecânica de peças aeronáuticas

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em (**Engenharia Mecânica**).

Orientador (a): Prof Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá - SP
2018

A447m Almeida, Renata de
Metodologia para validação de projetos de dispositivos de fixação no processo de montagem mecânica de peças aeronáuticas /Renata de almeida – Guaratinguetá, 2018
67 f : il.
Bibliografia: f. 67

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

1. Fixadores externos. 2. Vedação (Tecnologia). 3. Aeronaves. I. Título.

CDU 62.001.63

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

RENATA DE ALMEIDA MAGNER PEREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Walter Luiz M. Tupinambá
UNESP-FEG

Prof. Everton Coelho de Medeiros
UNESP-FEG

Dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

O caminho entre o ingresso na universidade e a apresentação do presente trabalho foi longo e, durante essa trajetória, foi necessário ultrapassar vários obstáculos e enfrentar diversas dificuldades. Várias pessoas me ajudaram a chegar até o presente momento e gostaria de agradecê-las por fazerem parte dessa conquista.

Gostaria de agradecer a minha vó Odette que me ensinou valores e princípios que permeiam a minha vida e minhas escolhas diárias. Sigo com seus ensinamentos dentro do meu coração, seu amor e carinho foram essenciais na minha vida e sem o seu apoio não seria possível chegar onde eu estou hoje.

Ao meu irmão, Renan de Almeida Magner Pereira que sempre foi o meu mentor, o meu maior companheiro e amigo. Muito obrigada, por estar comigo e me apoiar em todos os momentos difíceis. Sem a amizade e amor do meu irmão todas as conquistas da minha vida não fariam o mesmo sentido

A minha mãe Sônia Almeida que sempre apoiou o estudo e o esforço. Obrigada por ter se sacrificado para dar oportunidade de eu chegar até aqui.

Aos meus Padrinhos Adriana Faria e Laércio Alvares que foram muito importantes durante minha infância e que me orientaram em muita das vezes que eu não sabia qual caminho escolher.

Ao André Victor Figueredo que esteve ao meu lado desde o sonho de entrar na faculdade e me apoiou durante todos esses anos, enfrentando e vencendo as dificuldades ao meu lado. Muito obrigada pelo seu amor e sua compreensão durante esses anos de universidade. Você faz parte dessa vitória e, assim como esse momento, iremos projetar, construir e alcançar juntos os próximos desafios de nossas vidas. Eu te amo.

Aos amigos da Faculdade Fabio Mathias, Paloma Rios, Albano Ivo Barros, Matheus Santos, Victoria Ruzenne, Rodrigo Verginelli, Luis Antonio Arruda Batista, Leonardo Graciano muito obrigada pela amizade durante todos esses anos. Vocês estão presentes nas minhas lembranças dessa caminhada.

A república tomara que caia em especial a Barbara Benatti que me apresentou a essa república que se tornou a minha segunda família. Fui muito feliz durante esses anos de faculdade vivendo ao lado de vocês.

A Liebherr Aerospace Brasil que me deu a oportunidade de desenvolver esse estudo.

Ao Professor Doutor Marcelo Sampaio que além de um excelente professor me orientou nesse estudo e me ajudou para que esse trabalho se concretizasse.

RESUMO

Blocos de válvulas são produtos que fazem parte do sistema de voo de aeronaves. Esse tipo de peças possui diversos canais de passagem de fluidos que fazem parte do controle e funcionamento do sistema. Durante o processo de fabricação desses produtos, é necessária a abertura de furos que possibilitem o acesso da ferramenta que irá realizar a usinagem dos canais. Após o processo de usinagem, é necessário realizar a vedação desses furos para que a passagem do fluido funcione conforme projetado. O componente utilizado para realizar essa vedação é denominado LEE PLUGS. O processo de montagem desse tipo de componente contém alguns requisitos de qualidade que necessitam ser assegurados para evitar vazamentos e garantir o correto funcionamento do sistema da aeronave. A montagem desse componente é realizada por interferência e faz-se necessário garantir um robusto sistema de fixação para que a peça permaneça estática durante o processo de montagem. Dessa maneira, os desenvolvimentos dos dispositivos de fixação são de extrema importância para assegurar a qualidade do produto. Esse trabalho desenvolve uma metodologia para validação do projeto de dispositivos de fixação de peças aeronáuticas para o processo de montagem de Lee Plug. O estudo foi desenvolvido através da simulação numérica no software Creo 3.0 e tem como objetivo simular as condições de montagem e avaliar o comportamento da peça durante a montagem a fim de verificar se os modos de fixação escolhidos são suficientes para assegurar a estabilidade da peça e qualidade do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Numérica. CREO 3.0. Montagem de plugs de vedação. Projeto de dispositivos de fixação.

ABSTRACT

Valve blocks are products that are part of the aircraft flight system. This type of parts has several channels that make the fluid passage which are part of the control and operation of the system. During the manufacturing process of these products, it is necessary to open bores that allow the access of the tool that will perform the machining of the channels. After the machining process, it is necessary to seal these holes in order to ensure that the passage of the fluid works as designed. The component used to make this seal is called LEE PLUGS. The assembly process of this type of component contains some quality requirements that need to be ensured to avoid leaks and ensure the correct operation of the aircraft system. The assembly of this component is performed by interference and it is necessary to ensure a robust fastening system to the part can keep static during the assembly process. In this way, the developments of fastening devices essential to ensure the quality of the product. This work develops a methodology to validate the design of aircraft parts fixtures for the assembly process of Lee Plug. The study was developed through numerical simulation in the software Creo 3.0 and aims simulate the assembly conditions and evaluate the behavior of the part during assembly in order to verify if the modes of fixation are sufficient to ensure the stability of the part and quality the process as well.

KEYWORDS: Simulation. CAE. CREO 3.0. Assembly of sealing plugs. Design of fastening devices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Demonstração de Montagem	13
Figura 2.....	17
Figura 3 - Corpo em equilíbrio submetido a forças.....	18
Figura 4 - Cargas Resultantes Internas	18
Figura 5 - Corpos submetido a tração pura.....	19
Figura 6 - Corpo submetido a cisalhamento puro.....	20
Figura 7 - Corpo submetido a torção	20
Figura 8 - Corpo submetido a torção (Representação vetores conjugados)	21
Figura 9.....	21
Figura 10.....	21
Figura 11 - Corpo de prova para ensaio de Tração.....	22
Figura 12 - Diagrama tensão deformação obtido através do ensaio de tração em material dúctil	23
Figura 13 - Diagrama tensão deformação obtido através do ensaio de tração em material frágil	24
Figura 14 - Diagrama Tensão deformação	24
Figura 15 – Etapas do Desenvolvimento de Produto	26
Figura 16 - Introdução do CAE no desenvolvimento do produto	27
Figura 17 - Validação do Projeto através da ferramenta CAE	27
Figura 18 - Lee Plug	31
Figura 19 - Exemplo de canais que recebem a montagem de Lee Plugs.....	32
Figura 20 - Furo de Instalação	34
Figura 21 - Representação do Pino e Plug.....	34
Figura 22 - Espessura da parede do alojamento	35
Figura 23 - Proporções D/d recomendadas para materiais diferentes	36
Figura 24 - O efeito das proporções D/d nas pressões de teste e as tensões dos plugs e do material com propriedades mecânicas semelhantes	37
Figura 25 - Furo de Instalação	38
Figura 26 - Batimento do Furo de Instalação	39
Figura 27 - MÉTODO DE INSTALAÇÃO	42
Figura 28 - Montagem conforme requisito de qualidade	43
Figura 29 - Montagem não Conforme	44
Figura 30 - Método de Extração de Plugs	45
Figura 31 - Sequência de Fabricação de blocos de válvulas	46
Figura 32 - Conjunto de Montagem	49
Figura 33 - Configuração do carregamento	50
Figura 34 - Configuração dos graus de liberdade.....	51
Figura 35 - Configuração da Simulação	52
Figura 36 - Resultados da Simulação (Magnitude)	53
Figura 37 - Configuração da Simulação	53
Figura 38 - Resultados da simulação (eixo z).....	54
Figura 39 - Menu de configuração	54
Figura 40 - Deformação.....	55
Figura 41 - Representação do deslocamento observado durante a montagem	56
Figura 42 - Modificações no Dispositivo atual	57
Figura 43 - Modificações no dispositivo atual	57
Figura 44 - Seleção dos Graus de Liberdade.....	58
Figura 45 - Configuração da Simulação	59
Figura 46 - Resultado da Simulação (Magnitude).....	60

Figura 47 - Configuração da Simulação	60
Figura 48 - Resultado da Simulação (eixo Z).....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais de Alta Resistência ao SCC	40
Tabela 2 - Forças de Instalação para Lee Plugs.....	48
Tabela 3 - Comparação dos deslocamentos.....	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	OBJETIVOS	13
1.2.	JUSTIFICATIVAS	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS DE PROJETOS DE DISPOSITIVOS	14
2.2.	ESTÁTICA	16
2.2.1.	Equações de equilíbrio.....	17
2.2.2.	Cargas resultantes internas.....	18
2.3.	ANÁLISE DOS MATERIAIS	22
2.3.1.	Resistência dos Materiais	22
2.3.2.	Dureza	25
2.4.	FERRAMENTAS DE PROJETOS E RECURSOS NUMÉRICOS	26
2.5.	CREO	28
2.6.	TÓPICOS GERAIS DE MONTAGEM DE PEÇAS AERONÁUTICAS.....	28
2.6.1.	Classificação das peças	28
2.6.2.	Identificação	29
2.6.3.	Limpeza na área de trabalho	29
2.6.4.	Inspeção dimensional.....	29
2.6.5.	Limpeza.....	30
2.6.6.	Gravação	30
3.	METODOLOGIA	31
3.1.	O PRINCÍPIO DO LEE PLUG.....	31
3.1.1.	Pressão de testes	33
3.1.2.	Limites de temperatura	33
3.1.3.	Acabamento superficial	33
3.1.4.	Tratamento superficial nos furos de instalação	33
3.1.5.	Profundidade do furo	33
3.1.6.	Seleção da classe adequada de montagem	35
3.1.7.	Tamanho do material	35
3.1.8.	Chanfro do furo de alojamento	38
3.1.9.	Espessura da alma.....	38
3.1.10.	Cilindricidade.....	38
3.1.11.	Alongamento do material do alojamento.....	39
3.1.12.	Fragilização por corrosão sob tensão (stress corrosion cracking – scc).....	40
3.1.13.	Procedimento de instalação.....	41
3.1.14.	Procedimento de extração	45
3.2.	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS AERONÁUTICAS	46
3.3.	PROJETO DE DISPOSITIVOS DE FIXAÇÃO PARA PEÇAS COM MONTAGEM DE LEE PLUGS	46
3.4.	ESTUDO DE CASO.....	48
3.4.1.	Padronização das forças de montagem.....	48
3.4.2.	Modelagem do produto e dispositivo de fixação	49
4.	SIMULAÇÃO.....	50
4.1.	PARAMETRIZAÇÃO DAS FORÇAS	50
4.2.	ESTADO ATUAL	51
4.2.1.	Definição dos graus de liberdade.....	51
4.2.2.	Simulação dos esforços	52

4.3.	MODIFICAÇÕES NO DISPOSITIVO	56
4.3.1.	Definição dos graus de liberdade	58
4.3.2.	Simulação dos esforços	58
5.	DISCUSSÕES	62
6.	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

Durante a manufatura de peças aeronáuticas a montagem mecânica é uma das tecnologias críticas no desenvolvimento e concepção de um novo projeto, pois, de forma geral, as peças apresentam geometrias complexas e se faz necessário o projeto de dispositivos que realizem a fixação desses produtos para assegurar a correta montagem e garantir a qualidade das peças.

No processo de montagem mecânica de peças aeronáuticas existem diversos componentes que estão inseridos e fazem parte de sistemas de controle de voo em geral. Nesse trabalho será abordada a montagem dos denominados plugs LEE os quais possuem uma grande relevância na concepção de um novo produto e projeto de manufatura, pois, a maioria das peças que fazem parte de sistemas hidráulicos de aeronaves possui essa categoria de montagem e com uma quantidade relevante de componentes que são montados por peça.

Dessa maneira, desde a concepção do processo de fabricação até a entrega do produto para o cliente é de extrema importância que essa etapa seja bem desenvolvida para que o lead time bem como a qualidade do produto atendam aos requisitos e garantam a montagem do conjunto final na aeronave dentro do prazo estipulado.

O presente trabalho consiste em modelar numericamente o produto e o dispositivo de fixação durante a fase de projeto para que seja possível simular as condições de montagem e prever potenciais problemas relacionados ao modo de fixação do produto.

Para a realização dessa proposta, foi escolhido um projeto piloto de uma peça cujo projeto do dispositivo já foi concebido e está em uso, para que dessa forma, seja possível comparar os resultados encontrados na simulação numérica com o comportamento real encontrado durante a montagem das peças. A figura 1 mostra a montagem de um dos plugs LEE do produto escolhido como piloto para o presente estudo



Fonte: Autoria Própria

1.1. OBJETIVOS

Desenvolver uma metodologia de validação de dispositivos de fixação para a montagem mecânica de peças do setor aeronáutico. Simular as condições de montagem através de um software CAD e avaliar o comportamento da peça durante a montagem a fim de verificar se os modos de fixação escolhidos são suficientes para assegurar a estabilidade da peça e qualidade do processo

1.2. JUSTIFICATIVAS

Atualmente a validação dos projetos de dispositivos é realizada apenas com base na experiência do processista e testados somente durante a montagem das peças. Dessa maneira, quando um o dispositivo proporciona a peça um grau de liberdade não previsto na concepção do projeto como, por exemplo, movimentos de flexão e torção, coloca em risco a qualidade das peças e acarreta em diversos retrabalhos do dispositivo, atraso na entrega das peças.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS DE PROJETOS DE DISPOSITIVOS

Segundo Juvinal (2008) muitos dos projetos de engenharia envolvem múltiplas considerações, e é um desafio reconhecer todas elas na proporção adequada. As considerações clássicas para a caracterização do corpo de um componente incluem: (a) resistência, (b) deslocamento, (c) peso e (d) dimensão e forma.

Conforme Shigley (2005) o produto projetado deve ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável. Cada um desses termos será explicado a seguir:

- **Funcional:** O produto deve apresentar um desempenho que atenda às necessidades e expectativas do consumidor.
- **Seguro:** O produto não deve oferecer perigo ao usuário, a circunstâncias ou a propriedades vizinhas. Perigos que não podem ser "evitados por projeto" devem se valer de anteparos (envoltórios protetores); se isso não for possível, informações apropriadas ou avisos devem ser fornecidos.
- **Confiável:** Confiabilidade é a probabilidade condicional, a um determinado nível de confiança, de que o produto irá desempenhar sua função proposta satisfatoriamente, ou sem falhar a uma determinada idade.
- **Competitivo:** O produto deve ser um forte competidor em seu mercado. [®] Utilizável. O produto deve ser "amigável ao usuário", acomodando-se a especificações como tamanho, resistência, postura, alcance, força, potência e controle humanos.
- **Manufaturável:** O produto deve ser reduzido a um número "mínimo" de componentes, adequados à produção em massa, com dimensões, distorção e resistência sob controle.
- **Mercável:** O produto pode ser comprado, e serviços de assistência técnica devem estar disponíveis.

Quando se utiliza a expressão consideração de projeto, estamos nos referindo a alguma característica que influencia o projeto do elemento ou, talvez, o sistema inteiro. Abaixo alguns fatores relevantes para concepção de um projeto (Shigley 2005):

- Funcionalidade
- Resistência/tensão
- Distorção/deflexão/rigidez
- Desgaste
- Corrosão
- Segurança
- Confiabilidade
- Barulho
- Estilo
- Forma
- Tamanho
- Controle
- Propriedades térmicas
- Superfície
- Fabricabilidade
- Lubrificação
- Utilidade
- Mercantilidade
- Custo
- Manutenção
- Fricção
- Volume
- Peso
- Responsabilidade
- Vida
- Refabricação/recuperação de recursos

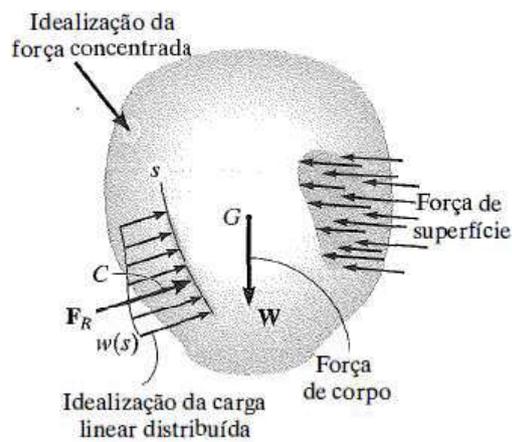
2.2. ESTÁTICA

A resistência dos materiais é um ramo da mecânica que estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo. Esse assunto também envolve o cálculo das deformações do corpo e proporciona o estudo de sua estabilidade quando sujeito a forças externas (Hibbeler 2009).

No projeto de uma estrutura ou máquina, em primeiro lugar, é necessário usar os princípios da estática para determinar as forças que agem sobre os vários elementos, bem como no seu interior. O tamanho dos elementos, sua deflexão e estabilidade dependem não só das cargas internas, mas também do tipo de material de que são feitos. Por consequência, a determinação precisa e a compreensão fundamental do comportamento do material serão de vital importância para o desenvolvimento das equações necessárias usadas na resistência dos materiais.

- Cargas externas: Um corpo pode ser submetido a vários tipos de cargas externas, todavia, qualquer uma delas pode ser classificada como uma força de superfície ou uma força de corpo (Figura 2)
- Forças de Superfície: São causadas pelo contato direto de um corpo com a superfície de outro. Essas forças estão distribuídas pela área de contato entre os corpos. Se essa área for pequena em comparação com a área da superfície total do corpo a força de superfície pode ser idealizada como uma única força concentrada, aplicada a um ponto do corpo. Se a carga de superfície for aplicada ao longo de uma área estreita, ela pode ser idealizada como uma carga distribuída linear, $w(s)$. Neste caso, a carga é medida como se tivesse uma intensidade de força/comprimento ao longo da área, e é representada graficamente por uma série de setas ao longo da linha s . A força resultante $F(R)$ de $w(s)$ é equivalente à área sob a curva da carga distribuída, e essa resultante age no centroide C ou centro geométrico dessa área.
- Força de Corpo: A força de corpo é desenvolvida quando um corpo exerce uma força sobre outro, sem contato físico direto entre eles como, por exemplo, os efeitos causados pela gravitação da Terra ou seu campo eletromagnético.

Figura 2 – Representação das forças



Fonte Hibbeler (2009)

- Reações do apoio: As forças de superfície que se desenvolvem nos apoios ou pontos de contato entre corpos são denominadas reações.

2.2.1. Equações de equilíbrio.

De acordo com Hibbeler (2009) o equilíbrio de um corpo exige um equilíbrio de forças, para impedir a translação ou um movimento acelerado do corpo ao longo de uma trajetória reta ou curva, e um equilíbrio de momentos, para impedir que o corpo gire. Essas condições podem ser expressas matematicamente pelas duas equações vetoriais:

$$\sum F = 0$$

$$\sum M(O) = 0$$

Onde $\sum F = 0$ representa a soma de todas as forças que agem sobre o corpo, e $\sum M(O) = 0$ a soma dos momentos de todas as forças em torno de qualquer ponto O dentro ou fora do corpo. Se estipularmos um sistema de coordenadas x, y, z com origem no ponto O, os vetores força e momento podem ser resolvidos em componentes ao longo dos eixos coordenados, e as duas equações apresentadas podem ser escritas como seis equações em forma escalar, ou seja,

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum M_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum M_y = 0$$

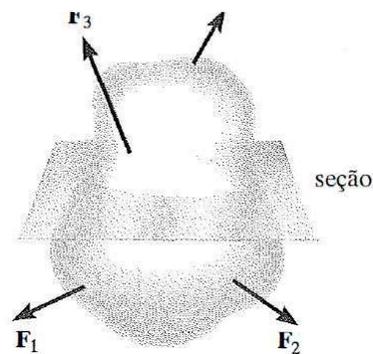
$$\sum F_z = 0$$

$$\sum M_z = 0$$

2.2.2. Cargas resultantes internas.

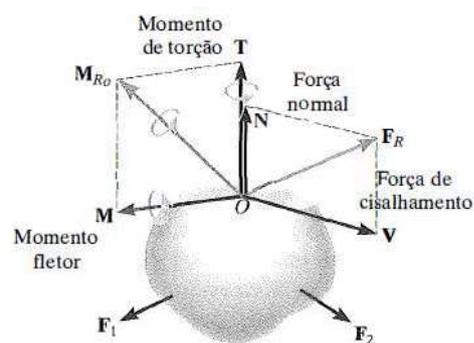
Segundo Hibbeler (2009) essas forças representam os efeitos do material que está na parte superior do corpo e são demonstradas pela figura 4.

Figura 3 - Corpo em equilíbrio submetido a forças



Fonte Hibbeler (2009)

Figura 4 - Cargas Resultantes Internas



Fonte Hibbeler (2009)

2.2.2.1. Força normal

Age perpendicularmente à área e se desenvolve sempre que as cargas externas tendem a empurrar ou puxar os dois segmentos do corpo. A tensão normal aplicada na tração pura pode ser calculada por:

$$\sigma = P/A$$

Onde P é a força aplicada e A é a área da seção transversal no ponto de interesse. A figura 5 mostra um corpo submetido a flexão pura.

Figura 5 - Corpos submetido a tração pura



Fonte Norton (2013)

2.2.2.2. Força de cisalhamento

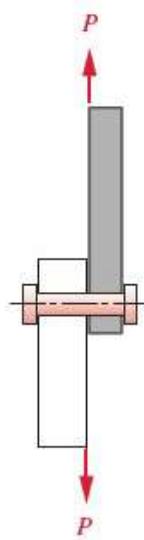
Esses tipos de solicitações ocorrem principalmente em junções por pinos, parafusos ou rebites. Os possíveis modos de falha são cisalhamento puro do elemento de conexão (pino, parafuso ou rebite), falha por esmagamento do elemento de conexão ou do material circundante, ou rasgamento do material em torno do elemento de conexão (Norton, 2013)

Segundo Norton (2013), o cisalhamento puro ocorre em situações em que não há flexão presente. Se a folga entre as duas lâminas ou superfícies de corte puder ser mantida próxima de zero, então o estado de cisalhamento puro pode ser assumido e a tensão média resultante na face de cisalhamento pode ser estimada por:

$$\tau_{xy} = P/A_{cis}$$

onde P é a carga aplicada e A_{cis} é a área de cisalhamento sendo cortada, isto é, a área da seção de corte sendo cisalhada. A figura 6 mostra um corpo submetido a cisalhamento puro

Figura 6 - Corpo submetido a cisalhamento puro

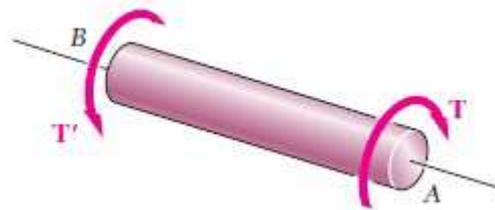


Fonte Norton (2013)

2.2.2.3. Momento de torção

Esse efeito é desenvolvido quando as cargas externas tendem a torcer um segmento do corpo com relação ao outro. Esses momentos têm a mesma intensidade T e sentidos opostos. Eles são grandezas vetoriais e podem ser representados por setas curvas, como na Figura 7, ou por vetores conjugados, como na Figura 8 (Beer, 2011).

Figura 7 - Corpo submetido a torção



Fonte Beer (2011)

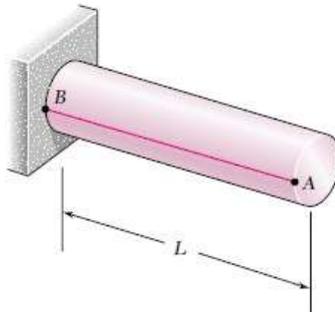
Figura 8 - Corpo submetido a torção
(Representação vetores conjugados)



Fonte Beer (2011)

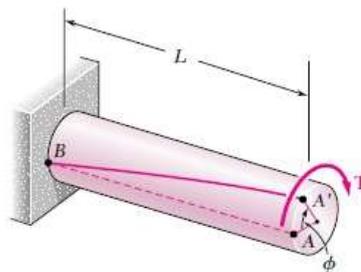
Conforme Beer (2011), se um torque T é aplicado à outra extremidade, a barra sofrerá rotação com sua extremidade livre girando de um ângulo ϕ chamado de ângulo de torção como demonstrado na figura 10. Dentro de determinado intervalo de valores de T , o ângulo de torção ϕ é proporcional a T e ϕ é proporcional também ao comprimento L da barra. Em outras palavras, o ângulo de torção para uma barra do mesmo material e mesma seção transversal, mas duas vezes mais longa, será duas vezes maior sob o mesmo torque T .

Figura 9 - Representação



Fonte Beer (2011)

Figura 10 – Representação
ângulo de torção



Fonte Beer (2011)

2.3. ANÁLISE DOS MATERIAIS

Segundo Callister (2002), muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a forças ou cargas; em tais situações, torna-se necessário conhecer as características do material e projetar o componente do qual ele é feito de tal maneira que a deformação resultante não seja excessiva e não ocorra fratura ou deformação plástica. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada.

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos que reproduzem as condições de serviço ao qual ele será submetido. Dentre os fatores a serem considerados incluem-se a origem da carga aplicada e a duração de sua aplicação. A carga pode ser de tração, compressiva ou de cisalhamento, e sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou variar continuamente, bem como tempo de aplicação que pode durar tanto uma fração de segundos como também alguns anos Callister (2002).

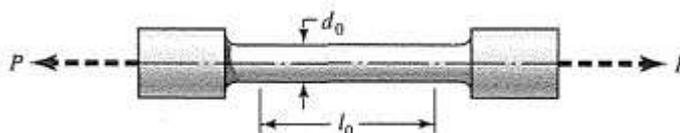
2.3.1. Resistência dos Materiais

O ensaio de tração é empregado para obter diversas características e resistências que são utilizadas em projeto. A Figura 11 ilustra um corpo de prova de ensaio de tração e suas dimensões características. O diâmetro original D_0 e o comprimento de bitola l_0 , usado para medir as deformações durante o ensaio. O corpo de prova é vagarosamente carregado em tração, enquanto a carga P e a deformação são observadas. Tal carga é convertida à tensão pelo cálculo:

$$\sigma = P/A_0$$

em que A_0 é a área original do corpo de prova (Shigley, 2005)

Figura 11 - Corpo de prova para ensaio de Tração



Fonte Shigley (2005)

A deflexão, ou extensão do comprimento de bitola, é dada por $l - l_0$, em que l é o comprimento de bitola correspondente à carga P . A deformação é calculada por

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

As Figuras 12 e 13 representam diagramas típicos de tensão-deformação para materiais dúcteis (Figura 12) e frágeis (Figura 13). O ponto pl na Figura 12 é denominado limite de proporcionalidade, ponto esse em que a curva começa a desviar de uma linha reta. Nenhuma deformação permanente será observável no corpo de prova, se a carga for removida nesse ponto. No intervalo linear, a relação uniaxial tensão-deformação é fornecida pela lei de Hooke:

$$\sigma = E\epsilon$$

em que a constante de proporcionalidade E , a inclinação da parte linear da curva de tensão-deformação, é chamada de módulo de Young ou módulo de elasticidade e representa uma medida da rigidez de um material. O ponto el na figura 12 é denominado limite elástico. Se o corpo de prova continua sendo carregado além desse ponto inicia-se o processo de deformação é plástica, ou seja, o material terá uma deformação permanente quando a carga for removida. Durante o ensaio de tração, vários materiais alcançam um ponto no qual a deformação começa a aumentar rapidamente, sem, no entanto, um aumento correspondente na tensão. Esse ponto é denominado ponto de escoamento (Shigley, 2005)

Figura 12 - Diagrama tensão deformação obtido através do ensaio de tração em material dúctil

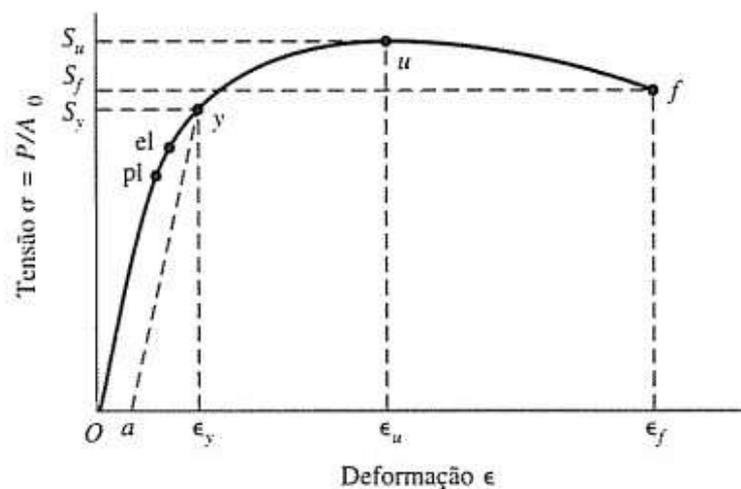
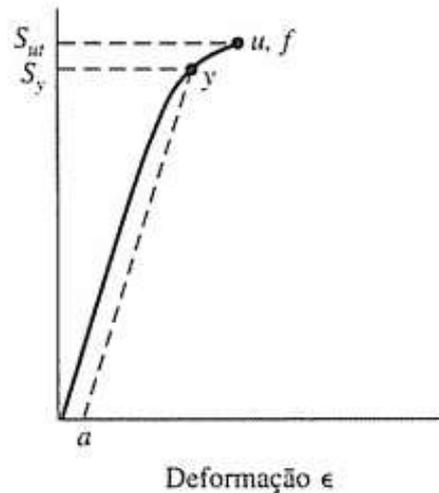


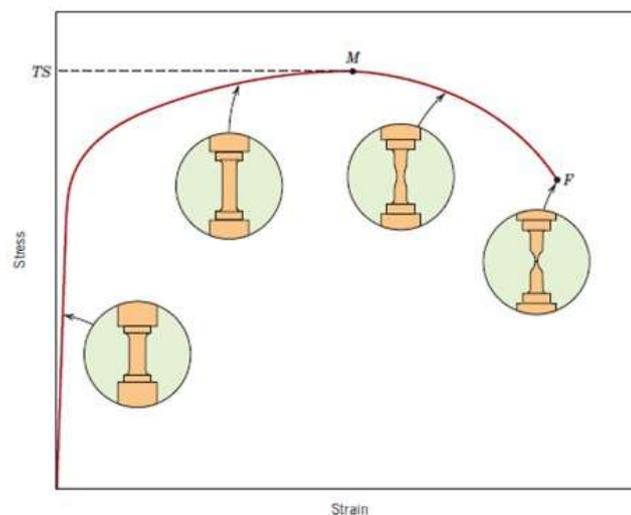
Figura 13 - Diagrama tensão deformação obtido através do ensaio de tração em material frágil



Fonte Shigley (2005)

Segundo Callister (2002), após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo, representado pelo ponto M na figura 14, e então diminui até a fratura do material, representado pelo ponto F. O limite de resistência à tração LRT é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia mostrado na figura 14. Esse valor corresponde a tensão máxima que pode ser sustentada por uma estrutura que se encontra sob tração. Se essa tensão for aplicada e mantida, o resultado será uma fratura. No ponto de tensão máxima, ocorre uma pequena constrição conhecida como “empescoamento”. A fratura ocorre nesse pescoço.

Figura 14 - Diagrama Tensão deformação



Fonte Callister (2002)

2.3.2. Dureza

A dureza de um material pode ser um indicador de sua resistência ao desgaste. A dureza é mais frequentemente medida em uma das três escalas: Brinell, Rockwell ou Vickers. Todos esses ensaios de dureza envolvem a impressão forçada de uma pequena prova na superfície do material que está sendo testado (Norton,2013).

O ensaio Brinell utiliza uma esfera de carvão de tungstênio de 10 mm de diâmetro sobre a qual se aplica uma carga de 500 kgf ou 3000 kgf, dependendo da faixa de dureza do material. O diâmetro da impressão resultante é medido com um microscópio e utilizado para calcular o valor da dureza Brinell, o qual tem unidade de kgf/mm². O ensaio Vickers utiliza uma pirâmide de diamante para imprimir a marca e mede a largura da impressão no microscópio. O ensaio Rockwell usa uma esfera de 1/16 in de diâmetro ou uma ponta de diamante em forma de cone com ângulo de 120° e mede a profundidade de penetração (Norton,2013).

A dureza é indicada por um número seguido da letra H, à qual se justapõe a letra indicativa do método utilizado. Várias escalas identificadas por letras (A, B, C, D, F, G, N, T) são usadas para materiais em diferentes faixas de dureza Rockwell, sendo necessário especificar a letra e o número da leitura Rockwell. No caso da escala Rockwell N, utiliza-se um marcador cônico de ângulo obtuso, com cargas de 15, 30 ou 40 kgf, e a especificação deve incluir a carga utilizada bem como a letra de escala, por exemplo, 84,6 HR15N. Essa escala Rockwell N é tipicamente usada para medir a dureza “superficial” de peças finas ou endurecidas superficialmente. A carga mais baixa e a ponta N de ângulo obtuso produzem uma penetração rasa que mede a dureza da camada superficial sem incluir os efeitos do substrato mais macio (Norton, 2013).

De maneira geral os testadores de dureza por penetração medem a resistência de um material à deformação permanente quando sujeito a uma particular combinação de tensão compressiva tri axial e um gradiente de tensão em degrau (Juvinal, 2008).

Todos esses ensaios são não destrutivos na medida em que a amostra permanece intacta. Contudo, a impressão pode se tornar um problema caso o acabamento superficial seja um fator crítico, ou se a seção for delgada; nesses casos, eles são considerados ensaios destrutivos. A dureza Brinell fornece uma maneira de estimar o limite de resistência à tração S_{ut} do material pela relação:

$$S_{ut} = 500H_b \pm 30H_b [PSI]$$

$$S_{ut} = 3,45H_b \pm 0,2H_b [MPa]$$

onde HB é o valor da dureza Brinell (Norton,2013).

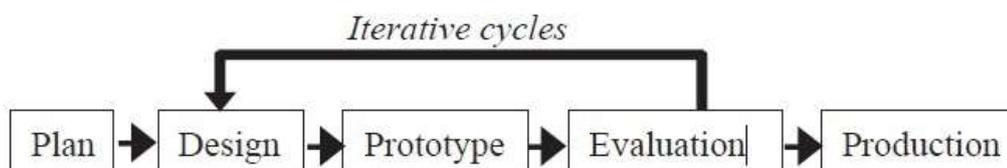
2.4. FERRAMENTAS DE PROJETOS E RECURSOS NUMÉRICOS

A otimização estrutural do design de projetos é um tópico importante no campo da engenharia para se obter um produto mais eficiente e estruturas mais leves. O principal objetivo é determinar a forma mais otimizada de uma estrutura para maximizar ou minimizar determinado critério, como por exemplo, maximizar a rigidez e minimizar o peso de determinada estrutura.

Sistemas CAD, do inglês Computer-Aided Design (Desenho ou Projeto Assistido por Computador), é o nome genérico dos sistemas computacionais utilizados pela engenharia, geologia, arquitetura, e design industrial para executar projetos e desenhos técnicos (NAVEIRO, 2010). Esta ferramenta pode diminuir significativamente o tempo de desenvolvimento de um projeto, possibilitando o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e de restrições, levando a uma melhor solução, com um menor custo. Esta ferramenta é especialmente válida quando a estrutura é complexa ou existem muitas soluções para o problema (MARINHO, 2002; MACAMBIRA, 2014). Uma outra vantagem de uma base de dados tridimensional é que ela permite cálculos rápidos e precisos das propriedades de massa, tais como massa, localização do centro de gravidade e momentos de inércia das massas.

Softwares CAE do inglês Computer Aided Engineering (Engenharia assistida por computador) é uma ferramenta que permite realizar avaliações de engenharia como análises fluidodinâmicas, cinemáticas, estruturais e etc. A metodologia de projetos de produtos, de maneira geral, segue as etapas mostradas na figura 15:

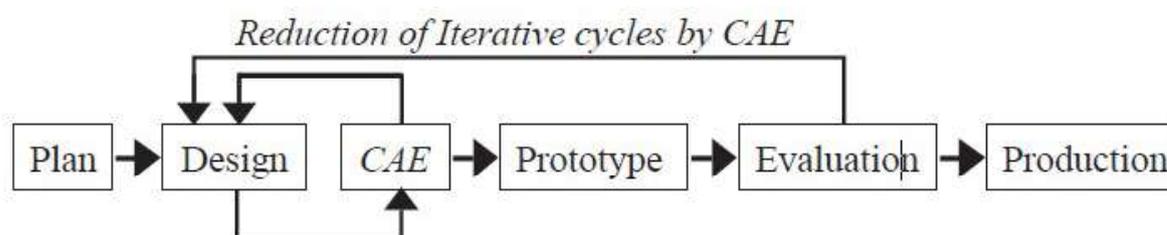
Figura 15 – Etapas do Desenvolvimento de Produto



Fonte Yoshio Kojima (2000)

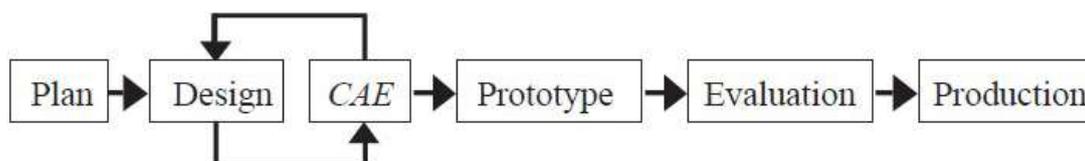
O objetivo dos estudos através de sistemas CAE é acelerar a concepção de um novo projeto de maneira a reduzir os ciclos iterativos entre a avaliação do protótipo e a revisão do Design (figura 16). Em outras palavras, o objetivo da validação do projeto através das ferramentas CAE é tornar a construção do protótipo e a avaliação do mesmo apenas uma etapa sem reiteração, como mostrado na figura 17.

Figura 16 - Introdução do CAE no desenvolvimento do produto



Fonte Yoshio Kojima 2000

Figura 17 - Validação do Projeto através da ferramenta CAE



Fonte Yoshio Kojima 2000

Modelamento através do CAD e análises através de softwares CAE tem se tornado parte inerente do processo de desenvolvimento de produto. Existem uma grande variedade de ferramentas e soluções CAD e CAE no mercado como SolidWorks™, Pro/Engineer™ e Ansys™ and NX Nastran™ os quais são comumente utilizados na indústria.

2.5. CREO

PTC CREO também conhecido no mercado como Pro engineer é um software CAD/CAM/CAE que permite a modelagem de produtos com geometria complexas e a realização de simulações. O modelamento das peças e a simulações do presente estudo foram realizadas através do CREO 3.0 nas versões Parametric e Simulate.

2.6. TÓPICOS GERAIS DE MONTAGEM DE PEÇAS AERONÁUTICAS

2.6.1. Classificação das peças

- **Classe 1A:** Falhas classificadas como catastróficas que podem resultar em perda da aeronave e múltiplas fatalidades (morte). Obrigatório a rastreabilidade total do número de série, peça.
- **Classe 1B:** Falhas classificadas como perigosas que podem resultar na redução da capacidade funcional ou no limite das margens de segurança, excessivo esforço dos pilotos, ferimentos sérios ou fatais a um pequeno número de passageiros ou membros da tripulação. Obrigatório a rastreabilidade total do número de série, peça.
- **Classe 2A:** Peças cujo as falhas resultam numa falha classificada como perigosa e que em combinação com outras podem causar uma falha mais crítica que podem resultar em larga redução da capacidade funcional ou no limite das margens de segurança, excessivo esforço dos pilotos, ferimentos sérios ou fatais a um pequeno número de passageiros ou membros da tripulação. Exige a rastreabilidade por lote.
- **Classe 2B:** Peças cujo as falhas resultam numa falha classificada como maior e que em combinação com outras podem causar uma falha mais crítica que podem resultar em significativa redução da capacidade funcional ou no limite das margens de segurança, significativo esforço dos pilotos, possíveis ferimentos aos passageiros. Exige a rastreabilidade por lote.

- **Classe 2C:** Peças cujo as falhas resultam numa falha classificada como menor e que em combinação com outras podem causar uma falha mais crítica que podem resultar em alguma redução da capacidade funcional ou no limite das margens de segurança, algum esforço dos pilotos, desconforto aos passageiros. Exige a rastreabilidade por lote;
- **Classe 3:** Peças cujo as falhas não afetam segurança. Não exige rastreabilidade

2.6.2. Identificação

- **Part Number (PN):** Número de identificação da peça.
- **Número de série (S/N):** Número de fabricação contínuo de um produto (peça individual, grupo, equipamento).
- **Número do lote:** Número da solicitação de fabricação de peças iguais

2.6.3. Limpeza na área de trabalho

A área de montagem deve ser ventilada e equipada de modo que nenhuma contaminação externa possa interferir no processo. Objetos pessoais devem ser mantidos afastados da área de montagem. Ao final do trabalho ou durante qualquer interrupção do mesmo, as peças devem ser protegidas com, por exemplo, embalagens plásticas sem poeira. Blocos montados com plugs devem sempre ser armazenados em embalagens protetoras

Os departamentos de montagem devem possuir dispositivos de limpeza e panos feitos de material sem fiapos para limpar peças. O uso de escovas para a montagem de peças hidráulicas de precisão é proibido. Se os produtos químicos auxiliares de montagem forem fracionados em recipientes menores para uso, os recipientes devem ser marcados com o produto, a classe de perigo e a data de validade. Além disso, os recipientes devem ser limpos regularmente (pelo menos uma vez por mês).

Instalação de insertos roscado, montagem de componentes LEE, aplicação de selantes, a moldagem de metal à mão ou com máquinas-ferramentas deve ser realizada com separação espacial entre si e dos locais de trabalho de montagem.

2.6.4. Inspeção dimensional

Para checar dimensões, os montadores devem ter instrumentos de medição como micrometros externos, calibradores passa não passa, calibradores de plug e etc. A inspeção dimensional na área de montagem é limitada a inspeção de folgas de instalação, controle de desgaste e inspeção contra plano de trabalho de corte de metal (por exemplo, giro de torno, moagem) realizado no departamento de montagem.

No caso de mau funcionamento ou dificuldades na instalação devido a variações dimensionais do componente ou erros de produção, as medições devem ser realizadas com a assistência do departamento de qualidade.

2.6.5. Limpeza

Antes de desmontagem, deve ser realizada uma limpeza brusca nas peças de acordo com o seu grau de contaminação. Escovas e equipamentos de limpeza estão disponíveis na área de montagem para esse propósito. Na escolha de processos de limpeza, deve ser tomado os cuidados para que as peças não sofram danos mecânicos ou químicos. A limpeza antes da desmontagem pode facilitar o reconhecimento de danos ao dispositivo e limitar a contaminação durante a desmontagem.

Em seguida, as peças individuais podem ser submetidas a uma limpeza adicional na instalação de limpeza por ultrassom. Esse processo é considerado como uma limpeza fina. A remoção áspera e a proteção da superfície devem sempre ser removidas antes da limpeza ultrassom. Resquícios de líquidos resultante do processo de limpeza nos orifícios da peça são removida com ar comprimido seco e sem óleo. Peças com pintura e blocos equipados com LEE PLUG não devem ser lavados no equipamento de lavagem ultrassom, essas peças devem ser limpas com um cuidado especial.

Para peças especialmente críticas (para funções de controle e direção) ou para examinar furos, especialmente para blocos de válvulas, os trabalhadores da montagem devem verificar a limpeza das peças usando um microscópio ou endoscópio. A contaminação residual pode resultar em obstruções e falhas operacionais dos dispositivos, o que poderia ter efeitos catastróficos para o equipamento de voo.

2.6.6. Gravação

As peças são marcadas para poder identificar claramente peças individuais e dispositivos completos durante a produção e após a entrega. As gravações que são aplicadas através de processos mecânicos, químicos ou elétricos diretamente nas peças de trabalho são diferenciadas daquelas em que a marcação real está em uma placa de identificação, que é

anexada ao dispositivo. Independentemente do processo, as marcações são feitas apenas nos locais especificados nos desenhos de design e nos manuais para garantir que eles também possam ser lidos quando o dispositivo estiver instalado.

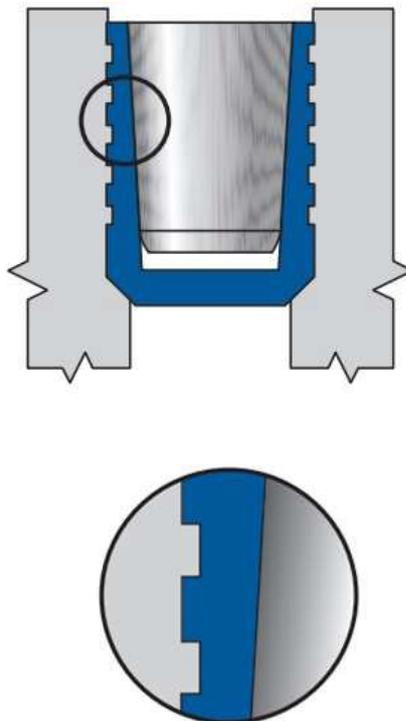
3. METODOLOGIA

3.1. O PRINCÍPIO DO LEE PLUG

O Lee plug é um plug cilíndrico com um de furo cônico e numerosos e pequenos sulcos em seu diâmetro externo. O plug é encaixado no furo do produto, um pino cônico é então guiado dentro do plug até que o final do plug e do pino encoste um no outro.

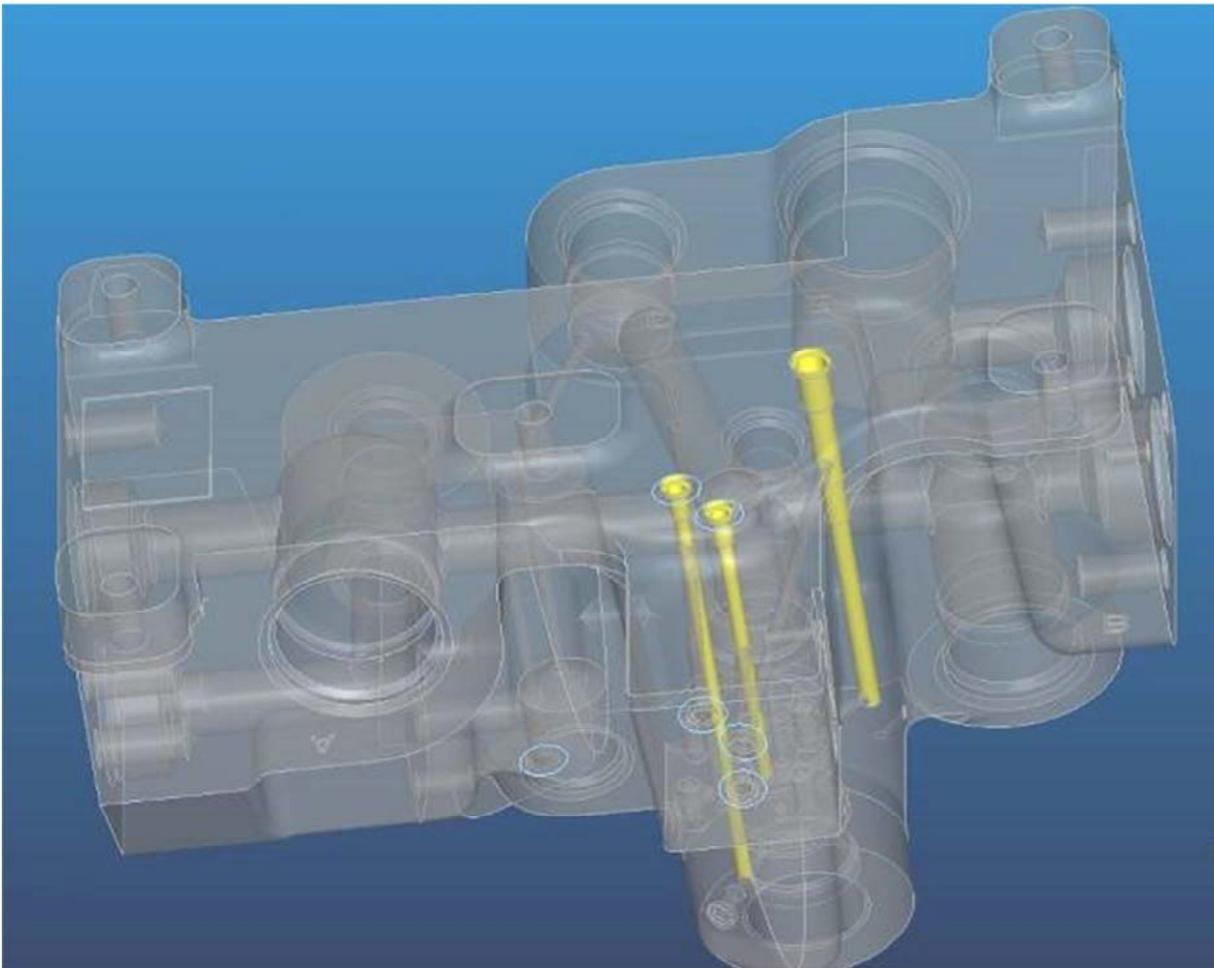
A expansão controlada faz com que os sulcos do plug “mordam” o material que circunda o plug formando independentes anéis de retenção. O resultado é uma vedação vazada e resistente a líquidos e gases.

Figura 18 - Lee Plug



Durante a usinagem de peças aeronáuticas faz se necessário usinar os canais de intersecção por onde o fluido irá passar. Para a ferramenta de usinagem ter acesso e ser possível usinar esses canais, faz se necessário realizar alguns furos adicionais no produto que deverão ser completamente vedados posteriormente. Esses furos recebem a montagem do plug. A figura 19 mostra um exemplo de furos que receberão montagem de Lee Plugs. Os canais que irão receber montagem estão indicados em amarelo.

Figura 19 - Exemplo de canais que recebem a montagem de Lee Plugs



Fonte: Autoria Própria

3.1.1. Pressão de testes

Para auxiliar os projetistas na seleção adequada dos plugs a pressão de teste é indicada para três classes de furos (Classes I,II,III).

A pressão de teste é a maior pressão hidrostática que pode ser aplicada no teste de aceitação de produção. A pressão de é definida quando o material do furo é o mesmo do plug. Quando há a instalação dos plugs em materiais diferentes, a especificação das pressões de teste é diferente. Como uma recomendação geral, a pressão de teste escolhida não deve exceder o valor da pressão de pico do sistema.

3.1.2. Limites de temperatura

É necessário levar em consideração e acompanhar o coeficiente de expansão térmica em aplicações nas quais o plug pode estar exposto a temperaturas menores que -54°C ou maiores que 135°C . Plugs de alumínio não devem ser utilizado em temperaturas maiores que 135°C . Plugs de aço inoxidável são recomendados para temperaturas de até 260°C . Caso a temperatura exceda os 260°C informações sobre o material do produto em que o plug está instalado bem como a aplicação inteira deve ser considerada.

3.1.3. Acabamento superficial

O furo de instalação deve estar seco e limpo. O acabamento superficial deve estar entre aproximadamente $0,4-1,6\ \mu\text{m}$ no sentido circular sem marcas longitudinais. Um acabamento mais suave pode resultar em diminuição na pressão de teste, entretanto, rugosidades altas podem ocasionar vazamentos.

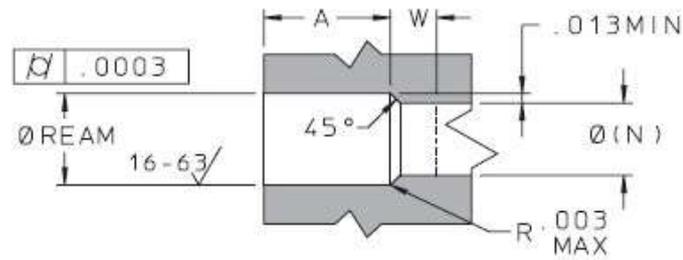
3.1.4. Tratamento superficial nos furos de instalação

Os dados de pressão dos componentes referem-se a furos sem tratamentos superficiais. Passivação em aços inoxidáveis conforme MIL-S-5002 ou ASTM A 967 não tem nenhum efeito na performance dos plugs. No caso do alumínio, é recomendado superfícies sem tratamento, porém, furos anodizados conforme MIL-A-8625 Tipo II são aceitáveis. Não é admissível nenhum tratamento que possua adição de lubrificantes sólidos como, por exemplo, teflon.

3.1.5. Profundidade do furo

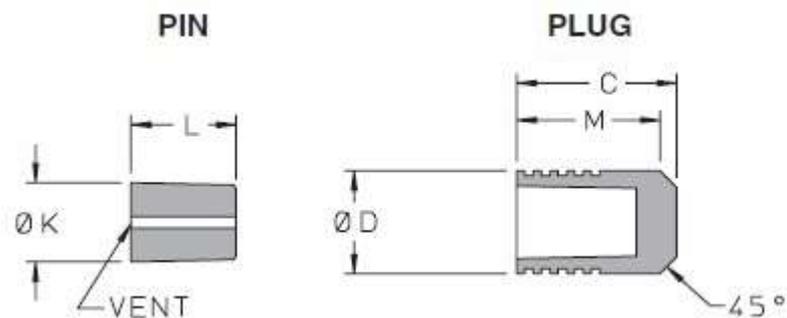
A dimensão do furo no qual o plug será instalado é recomendada para garantir o máximo poder de retenção. Quando utilizada as dimensões recomendadas a extremidade traseira do plug e do pino sempre será pelo menos 0.010 polegadas abaixo da superfície do material. A profundidade do furo de instalação é representada pela dimensão “A” na figura 19. Se o máximo poder de retenção não é o fator mais relevante no projeto e deseja-se melhorar a aparência da montagem, então, a profundidade do furo de instalação pode ser igual a dimensão “M” mostrada na figura 20 adicionada de 0.010 polegadas. Dessa maneira, a instalação finalizada será nivelada com a superfície do material, entretanto, isso causara uma redução da pressão de teste de aproximadamente 20% para plugs curtos e 15% para plugs longos.

Figura 20 - Furo de Instalação



Fonte: Catálogo Lee (2011)

Figura 21 - Representação do Pino e Plug



Fonte: Catálogo Lee (2011)

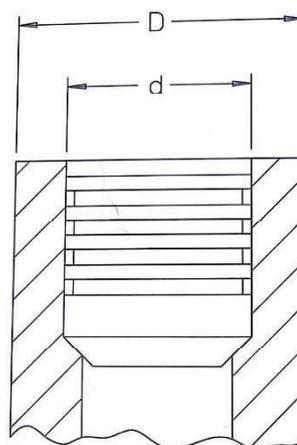
3.1.6. Seleção da classe adequada de montagem

Como uma regra geral, a classe mais baixa compatível com os requisitos de pressão deve ser sempre utilizada. Isso irá resultar em um menor custo com a montagem do plug, uma vez que as classes mais baixas representam tolerâncias mais abertas nas dimensões do furo de instalação, reduzindo custos com usinagem e controle do furo usinado. A classe mais alta irá sempre garantir maior interferência na montagem. Em casos onde é desejado menor interferência de montagem, o furo de instalação deve ser usinado com o maior diâmetro da menor classe e o maior diâmetro da próxima classe. Dessa maneira, a tolerância total será de .001 polegadas e o menor estresse possível no material. Sob essas condições a pressão de teste utilizada será a mesma da menor classe de ajuste.

3.1.7. Tamanho do material

A quantidade de material que circunda o furo de instalação do plug é muito importante nos efeitos de performance do plug e, portanto, precisa ser levada em consideração. Para a instalação do plug no alojamento de mesmo material, o diâmetro do material ao redor do plug (dimensão “D” representada na figura 22) deve ser pelo menos 2,5 vezes o tamanho do diâmetro externo do plug (Dimensão “d” representada na figura 22) para obter as pressões de teste indicadas.

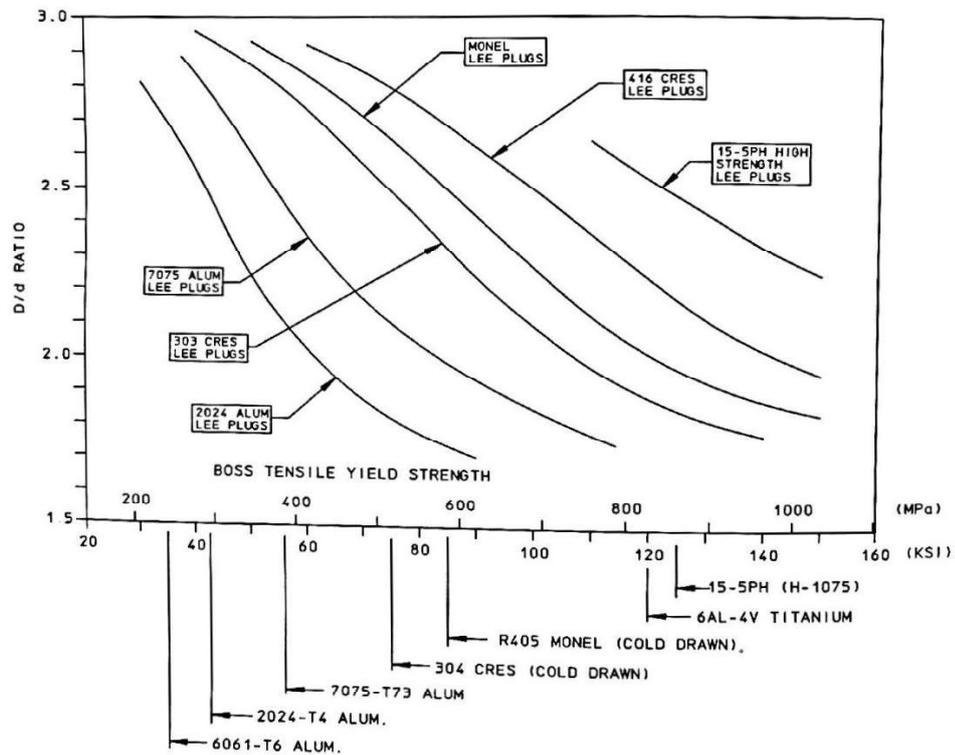
Figura 22 - Espessura da parede do alojamento



Fonte: Catálogo Lee (2011)

O gráfico na figura 23 representa as proporções D/d recomendadas para Lee plugs instalados em materiais diferentes.

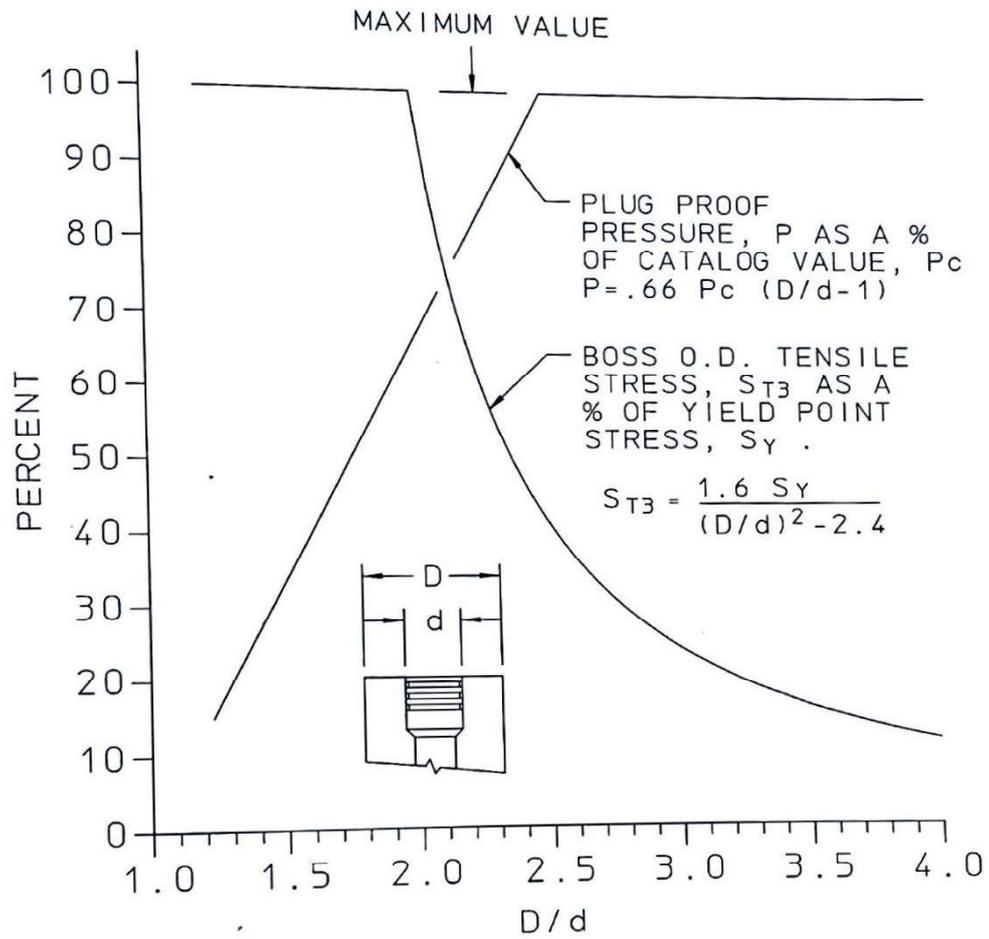
Figura 23 - Proporções D/d recomendadas para materiais diferentes



Fonte: Catálogo Lee (2011)

O gráfico da figura 24 é uma referência utilizada para estimar a porcentagem da pressão de teste com a variação das proporções de D/d.

Figura 24 - O efeito das proporções D/d nas pressões de teste e as tensões dos plugs e do material com propriedades mecânicas semelhantes



Fonte: Catálogo Lee (2011)

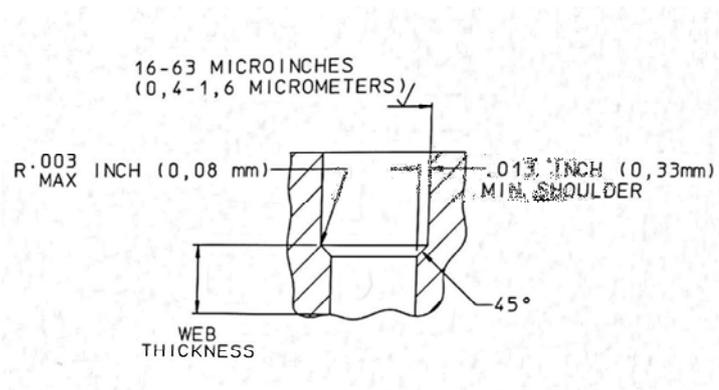
3.1.8. Chanfro do furo de alojamento

O chanfro do furo de instalação do plug tem papel importante e deve ter angulação de 45°, do contrário, o plug pode passar do assentamento durante a montagem do pino, resultando em perdas das pressões de teste e altas tensões de instalação. A largura mínima permitida do ombro do alojamento para instalação dos plugs é de 0,33mm. No caso de plugs de alta tensão é 0,38mm. Esses valores são necessários para o alojamento do plug resistir as forças axiais desenvolvidas durante a montagem do pino. Essas dimensões estão representadas na figura 25.

3.1.9. Espessura da alma

A quantidade de material que está abaixo do chanfro de 45° deve ser capaz de resistir a força transmitida pela montagem do pino dentro do plug. De maneira geral, um mínimo de 3,2mm é permitido para alojamento de alumínio e 1,6mm mínimo para alojamentos de aço.

Figura 25 - Furo de Instalação

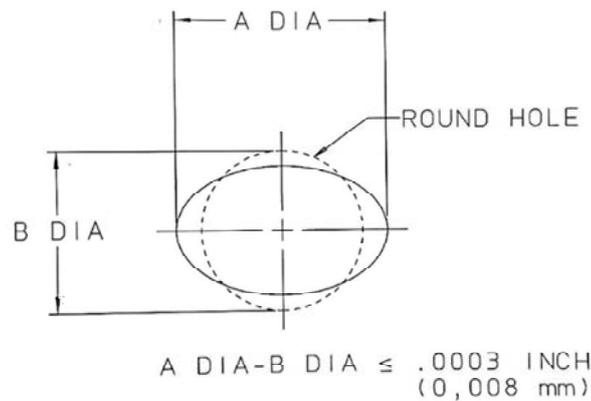


Fonte: Catálogo Lee (2011)

3.1.10. Cilindricidade

Furos cônicos e/ou com dimensões maiores que o especificado pode resultar em baixas forças de instalação, diminuindo a pressão suportada e podendo ocasionar vazamentos. A cilindridade do furo de instalação deve ser mantida em 0,008mm.

Figura 26 - Batimento do Furo de Instalação



Fonte: Catálogo Lee (2011)

3.1.11. Alongamento do material do alojamento

A montagem do Lee Plug causa deformação no material do alojamento, resultando em um crescimento radial do alojamento em seu diâmetro interno e externo. Para trabalharmos com esse crescimento algumas considerações relacionadas a ductilidade do material devem ser feitas

Normalmente, a montagem de Lee Plugs irá expandir o diâmetro interno do alojamento em aproximadamente 0.003 polegadas. Uma vez que a expansão permanece constante para todos os tamanhos de plugs, tamanhos menores estão submetidos aos maiores graus percentuais de deformação como o plug de 0.093 polegadas irá expandir o material do alojamento para 0.096 polegadas, o que representa um crescimento de 3%. Portanto, se o material possuir um alongamento maior que 3% o mesmo não irá rachar com a montagem do Plug.

3.1.12. Fragilização por corrosão sob tensão (stress corrosion cracking – scc)

O controle das tensões no diâmetro externo no material do alojamento é importante onde as fragilizações por corrosão sob tensão (Stress Corrosion Cracking) podem ser um problema. A SCC é uma falha causada pela combinação das ações de um agente corrosivo e tensões de tração. Ao passo que a maioria das ligas estão suscetíveis a SCC cada material possui um valor limite de tensão que a falha não irá ocorrer. Esse valor é uma função do material e da aplicação a qual ele será submetido.

Durante a montagem do pino ocorre a expansão do plug causando a deformação plástica do diâmetro interno do material do alojamento. Se o diâmetro do material do alojamento (dimensão “D” representada pela figura 22) é relativamente pequeno se comparado com diâmetro do plug (dimensão “d” representada na figura 22) a região plástica irá se estender ao diâmetro externo do produto. Se o diâmetro D for maior a região plástica estende-se apenas parcialmente através do diâmetro Interno e o restante é deformado elasticamente.

As ligas de alumínio 2024-T3&T4, 7075-T6, Cres: 440C possuem baixa resistência ao SCC e por isso não são recomendadas para serem utilizadas como material de alojamento de plugs.

Tabela 1 - Materiais de Alta Resistência ao SCC

LIGA	CONDIÇÃO	LIMITE DE ESCOAMENTO	% ALONGAMENTO
2024 Alum	T851	58 ksi	5
6061 Alum	T6	35 ksi	10
7075 Alum	T73	56 ksi	8
355,356 Cast Alum	T6	17 ksi	3
15-5PH Cres	H1075	125 ksi	13
300 Series Cres	Trefilado a Frio	75 ksi	35
4130 Cast Steel	Temperado e Revenido	85 ksi	16
6AL-4V Titanium	Recozido	120 ksi	10
Monel Alloy	Trefilado a Frio	85 ksi	20
Inconel Alloy 600	Recozido	35 ksi	30

Fonte: Catálogo Lee (2011)

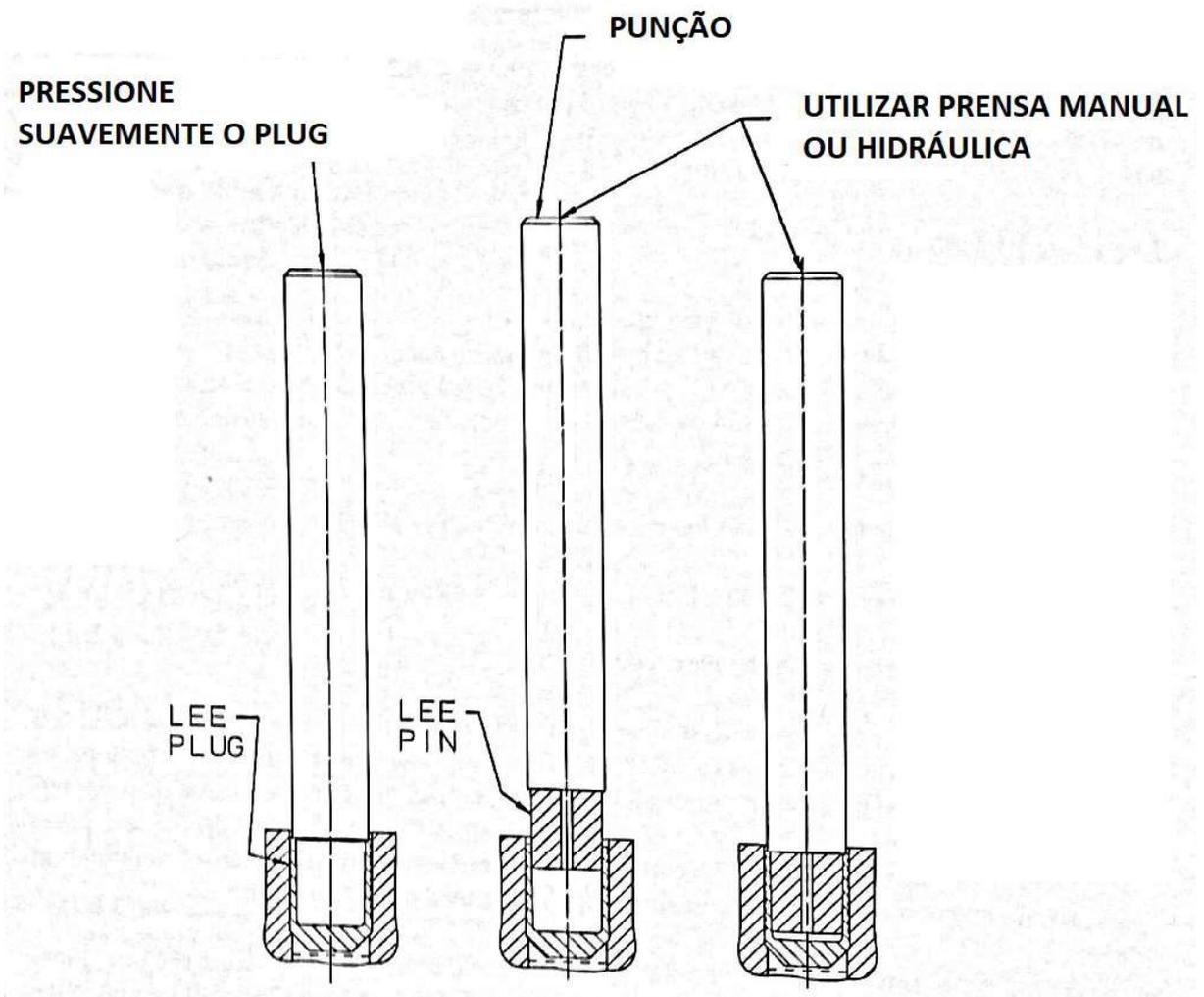
3.1.13. Procedimento de instalação

Os pinos devem ser guiados nos plugs utilizando uma prensa manual, prensa hidráulica ou um martelo. Se for utilizada uma prensa hidráulica ou outro tipo de prensa for utilizada é necessário ajustar o curso da prensa regulando um stop para prensar o pino na posição correta. A aplicação de alguns golpes pesados rapidamente define o pino, enquanto a sucessão de leves golpes tende a deformar o pino.

1. O furo de instalação deve estar totalmente limpo e seco
2. O dispositivo utilizado deve firmemente fixar o produto que receberá a instalação
3. Posicione o plug no furo de instalação totalmente até encostar no ombro do furo. Para garantir que o plug está totalmente assentado no furo de instalação pressione o levemente com o punção de instalação. Se o plug não estiver totalmente assentado, o plug poderá deslizar durante a montagem do pino e causar marcas longitudinais no furo o que pode resultar em vazamento.
4. Monte o pino, inicie a montagem com o diâmetro menor do pino no furo. Evite inclinar o pino. Pressione com o punção de instalação até o pino estar alinhado com o plug. Para checar se o alinhamento está correto poderá ser utilizado um calibrador apropriado.

Não se deve inserir o pino no plug como uma pré-montagem antes de o plug estar instalado no alojamento. Esse procedimento causa a expansão do plug e pode ocasionar marcas no furo e vazamento no sistema.

Figura 27 - Método de instalação



Fonte: Catálogo Lee (2011)

Se for utilizada uma prensa manual para realizar a montagem um punção com diâmetro maior que o diâmetro do plug mas menor que o furo de instalação para permitir o alinhamento correto entre o pino e o plug.

Se uma prensa hidráulica é utilizada a força aplicada não consegue ser sentida pelo operador. Por esse motivo, deve ser utilizado um punção menor que o plug e a altura do pino de expansão deve ser checada.

Após a montagem dos lee plugs, faz se necessário inspecionar visualmente o componente montado para assegurar que a montagem foi realizada atendendo aos requisitos de qualidade . De maneira geral, é necessário que o plug esteja uniformemente instalado e que a parede do produto não tenha sido danificada durante a montagem.

A figura 28 mostra uma montagem que atingiu os requisitos de qualidade esperados.

Figura 28 - Montagem conforme requisito de qualidade



Fonte: Autoria Própria

A figura 29 exemplifica uma montagem inadequada. Nesse caso, o plug deve ser desmontado e um novo componente deve ser inserido no alojamento.

Figura 29 - Montagem não Conforme



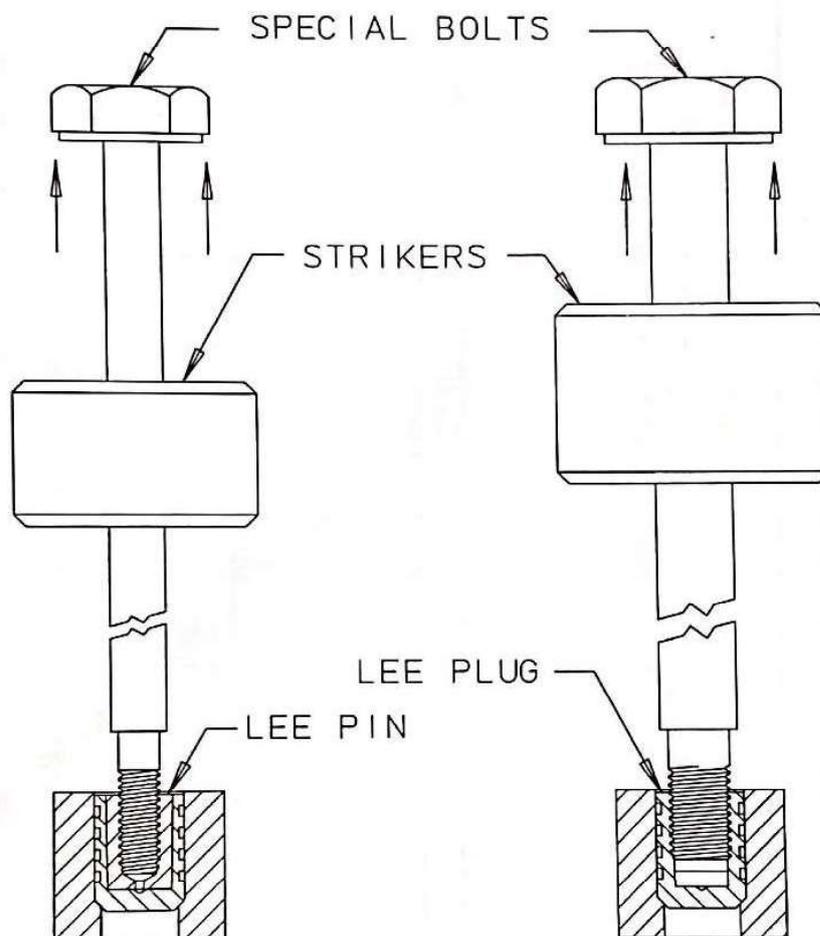
Fonte: Autoria Própria

3.1.14. Procedimento de extração

Em alguns casos é necessário remover o Lee Plug para inspecionar, limpar, ou obter acesso ao canal de intersecção. O seguinte procedimento permite remover o plug sem danificar o alojamento ou contaminar os canais de intersecção.

1. Tampar todos os outros furos do produto
2. Perfurar o pino utilizando uma broca adequada
3. Rosquear o pino e remover o pino utilizando a ferramenta adequada
4. Rosquear o plug e remover o plug utilizando a ferramenta adequada

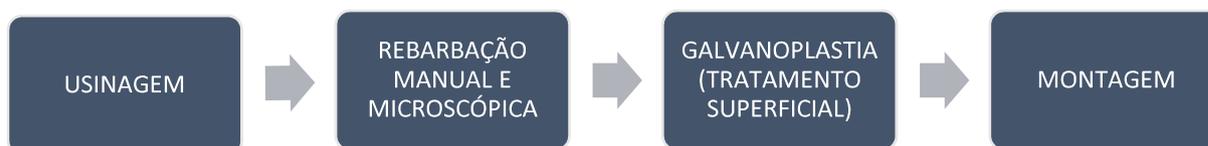
Figura 30 - Método de Extração de Plugs



3.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS AERONÁUTICAS

A figura 31 representa o fluxo de fabricação de blocos de válvulas do setor aeronáutico. Cada produto possui particularidades específicas, como, por exemplo, diversos tipos de tratamentos superficiais e montagem diversas de componentes. A ordem dessas operações geralmente segue a sequência mostrada pela figura 31.

Figura 31 - Sequência de Fabricação de blocos de válvulas



Fonte: Autoria Própria

3.3. PROJETO DE DISPOSITIVOS DE FIXAÇÃO PARA PEÇAS COM MONTAGEM DE LEE PLUGS

Durante a montagem de Plugs os produtos que irão receber esse tipo de montagem devem estar bem fixados para garantir a perpendicularidade entre o punção da prensa e o plano do pino de expansão para garantir que ele será corretamente guiado dentro do plug e a expansão do plug ocorrerá uniformemente garantindo a vedação do sistema e integridade dos componentes.

Dessa maneira, a concepção dos dispositivos de fixação deve garantir o correto posicionamento entre o canal de intersecção e o punção que irá efetuar a prensagem do pino. O eixo do punção deve estar paralelo ao canal que irá receber a montagem e, durante o processo de prensagem, o produto deve ficar totalmente imóvel para que a prensagem seja realizada de maneira uniforme no pino e não cause danos no furo do produto.

Especificamente em peças aeronáuticas que possuem geometrias bastantes assimétricas devido à redução de peso e espaço ocupado na aeronave o desenvolvimento de dispositivos de fixação para montagem de plugs torna-se complexo à medida que os planos dos canais nos quais serão montados plugs estão em ângulos diferentes entre si. É importante ressaltar que além de fixar firmemente e garantir a correta prensagem dos pinos os dispositivos devem ser concebidos levando em consideração a produtividade e ergonomia dos operadores que realizam esse processo.

De maneira geral o processo de concepção e desenvolvimento dos dispositivos de fixação envolvem as seguintes etapas.

1. Identificação dos canais que irão receber montagem de plugs
2. Identificação do material do Plug (plugs em aço oferecem uma resistência muito maior que os fabricados em alumínio)
3. Identificação e estudo dos modos de fixação
4. Desenvolvimento dos apoios
5. Modelamento do dispositivo
6. Aprovação do conceito
7. Detalhamento do projeto
8. Fabricação do Dispositivo
9. Validação e testes na área

A aprovação do conceito de fixação do dispositivo de montagem é uma etapa crítica no processo de fabricação do produto, uma vez que a montagem é a última etapa produtiva do produto, problemas envolvendo o conceito de fixação descobertos durante a etapa de testes do dispositivo após a fabricação podem impactar diretamente no lead time do produto. Atualmente, não existe uma metodologia definida para aprovação do conceito do dispositivo e dos modos de fixação escolhido, o que fazendo com que a validação dos modos de fixação escolhidos seja realizada apenas com base na experiencia e know-how do processista.

Um reflexo atual que comprova esse gap no desenvolvimento de dispositivos de fixação é o excesso de retrabalhos após a fabricação do dispositivo. As falhas relacionadas a concepção do dispositivo são descobertas apenas após a fabricação do mesmo, quando o dispositivo será utilizado pela primeira vez.

3.4. ESTUDO DE CASO

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi escolhido um Part Number piloto cujo o dispositivo de montagem já foi desenvolvido no passado e atualmente apresenta alguns problemas que dificultam a montagem. Esse produto irá servir como objeto de estudo para desenvolvermos uma metodologia para validação dos projetos de dispositivos de montagem.

3.4.1. Padronização das forças de montagem

As informações sobre as forças para instalação do plug foram retiradas do manual do fabricante e são mostradas na tabela 2.

Tabela 2 - Forças de Instalação para Lee Plugs

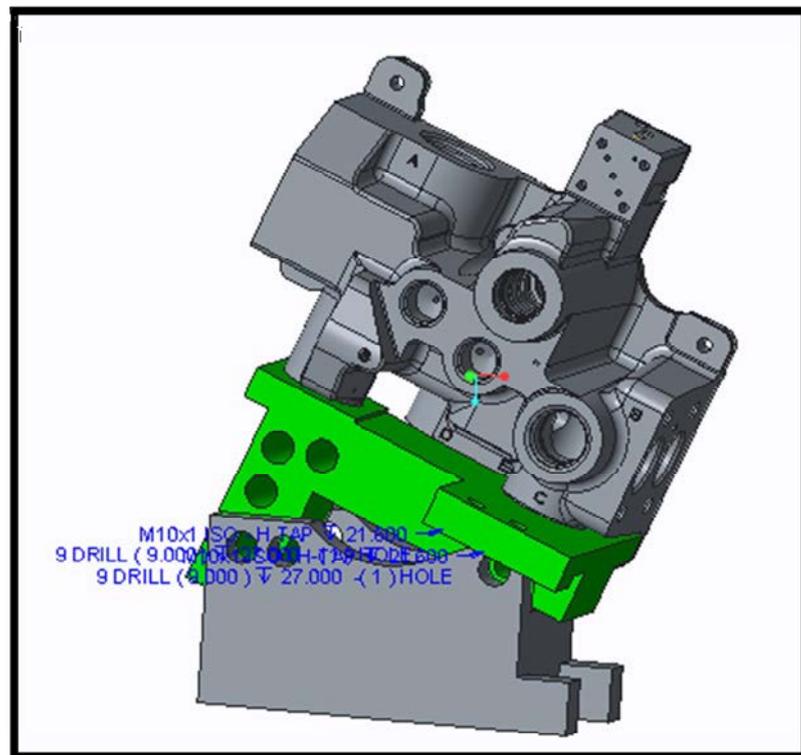
CÓDIGO DO LEE PLUG	FORÇA DE INSTALAÇÃO (kN)
9010A0156-02	3,11
9010A0250-02	5,78

Fonte: Catálogo Lee (2011)

3.4.2. Modelagem do produto e dispositivo de fixação

O modelo 3D do conjunto o dispositivo foi detalhado no software CREO 3.0. A figura 32 mostra o modelo 3D do conjunto.

Figura 32 - Conjunto de Montagem



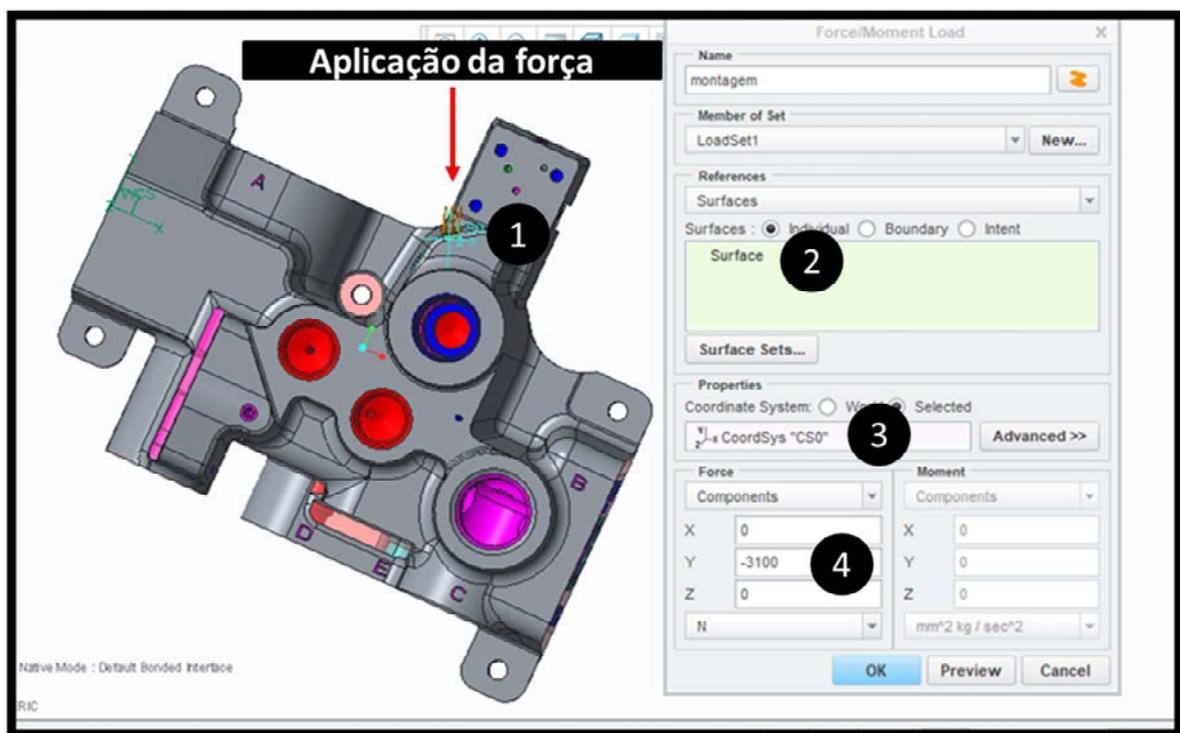
Fonte: Autoria Própria

4. SIMULAÇÃO

4.1. PARAMETRIZAÇÃO DAS FORÇAS

Para o presente estudo, foi adicionada uma força de 3,1kN (conforme especificado na tabela 2) paralelo ao eixo do furo que receberá a montagem do componente. A figura 33 mostra a configuração do carregamento.

Figura 33 - Configuração do carregamento



Fonte: Autoria Própria

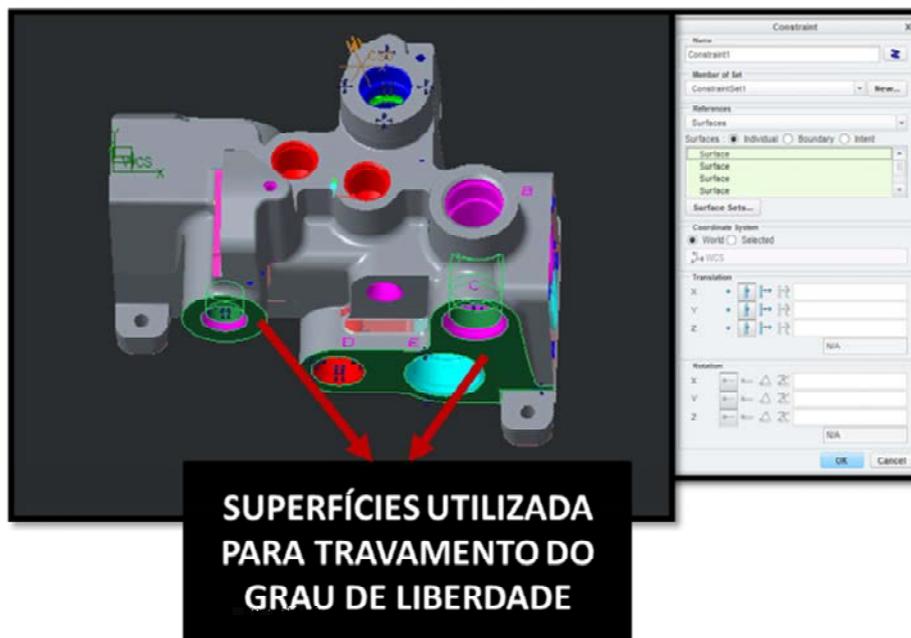
1. Representação da aplicação da força
2. Superfície que sofrerá o esforço
3. Sentido, direção e módulo da força aplicada: Eixo y, -3100N

4.2. ESTADO ATUAL

4.2.1. Definição dos graus de liberdade

Como definição para seleção dos graus de liberdade do produto, foi estabelecido como critério selecionar interfaces de contato com o dispositivo para restrição dos graus de liberdade. A figura 34 mostra as superfícies selecionadas (superfícies verdes) como constraints que foram definidas para a montagem:

Figura 34 - Configuração dos graus de liberdade



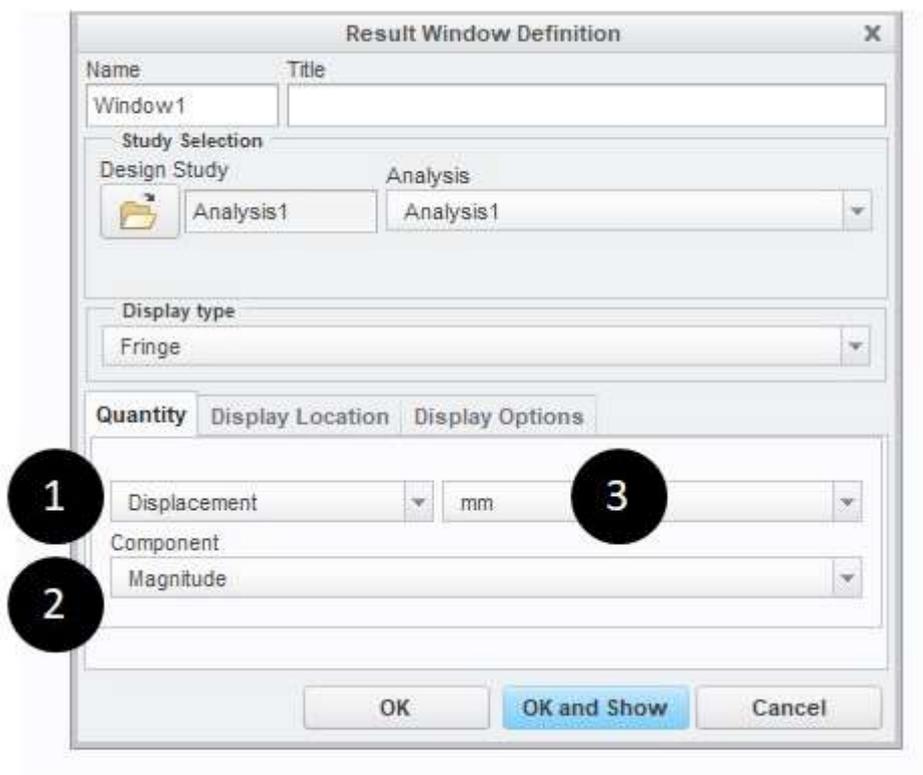
Fonte: Autoria Própria

4.2.2. Simulação dos esforços

Para a visualização dos resultados obtidos através da simulação, foi selecionado como o parâmetro “Displacement” do Creo 3.0.

Foi definido como critério de análise o componente Magnitude. O resultado obtido dessa simulação está representado na figura 36.

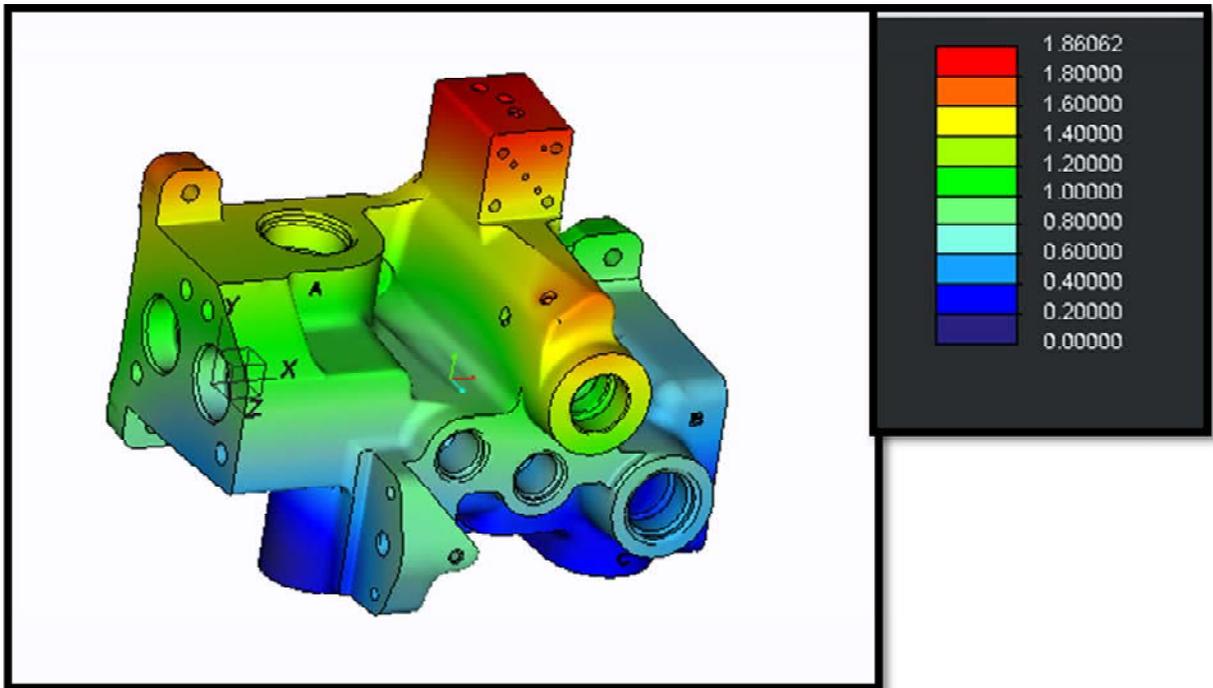
Figura 35 - Configuração da Simulação



Fonte: Autoria Própria

1. **Método De Visualização Utilizado: Displacement**
2. **Componente de visualização: Magnitude**
3. **Unidade: milímetro**

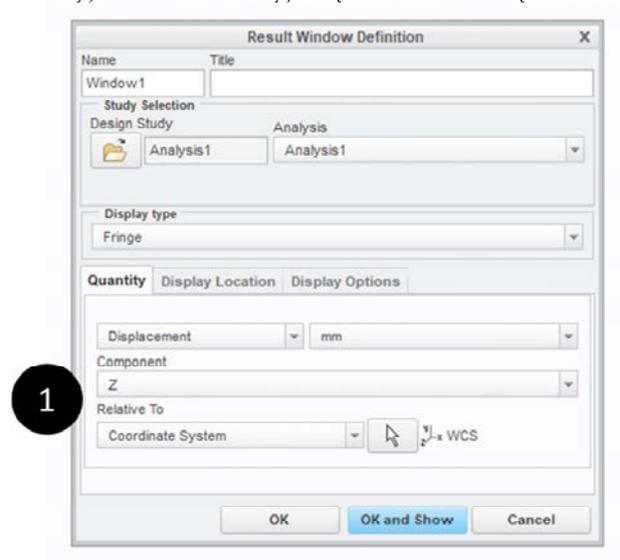
Figura 36 - Resultados da Simulação (Magnitude)



Fonte: Autoria Própria

Também foi utilizado como critério de análise o componente do eixo Z. O resultado obtido por essa simulação está representado na figura 38

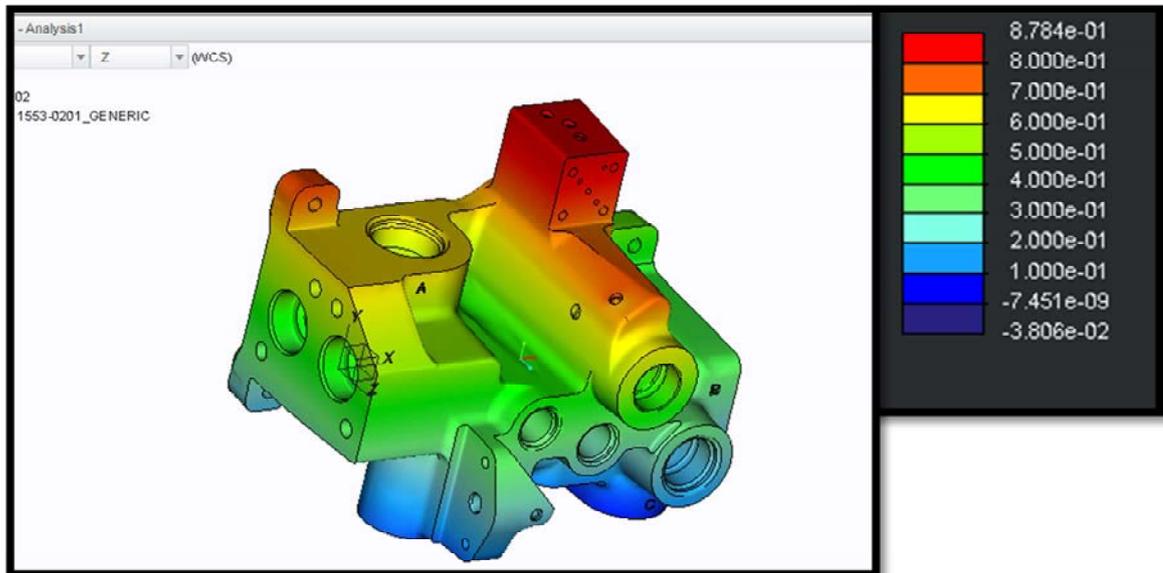
Figura 37 - Configuração da Simulação



Fonte: Autoria Própria

1. Componente de visualização: Eixo Z

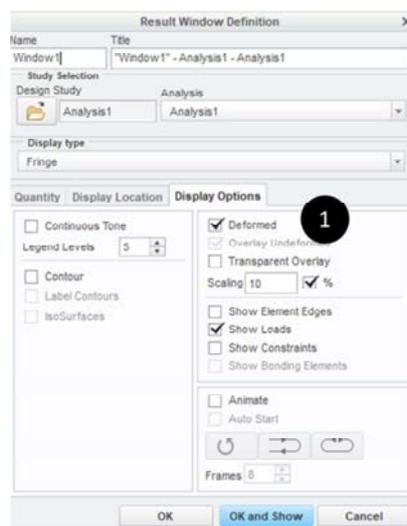
Figura 38 - Resultados da simulação (eixo z)



Fonte: Autoria Própria

É possível entender o comportamento do produto durante a montagem ao ativar a opção “deformed” no modo de visualização da simulação:

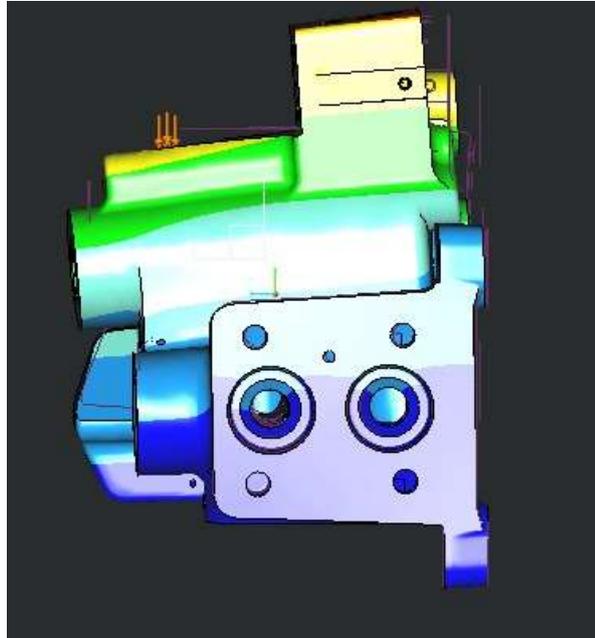
Figura 39 - Menu de configuração



Fonte: Autoria Própria

1. Ativação da opção “Deformed”

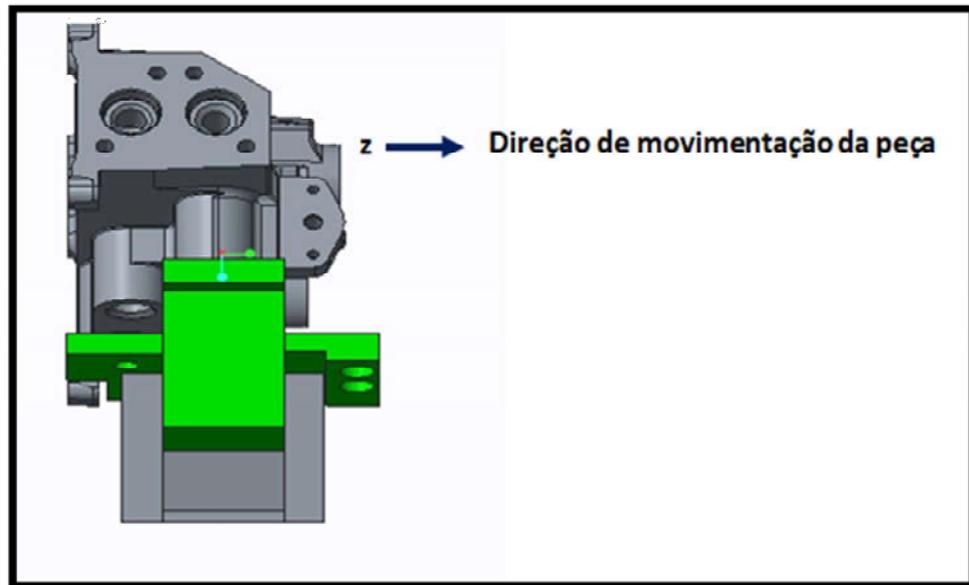
Figura 40 - Deformação



Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos através da simulação são próximos do comportamento observados durante a montagem. Durante a montagem do furo estudado a peça tende a se movimentar na direção que está representado pelo eixo Z.

Figura 41 - Representação do deslocamento observado durante a montagem

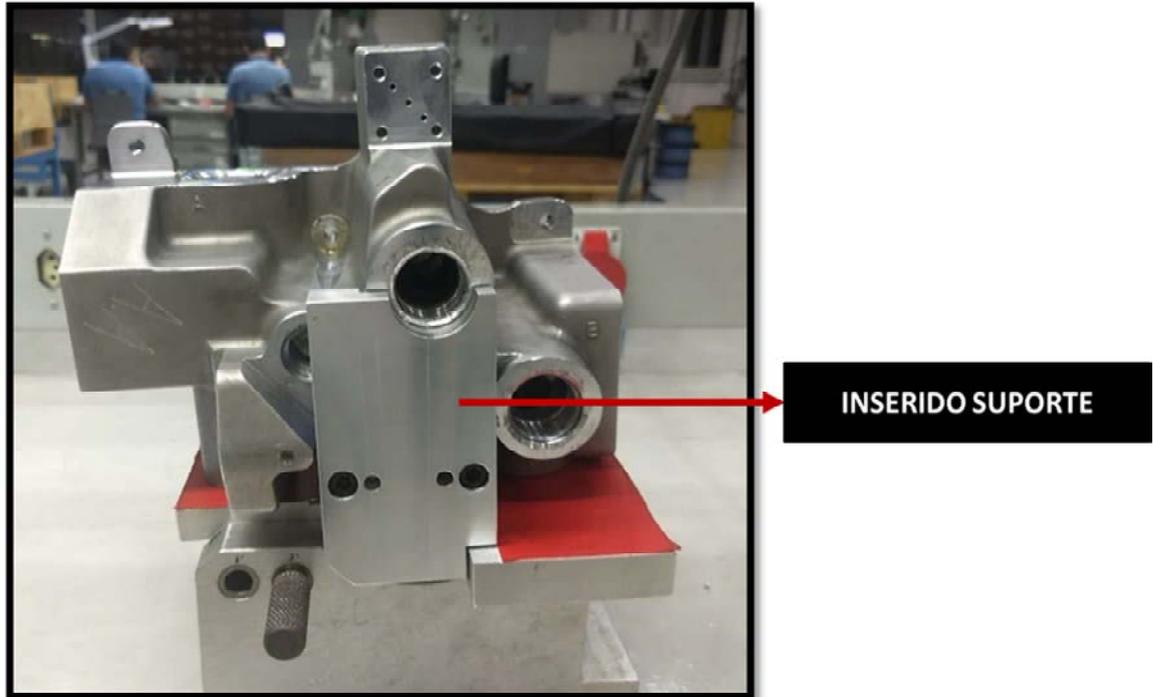


Fonte: Autoria Própria

4.3.MODIFICAÇÕES NO DISPOSITIVO

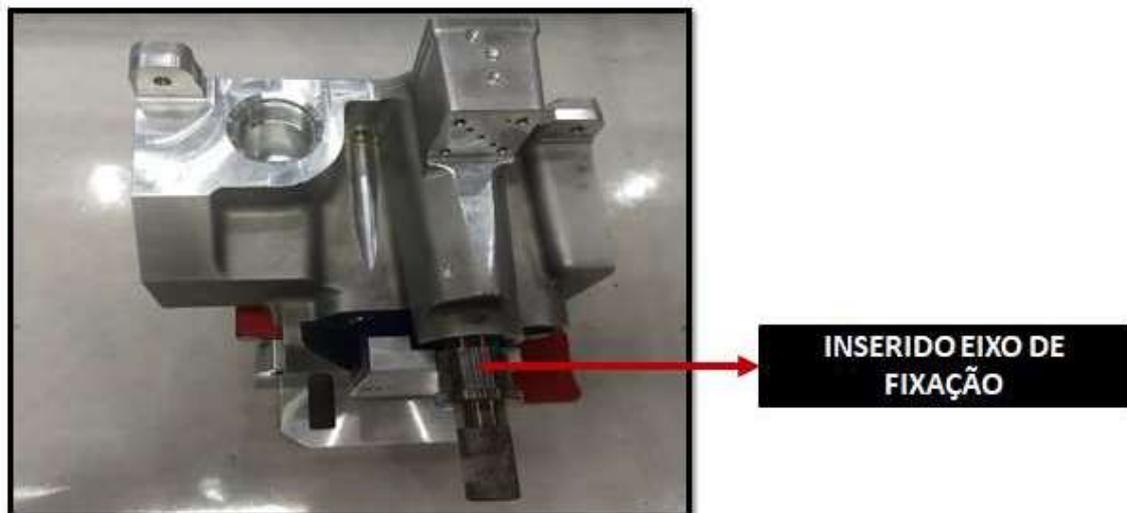
Para minimizar a movimentação do produto durante a montagem, foram implementadas algumas melhorias no dispositivo para aumentar o apoio do produto no dispositivo de fixação. As modificações no dispositivo estão representadas pelas figuras 42 e 43. Após as melhorias, foi realizada uma nova uma simulação para estudo do comportamento do produto.

Figura 42 - Modificações no Dispositivo atual



Fonte: Autoria Própria

Figura 43 - Modificações no dispositivo atual

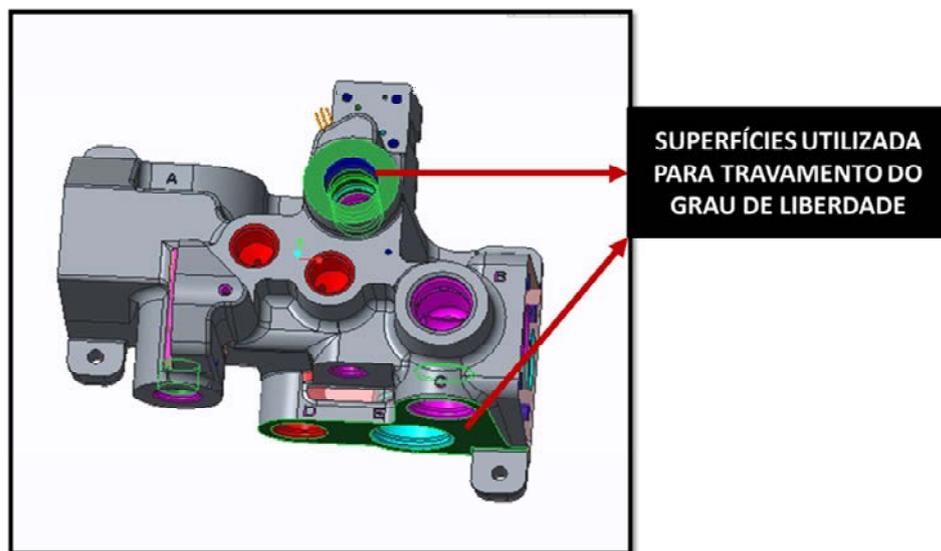


Fonte: Autoria Própria

4.3.1. Definição dos graus de liberdade

Utilizando o mesmo critério citado no item 4.2.1 foram adicionados ao intertravamento dos graus de liberdade as superfícies do produto que estão em contato com o dispositivo. As superfícies destacadas em verde na figura 42 representam as superfícies selecionadas na definição dos graus de liberdade.

Figura 44 - Seleção dos Graus de Liberdade

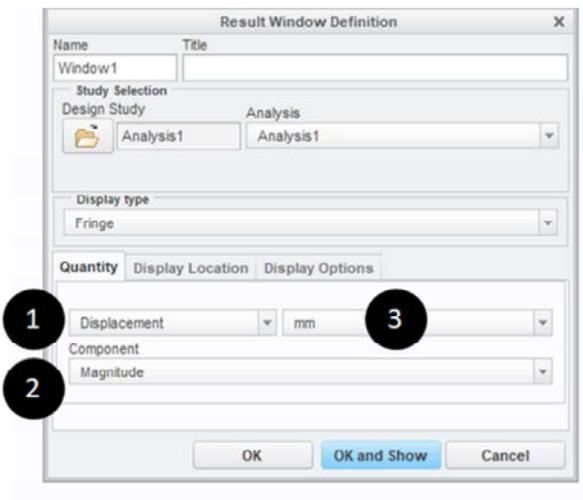


Fonte: Autoria Própria

4.3.2. Simulação dos esforços

Foram utilizados os mesmos critérios do item 4.2.3 para a visualização das simulações. As figuras 45 e 46 mostram os resultados da nova simulação.

Figura 45 –Configuração da Simulação



Fonte: Autoria Própria

1. **Método De Visualização Utilizado: Displacement**
2. **Componente de visualização: Magnitude**
3. **Unidade: milímetro**

O resultado obtido pela simulação analisada em termos de magnitude está representado na figura 44

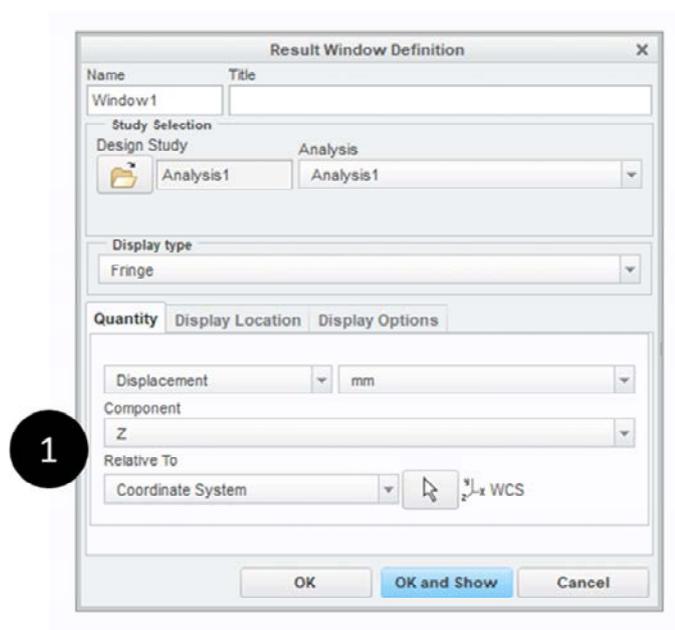
Figura 46 - Resultado da Simulação (Magnitude)



Fonte: Aatoria Própria

A Figura 47 representa a configuração da simulação na componente do eixo Z.

Figura 47 - Configuração da Simulação

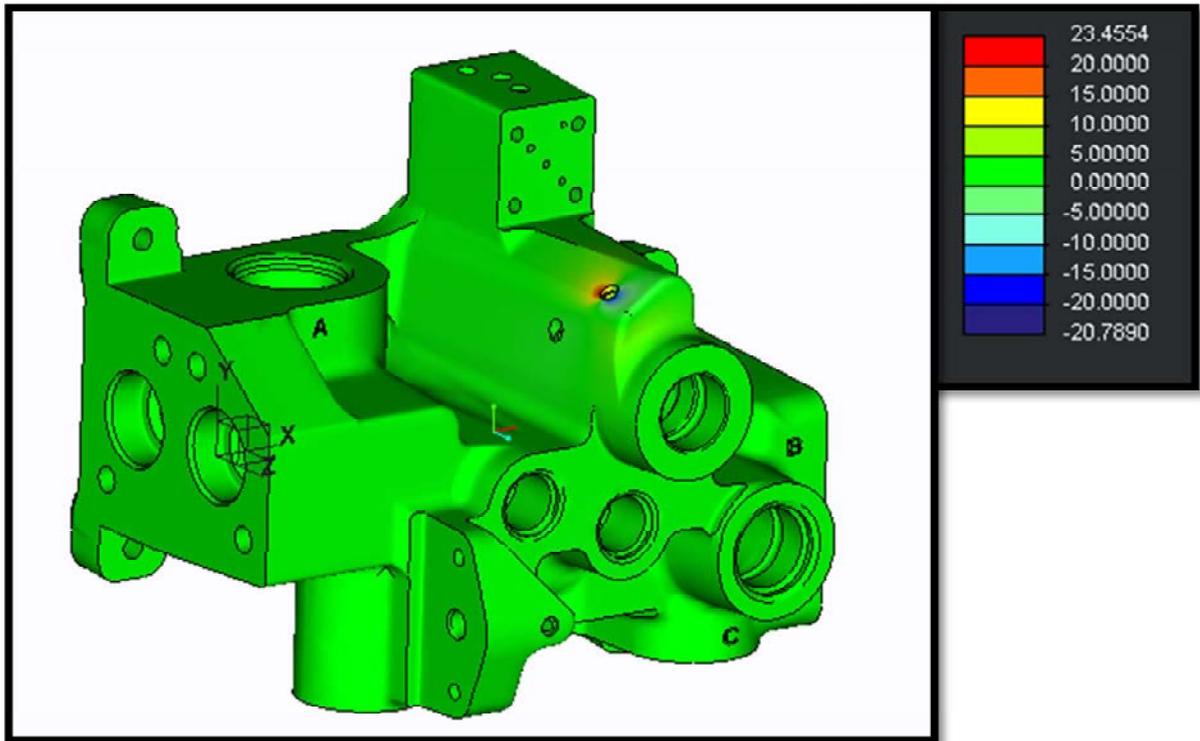


Fonte: Aatoria Própria

1. Componente de visualização: Eixo Z

O resultado obtido pela simulação analisada em termos do eixo z está representado na figura 48.

Figura 48 - Resultado da Simulação (eixo Z)



Fonte: Autoria Própria

5. DISCUSSÕES

A tabela 1 compara os resultados obtidos quanto aos deslocamentos antes da implementação das melhorias e após as melhorias serem implementadas no dispositivo:

Tabela 3 - Comparação dos deslocamentos

	DESLOCAMENTO ANTES DAS MELHORIAS	DESLOCAMENTO APÓS AS MELHORIAS
MAGNITUDE	1,86mm	0mm
EIXO Z	0,84mm	0mm

Fonte: Autoria Própria

Comparando os resultados obtidos pela simulação e o comportamento do produto durante a montagem, pode-se perceber que as melhorias implementadas foram satisfatórias no processo de montagem e o resultado obtido da simulação refletiu com satisfação o comportamento real do produto.

Consolidando o método para validação dos dispositivos de fixação, é possível prever o comportamento do produto e minimizar os erros de projeto que acarretam em atraso no lead time do produto e aumento dos custos devido ao retrabalho.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo possibilitou, através da análise de um dispositivo piloto, o desenvolvimento de uma metodologia de validação dos dispositivos de fixação para a montagem mecânica de peças do setor aeronáutico.

Para o desenvolvimento do estudo, foi selecionado um produto já existente que apresentava problemas durante a montagem. Foi possível reproduzir o comportamento do produto durante a simulação e, posteriormente, o comportamento do produto após as modificações implementadas no dispositivo.

Dessa maneira, a simulação do dispositivo durante a fase do projeto contribuirá para entender se os modos de fixação escolhido são suficientes para assegurar a montagem das peças. Dessa maneira será possível validar o projeto com maior assertividade, evitando retrabalhos após a sua concepção.

Através da metodologia, foi possível simular as condições de montagem e prever o comportamento do produto. Ao decorrer do trabalho, foram estabelecidos critérios que serão padronizados para futuras análises.

REFERÊNCIAS

BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R. Mecânica dos materiais: 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 800 p.

JUVINAL, R. C.; MARSHEK, K. M. Projeto de componentes de máquina: 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 518 p.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G; Projetos de Engenharia mecânica. 7. ed. Porto Alegre : Bookman, 2005. 960 p.

NORTON, R. L. Projeto de máquinas. 4. ed. Porto Alegre : Bookman, 2013. 1055 p.

CALLISTER JUNIOR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 4. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2002. 620 p.

THE LEE COMPANY TECHNICAL CENTER. Technical hydraulic handbook. 11. ed. Connecticut , 2009. 620 p.

KOJIMA, Y. Mechanical CAE in automotive design. R&D Review of Toyota CRDL. v. 35, n. 4, 2000.

SILVA, F. M. O cad aplicado ao projeto do produto: o ponto de vista dos designers industriais. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro , Rio de Janeiro , 2011.

CELANI, G. et al. Integração de tecnologias CAD/CAE/CAM no ateliê de arquitetura: uma aplicação no projeto de edifícios altos. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Carlos. v.12 n.1, p. 29-52, jan/abr, 2017.