



# **Tensões Residuais em Soldas de Estruturas Aeronáuticas: Análise de como Afetam a Durabilidade e a Segurança**

**Enzo Buldrini Contarini**  
**[contarini.e@aluno.ifsp.edu.br](mailto:contarini.e@aluno.ifsp.edu.br)**

**Giovana Carvalho Viana**  
**[viana.c@aluno.ifsp.edu.br](mailto:viana.c@aluno.ifsp.edu.br)**






# Introdução: A importância da Segurança

-  Problemas das tensões residuais geradas em processos de soldagem em estruturas aeronáuticas e seu impacto na segurança e durabilidade.
-  Caso Piper PA-46 Malibu.




# Caso Piper PA-46 Malibu


-  A investigação apontou fadiga em solda mal executada no berço do motor, fundamental para o trem de pouso
-  Soldas introduzem tensões residuais que comprometem a integridade do avião.
-  A segurança aeronáutica depende rigorosamente da análise destas tensões





# Objetivo




 **Objetivo geral:** Analisar e sintetizar o conhecimento e formação de tensões residuais em juntas soldadas de materiais aeronáuticos, principalmente alumínio e titânio.

 **Objetivos específicos:**

- Discutir mecanismos de formação;
- Avaliar impacto na fadiga e fratura;
- Apresentar técnicas de medição (DRX, Ultrassom);
- Propor métodos de mitigação (shot peeing);




# Conceitos de Falha


-  O termo falha possui uma ampla definição, não somente o caso de ruptura ou fratura de algum material. Abrange qualquer alteração que impede o componente de cumprir, de maneira satisfatória, sua função.
-  Os principais tipos de falhas mecânicas para solda são:
  - Falha por deformação
  - Falha por fadiga
  - Falha por corrosão/desgaste
  - Falha por ruptura
-  Compreender que existem essas falhas é o primeiro passo para evitar problemas com as soldas no campo aeronáutico.







# Fadiga

 A fadiga é um processo de dano localizado progressivo que ocorre em materiais com processo a deformações cíclicas. É a principal falha que deve ser evitada na indústria aeronáutica, dado que os aviões são constantemente expostos a deformações cíclicas (rajadas de ventos, manobras).

 **Progresso da Fadiga:**  
Estagio I – Nucleação da trinca: Trincas microscópicas que geram nos pontos de alta concentração na superfície do componente.  
Estagio II – Propagação da trinca: Assim a trinca começa a se propagar, porém apresentam as “marcas de praia” (visíveis a olho nu), e também as estrias (visíveis a microscópios).  
Estagio III – Fratura final (Ruptura): Ocorre quando a estrutura remanescente não é mais capaz de suportar a carga aplicada a ela.






# Concentradores de Tensão

-  Concentradores de tensão são locais preferenciais para a nucleação de trincas. Depende principalmente da geometria da peça, cantos vivos, raios de concordância pequenos e defeitos agudos resultam em valores de concentração mais elevados.
-  Nas soldas a transição geométrica do metal de solda para o metal de base é um dos mais severos concentradores de tensão encontrados na engenharia. Tornando-se um ponto de partida fácil para falhas por fadiga.



# Mecânica da Fratura

-  A mecânica da fratura estuda os componentes que já possuem uma fratura existente nele. Este estudo é feito para que possa evitar a ruptura neste tipo de componente
-  Este estudo quantifica a relação entre a tensão aplicada, o tamanho do defeito, a resistência intrínseca do material à propagação de uma trinca.
-  Cada material possui sua própria resistência intrínseca, essa propriedade é chamada de tenacidade a fratura. A tenacidade a fratura é o valor crítico de propagação da tensão, que ao ser atingido pode gerar a propagação da trinca de forma rápida e instável.





# Processos de Fabricação



## Usinagem:

Rugosidade e Marcas de Usinagem: A ação de corte inevitavelmente deixa marcas e vales microscópicos na superfície usinada. Essas irregularidades, que compõem a rugosidade da superfície, atuam como microconcentradores de tensão.

Tensões Residuais de Usinagem: Tensões de tração na superfície são extremamente danosas, pois se somam às tensões de serviço, acelerando a iniciação e propagação de trincas de fadiga. Por outro lado, tensões de compressão são benéficas



# Processos de Fabricação



**Shot Peening:** O shot peening é um processo de tratamento superficial de trabalho a frio, projetado especificamente para aumentar a resistência à fadiga de componentes metálicos.

**Mecanismo de Ação:** Ele consiste em bombardear a superfície de uma peça com um fluxo de pequenas esferas, gerando uma deformação plástica localizada na camada superficial. O material logo abaixo da superfície, que não sofre deformação plástica, exerce uma força para restaurar a superfície à sua forma original. Essa interação entre a camada superficial "esticada" e o núcleo elástico subjacente resulta na criação de uma camada com alta magnitude de tensão residual de compressão

**Benefícios para a Resistência à Fadiga:**

**Aumento da Vida em Fadiga:** Torna-se muito mais difícil nuclear uma trinca.

**Aumento da Tolerância ao Dano:** Retarda a propagação de trincas pequenas que possam existir.

**Mitigação de Concentradores de Tensão:** O processo é eficaz em neutralizar os efeitos nocivos de marcas de usinagem, pequenos riscos e outros defeitos superficiais.



# Simulação por Elementos Finitos (FEA/MEF)

## Difração de Raios-X (DRX)



### Simulação (FEA/MEF)

Função: Prever o comportamento de sistemas complexos (ex: juntas soldadas) separando-os em “elementos finitos”.

Aplicação em Soldagem: Simulação termo-mecânica acoplada para prever a distribuição e magnitude das tensões residuais de soldagem (evitando picos de tração antes da produção).



### Medição Experimental (DRX) :






Função: Técnica de referência não-destrutiva para medir tensões residuais.

Princípio: Baseado na Lei de Bragg. Mede a alteração no espaçamento atômico do material (que funciona como um "calibrador de deformação") para calcular a tensão.

Uso: Validar resultados de FEA e quantificar a camada compressiva do shot peening



# Ultrassom

-  O método ultrassônico é uma técnica não destrutiva (END) para medir tensões residuais, baseada no efeito acustoelástico.
-  Princípio: A velocidade da onda ultrassônica muda conforme o estado de tensão do material: Tração: Velocidade diminui. Compressão: Velocidade aumenta.
-  Técnica Chave: Utiliza Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (LCR), que se propagam paralelamente à superfície.
-  Vantagem: Portátil, não destrutivo e versátil para geometrias complexas.
-  Desafio: Requer calibração cuidadosa, pois é sensível a variações microestruturais do material.



# Materiais e Métodos



Preparação da amostra e os procedimentos laboratoriais utilizados para investigar a falha por fadiga.

1. Componente Analisado Material: Junta soldada de topo (butt joint) de liga de Alumínio 2024-T3 (6 mm de espessura).
2. Importância: Escolha primária para estruturas aeronáuticas críticas devido à sua alta resistência mecânica e tenacidade à fratura.
3. Processo de União: Soldagem por Fricção e Mistura (FSW).
4. Amostra de Ensaio: Foram extraídos corpos de prova transversais ao cordão, seguindo a norma ASTM E466 para ensaios de fadiga



# Materiais e Métodos



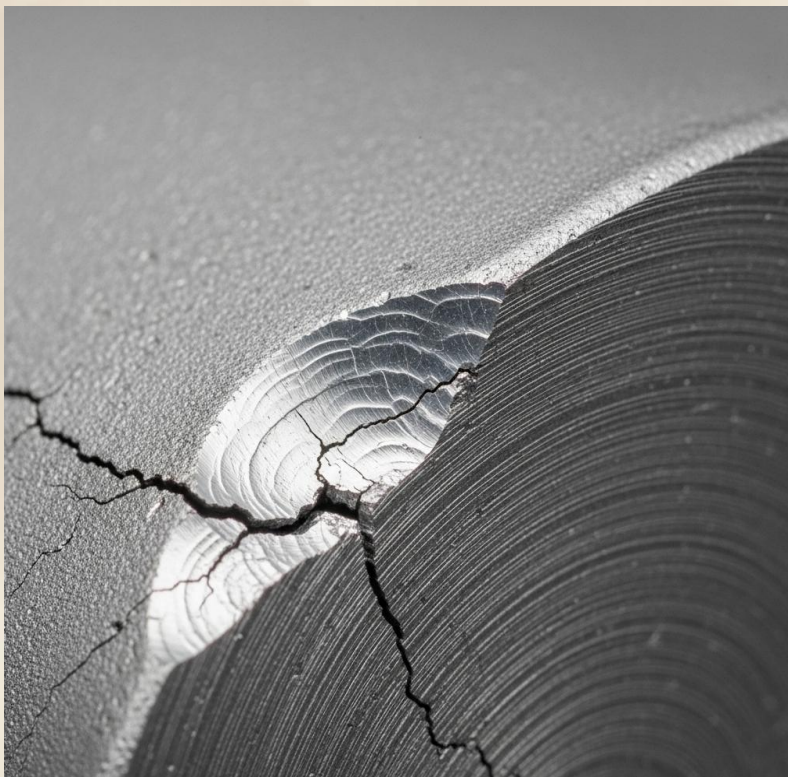
Procedimentos Realizados: Os procedimentos foram focados em caracterizar a microestrutura e o mecanismo de falha:

1. Análise Visual e Estereoscópica (10x): Inspeção macroscópica da superfície de fratura para localizar a origem da falha e identificar características macroscópicas (ex: deformação plástica).
2. Análise Metalográfica: Preparação padrão e ataque com Reagente de Keller. Objetivo: Caracterizar e delimitar as diferentes zonas da solda FSW: Nugget, ZTMA e ZTA.
3. Análise Fractográfica via MEV: Uso do Microscópio Eletrônico de Varredura para investigação detalhada da topografia da fratura.
4. Foco: Identificar o sítio de nucleação da trinca de fadiga, mapear a propagação através das estrias de fadiga e caracterizar a morfologia da fratura final.

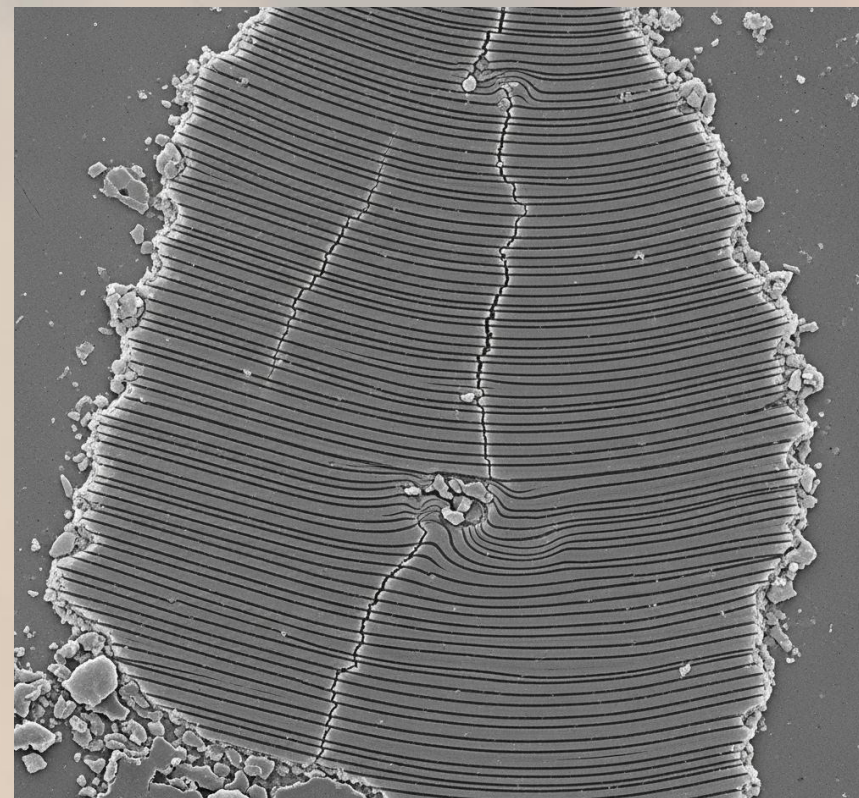




# Resultados e Discussão





Apresenta as imagens e os dados obtidos na análise visual.



Apresenta as imagens do MEV mostrando as marcas de praia típicas da fadiga.



# Conclusões

-  Síntese: A falha foi inquestionavelmente por fadiga, e a rugosidade da usinagem foi a causa raiz da nucleação. Isso reforça que mesmo processos de soldagem de alta qualidade (como o FSW) não compensam um acabamento superficial deficiente.
-  Recomendação: A solução mais eficaz é a aplicação de Shot Peening após a usinagem. Isso irá introduzir a camada protetora de tensões residuais de compressão, garantindo maior vida útil em fadiga e segurança estrutural, neutralizando o efeito de pequenos defeitos superficiais inevitáveis.

**Obrigado Pela Atenção**

