

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

Giovana Carvalho Viana
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, porem 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 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
- A Este estudo quantifica a relação entre a tensão aplicada, o tamanho do defeito, a resistência intrínseca do material à propagação de uma trinca.
- A Cada material possui sua própria resistência intrínseca, essa propriedade é chamada de tenacidade a fratura. A tenacidade a fratura é o valor critico de propagação da tensão, que ao ser atingido pode gerar a propagação da trinca de forma rápida e instável.



Processos de Fabricação

A 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

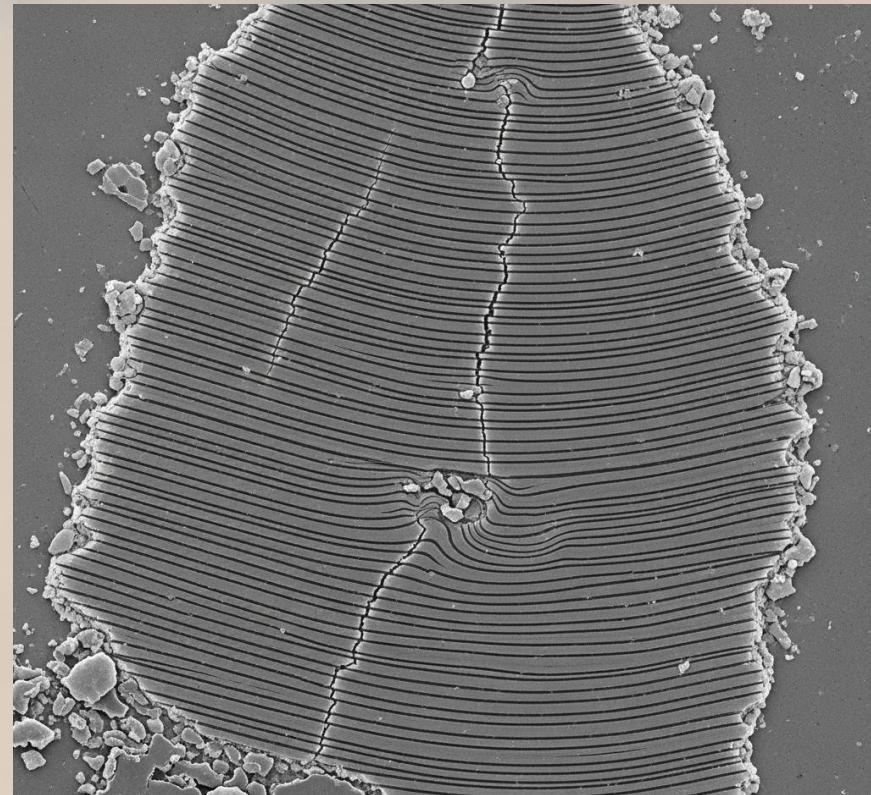
PROCEDIMENTOS REALIZADOS: Os procedimentos foram focados em caracterizar a microestrutura e o mecanismo de falha:

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

