

PARTE 5: DESENVOLVIMENTOS RECENTES



OS MÉTODOS TRADICIONAIS DE ANÁLISE EM FADIGA

Considerações Gerais:

- Os métodos S/N, ϵ /N e o baseado na MFEL têm suas vantagens e desvantagens.
- Deve-se ter em mente alguns pontos ao se comparar os métodos:
 - Quando usados na fase de projeto, **têm o mesmo objetivo**, que é relacionar o comportamento de pequenos corpos-de-prova de laboratório com grandes componentes ou estruturas.
 - A fase inicial de projeto (dimensionar um componente empregando dados básicos do material) geralmente se insere num **ciclo de projeto** mais abrangente que inclui o ensaio dos componentes acabados.
 - **Nenhum método** de análise tem precisão para eliminar completamente a necessidade do ensaio de componentes. Na maioria das situações, o ensaio do componente é eliminado ao se superdimensionar a peça.
 - **Não existe um método “geral”** de análise em fadiga, que seja melhor para todas as situações. Cada técnica tem suas vantagens e limitações.

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TRADICIONAIS

Método S/N:

Pontos Fortes

- Mais simples e fácil de implementar
- Adequado para vidas longas e carregamentos de amplitude constante
- Disponibilidade de dados para diferentes condições de acabamento, etc.

Pontos Fracos

- Método completamente empírico que não considera mecanismos de fadiga
- Não considera o verdadeiro comportamento tensão-deformação do material
- O fato de se assumir o regime elástico impede de modelar tensões residuais resultantes de sequencias de carregamentos.

Aplicação

- Usado em qualquer situação para dar uma estimativa aproximada da vida
- Funciona muito bem em projeto de elementos de máquinas, como eixos de transmissão, molas de válvulas e engrenagens (peças com vidas longas).

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TRADICIONAIS

Método ϵ/N :

Pontos Fortes

- Modela a deformação plástica, mecanismo que leva à iniciação da trinca
- Modela tensões residuais médias resultantes de sequencias de carregamento
- Considera com mais precisão o dano acumulado em carregamento variável
- Pode ser usado em situações de geometrias complexas e altas temperaturas.

Pontos Fracos

- Nível de análise mais complexo; pode requerer cálculo por Elementos Finitos
- Considera somente o período para iniciação da trinca
- Alguns aspectos ainda empíricos (ex.: uso de K_f ou K_t na regra de Neuber).

Aplicação

- Situações com altas tensões ou materiais com baixo limite de escoamento
- Aplicações em temperaturas elevadas, como componentes de turbina a gás, onde a interação fadiga-fluência é importante.

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TRADICIONAIS

Método da/dN (aplicação da MFEL):

Pontos Fortes

- Único método que trata do crescimento das trincas por fadiga; permite calcular a falha devido à ruptura da seção restante numa peça com trinca
- O tamanho da trinca é uma medida física do dano → inspeção não-destrutiva
- Importante na pesquisa de mecanismos reais de fadiga.

Pontos Fracos

- Difícil estimar o **tamanho inicial da trinca** em situações onde não há um defeito iniciador óbvio a ser considerado
- Dificuldade em obter o Fator Intensidade de Tensão em geometrias complexas
- Em certas situações não é válida a consideração da MFEL e conceitos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica são usados; análise mais difícil.

Aplicação

- Em conjunto com inspeção periódica em análises de tolerância ao dano
- Situações em que o componente tem defeitos pré-existent (poros, etc).

IMPORTÂNCIA DA TRINCA INICIAL NA DETERMINAÇÃO DA VIDA

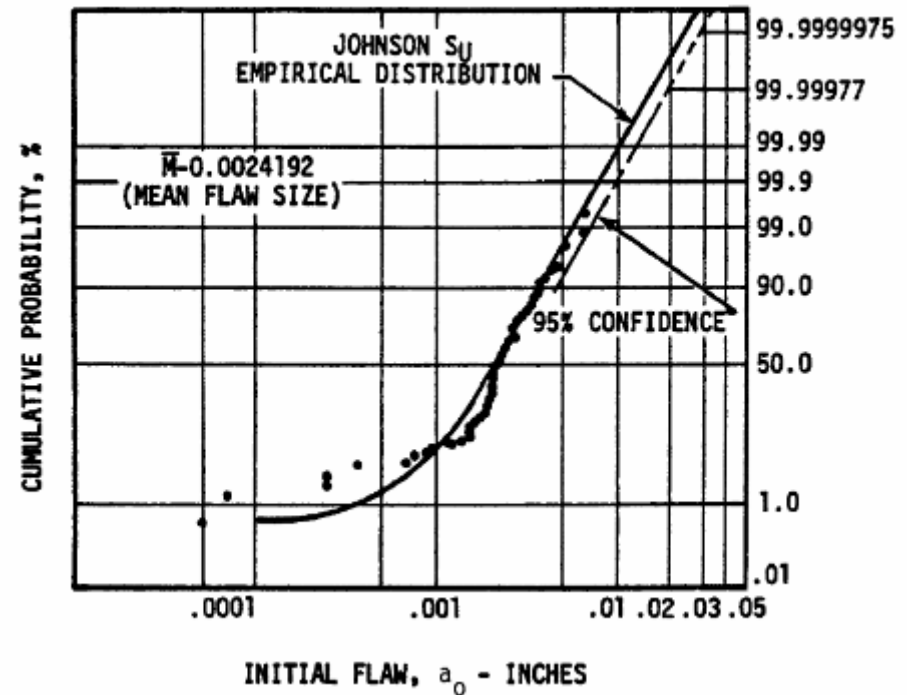
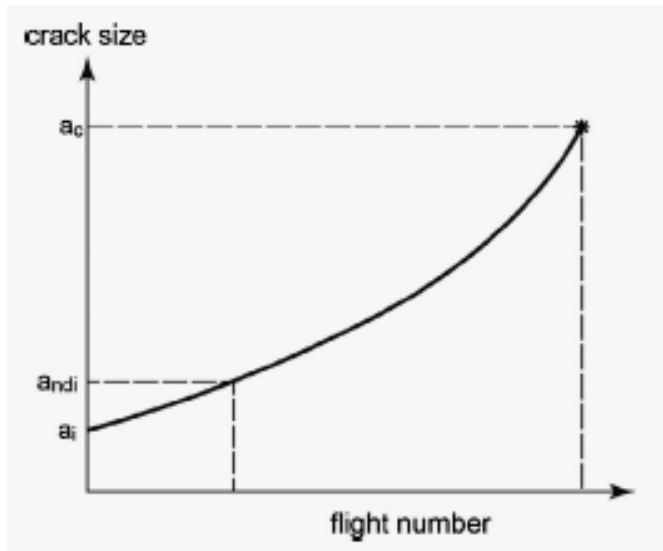
A análise de propagação de trincas é uma etapa fundamental em projetos que adotam a filosofia de tolerância ao dano (ex. indústria aeronáutica), para garantir um plano de manutenção com intervalos de inspeção adequados.

Determinação da vida útil de estruturas aeronáuticas:

- Utilização prevista para a aeronave (espectro de cargas)
- Propriedades de material
 - Curvas de propagação
 - Efeitos de R
 - Efeitos de ambiente
- Análise do Fator Intensidade de Tensão (geometria)
- Distribuição das **trincas iniciais** (tamanho e localização)

IMPORTÂNCIA DA TRINCA INICIAL NA DETERMINAÇÃO DA VIDA

O tamanho da trinca inicial (a_i) é um parâmetro de cálculo essencial para a análise de propagação de trincas.



Norma MIL-A-83444 (USAF, 1974):

- “rogue flaw” = 1,27mm (0,05 in)
- “manufacturing quality flaw” = 0,127 mm (análise de ensaios com aviões F-4)

Esta norma foi descontinuada, mas a maioria dos fabricantes de aviões prosseguem empregando os valores determinísticos que se tornaram consagrados.

DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Trincas presentes no início da vida em fadiga da estrutura são oriundas primordialmente do processo de manufatura. No enfoque determinístico é empregado um único valor para a trinca inicial: 0,127 mm, tradicionalmente assumido como padrão na indústria aeronáutica e tomado como valor de entrada para os cálculos de propagação de trincas.

Sabe-se, no entanto, que os resultados de fadiga apresentam uma dispersão. Sendo as condições de ensaio severamente controladas, tem-se que as características da microestrutura e os defeitos de fabricação concorrem para a natureza aleatória do processo de dano em fadiga.

USAF DTD-HDBK, 2006:

- Propõe emprego de abordagens não-determinísticas
- Trinca inicial não depende só da qualidade da manufatura, mas de características relacionadas ao cenário ou detalhes estruturais.
- Conceito de Trinca Inicial Equivalente (*Equivalent Initial Flaw Size* – EIFS)

NOVAS PROPOSTAS PARA A QUESTÃO DA TRINCA INICIAL

J. D. Mattos. “Aplicação de métodos estatísticos à análise de problemas de Mecânica da Fratura” (dissertação de mestrado, ITA, 2013).

L. Molent, S. Barter, R. Wanhill. “The Lead Crack Fatigue Lifting Framework”, DSTO-RR-0353, Defence Science and Technology Organisation, 2010.



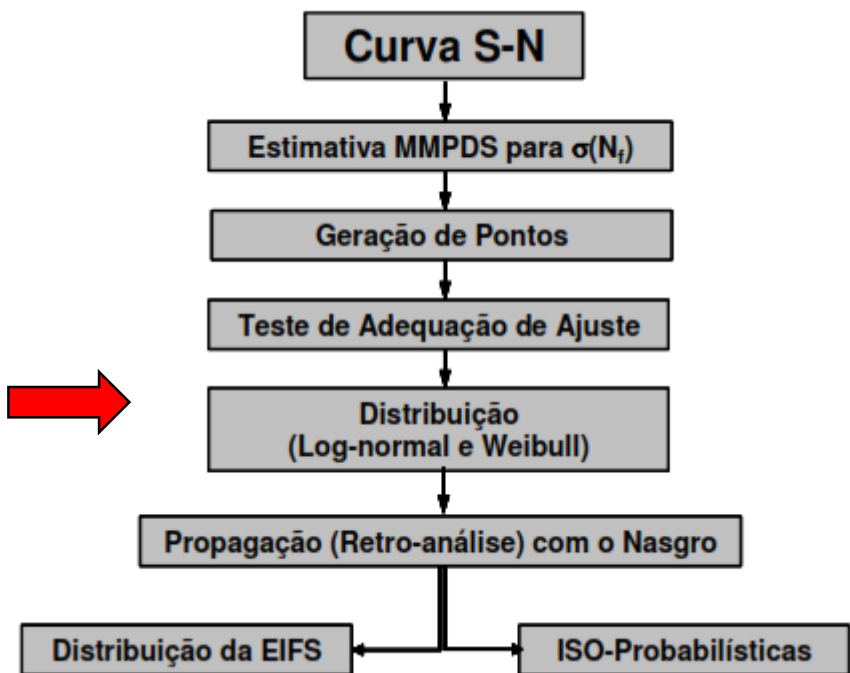
Curso: “Analysis and Prevention of Aircraft Structural Failures”
PPGEM/EEL/USP – 2011
Ministrante: Loris Molent (DSTO)
Coordenador: Carlos Baptista

DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Mattos, J.D. “Aplicação de métodos estatísticos à análise de problemas de Mecânica da Fratura” (dissertação de mestrado, ITA, 2013).

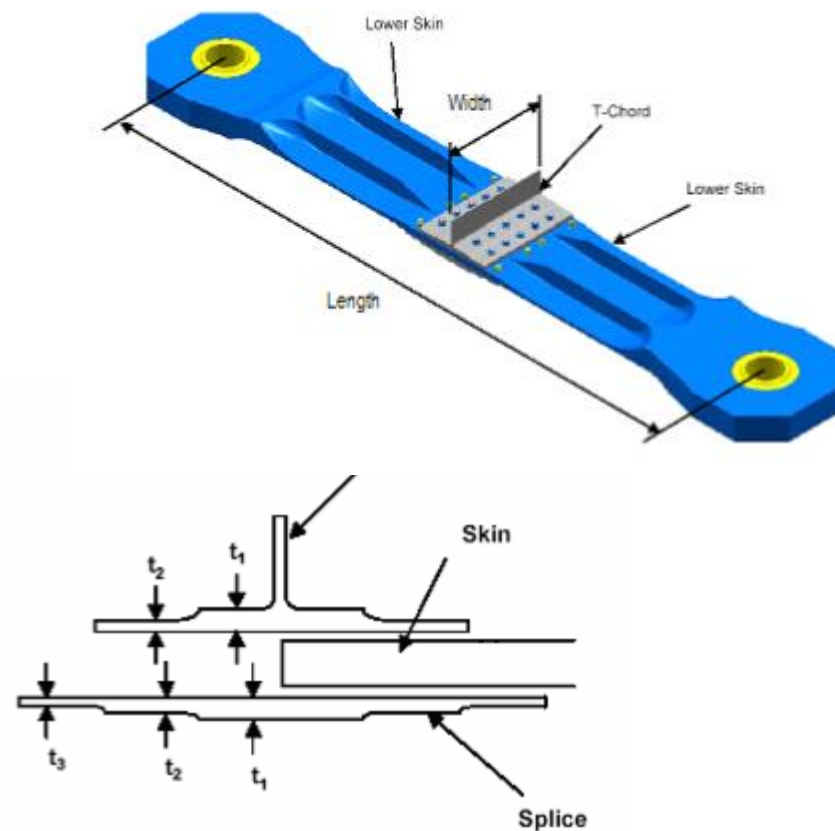
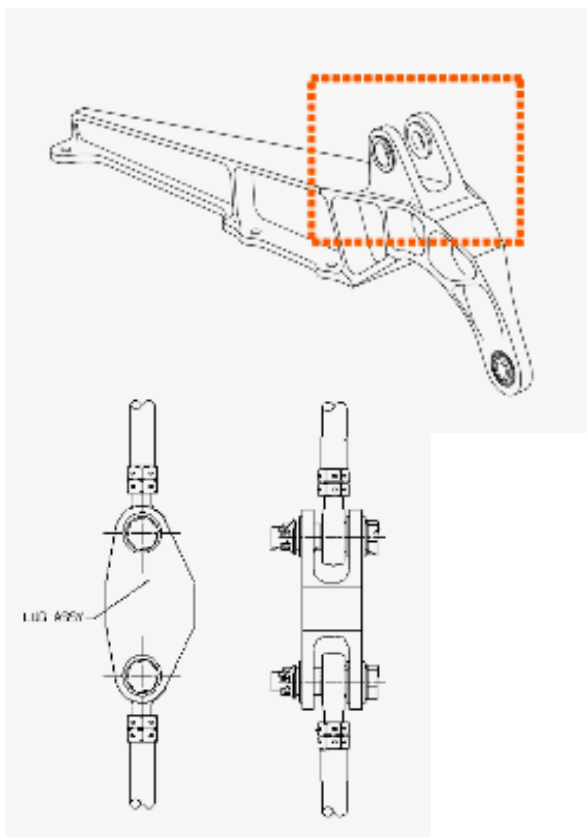
Este trabalho aborda o conceito de EIFS e apresenta uma metodologia para a determinação deste parâmetro. Enfoca a análise probabilística da propagação da trinca e aplica o método proposto a duas configurações práticas.

Fluxograma do método proposto para a abordagem estatística do EIFS



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

No trabalho citado são abordadas duas configurações de engenharia: Um olhal (*lug*) e uma junta de cisalhamento (*shear joint*).



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 1: Curva de Ajuste para os resultados S-N

- Aplicação do método dos mínimos quadrados
- Exemplo de modelo incorporando efeito de R:

$$\text{Log}(N_f) = A_1 + A_2 \cdot \text{Log}(S_{MAX} (1-R)^{A_3})$$

$$\text{Log}(N_f) = A_1 + A_2 \cdot \text{Log}(S_{MAX}) + A_2 \cdot A_3 \cdot \text{Log}(1-R)$$

$$\text{Log}(N_f) = (A_1 + A_2 \cdot A_3 \cdot \text{Log}(1-R)) + A_2 \cdot \text{Log}(S_{MAX})$$

$$\text{Log}(N_f) = A + B \cdot \text{Log}(S_{MAX})$$

ou:

$$q_o = m \cdot q_i + b$$



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Resultados dos ensaios de fadiga para a configuração LUG:

F_{MAX} (daN)	F_{MIN} (daN)	S_{MAX} (MPa)	S_{MIN} (MPa)	Ciclos para Falha	Local da Falha
2003	200,3	113,51	11,35	72109	Lug4
2003	200,3	113,51	11,35	104770	Lug4
2003	200,3	113,51	11,35	57383	Lug3
1760	176,0	99,73	9,97	513333	Lug2
1760	176,0	99,73	9,97	140608	Lug2
1760	176,0	99,73	9,97	217098	Lug4
1760	176,0	99,73	9,97	142004	Lug2
1457	145,7	82,56	8,26	2000000	run-out
1457	145,7	82,56	8,26	158115	Lug3
1457	145,7	82,56	8,26	1439116	Lug2
1305	130,5	73,95	7,40	1430105	Lug2
1305	130,5	73,95	7,40	1425963	Lug1

$$q_o = m \cdot q_i + b$$

$$m = -6,3796$$

$$b = 18,0265$$

(Obs.: desconsiderando o runout).

$$\text{Log}(N_f) = -6,3796 \cdot \text{Log}(S_{max}) + 18,0265$$

DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 2: Estimativa para o desvio-padrão de $\text{Log}(N_f)$:

- Abordagem proposta no MMPDS
(*Metallic Materials Properties Development and Standardization*).
- Para um dado nível de tensão, cada resíduo consiste na diferença, em escala logarítmica, entre a vida obtida no ensaio e a calculada.
- MMPDS assume uma relação inversamente proporcional entre os resíduos e a tensão aplicada.
- O modelo proposto para os resíduos pode ser considerado uma estimativa razoável para o desvio-padrão de $\text{Log}(N_f)$.

$$\frac{|\text{Res}|}{\sqrt{\frac{2}{\pi}}} = S_0 + S_1 \left(\frac{1}{S_{MAX} (1-R)^{A_3}} \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{|\text{Res}|}{\sqrt{\frac{2}{\pi}}} = S_0 + S_1 \left(\frac{1}{(1-R)^{A_3}} \right) \left(\frac{1}{S_{MAX}} \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{|\text{Res}|}{\sqrt{\frac{2}{\pi}}} = S_0 + S_2 \left(\frac{1}{S_{MAX}} \right)$$

Os coeficientes S_0 e S_2 também são determinados pelos mínimos quadrados, resultando em:

$$\begin{cases} S_0 = 0,0290 \\ S_2 = 19,938 \end{cases}$$

DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 3: Geração de pontos

- Uma vez estabelecidas as estimativas para o valor médio e para o desvio-padrão, pode-se estabelecer, para um dado nível de tensão, os parâmetros característicos de uma distribuição Normal de $\text{Log}(N_f)$.
- Para cada nível de tensão de interesse, é gerada uma tabela de pontos S-N.
- Esses pontos apresentam a mesma média e desvio-padrão de $\text{Log}(N_f)$.

Procedimento para a geração dos pontos S-N:

- Inicialmente gera-se uma tabela de números randômicos (entre 0 e 1)
- Em seguida, é feita a padronização deste conjunto (Normal padrão)
- Finalmente é realizada a particularização da amostra para que o conjunto gerado tenha a média e o desvio-padrão do nível de tensão de interesse.

Distribuição normal padrão:

$$Z = (\mu_{AL,j} - \mu_{AL}) / \sigma_{AL}$$

Particularização:

$$Z_{FINAL} = (Z_j \cdot \sigma(\text{Log}(N_f; 10))) + \mu(\text{Log}(N_f; 10))$$

DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Geração de pontos para a configuração LUG (exemplos):

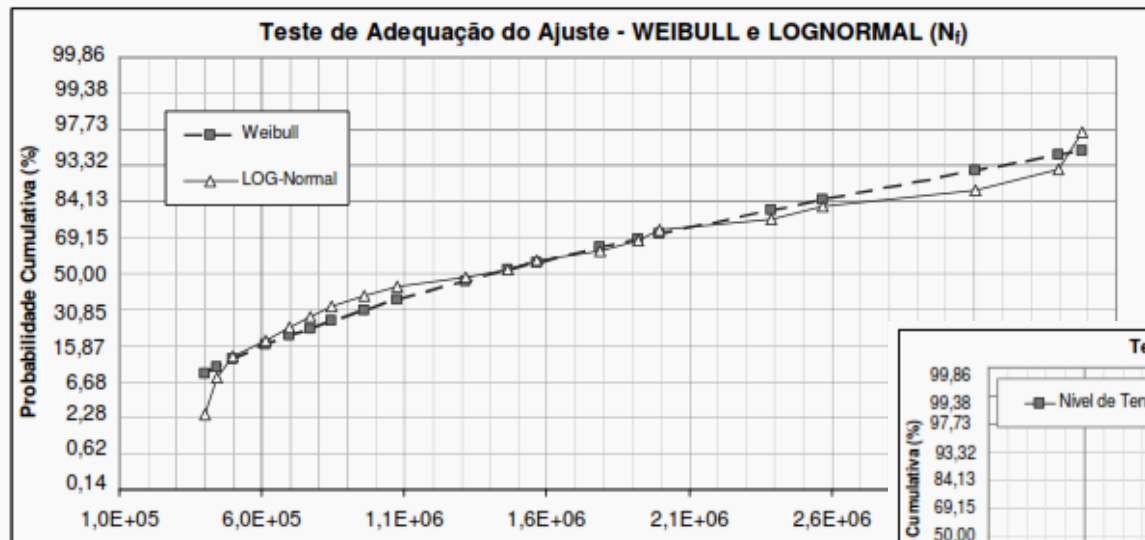
$S_{MAX} = 73,95 \text{ MPa}$				
μ	Log(N)	6,103408		
σ	σ_N	0,298582		
	a)	b)	c)	
Amostra	Aleatório	Z (aleatório padronizado)	Pontos Finais	Nf,j
1	0,008	-1,684	5,600	398561
2	0,055	-1,533	5,646	442196
3	0,110	-1,358	5,698	498643
4	0,205	-1,054	5,789	614896
5	0,261	-0,872	5,843	696466
6	0,307	-0,727	5,886	769738
7	0,348	-0,596	5,926	842551
8	0,406	-0,408	5,982	958332
9	0,458	-0,242	6,031	1074013
10	0,550	0,052	6,119	1315353
11	0,599	0,209	6,166	1464815
12	0,629	0,305	6,194	1564797
13	0,689	0,497	6,252	1785700
14	0,723	0,605	6,284	1922765
15	0,740	0,660	6,301	1997820
16	0,821	0,920	6,378	2387697
17	0,854	1,025	6,410	2567568
18	0,941	1,303	6,492	3107073
19	0,981	1,433	6,531	3398082
20	0,992	1,467	6,541	3478787
$\mu_{ALEATORIO}$		μ_Z	μ_{PONTOS}	
0,534		0,000	6,103	
$\sigma_{ALEATORIO}$		σ_Z	σ_{PONTOS}	
0,312		1,000	0,299	

$S_{MAX} = 82,56 \text{ MPa}$				
μ	Log(N)	5,79815		
σ	σ_N	0,270455		
	a)	b)	c)	
Amostra	Aleatório	Z (aleatório padronizado)	Pontos Finais	Nf,j
1	0,040	-1,633	5,356	227217
2	0,086	-1,487	5,396	248916
3	0,131	-1,339	5,436	272857
4	0,215	-1,068	5,509	323065
5	0,273	-0,882	5,560	362690
6	0,321	-0,728	5,601	399222
7	0,356	-0,614	5,632	428572
8	0,418	-0,414	5,686	485446
9	0,496	-0,164	5,754	567273
10	0,514	-0,105	5,770	588369
11	0,605	0,187	5,849	706091
12	0,642	0,308	5,881	760890
13	0,659	0,361	5,896	786490
14	0,700	0,496	5,932	855601
15	0,773	0,731	5,996	990738
16	0,842	0,954	6,056	1137991
17	0,905	1,155	6,110	1289730
18	0,969	1,362	6,166	1467126
19	0,988	1,423	6,183	1523823
20	0,999	1,459	6,193	1558795
$\mu_{ALEATORIO}$		μ_Z	μ_{PONTOS}	
0,547		0,000	5,798	
$\sigma_{ALEATORIO}$		σ_Z	σ_{PONTOS}	
0,310		1,000	0,270	

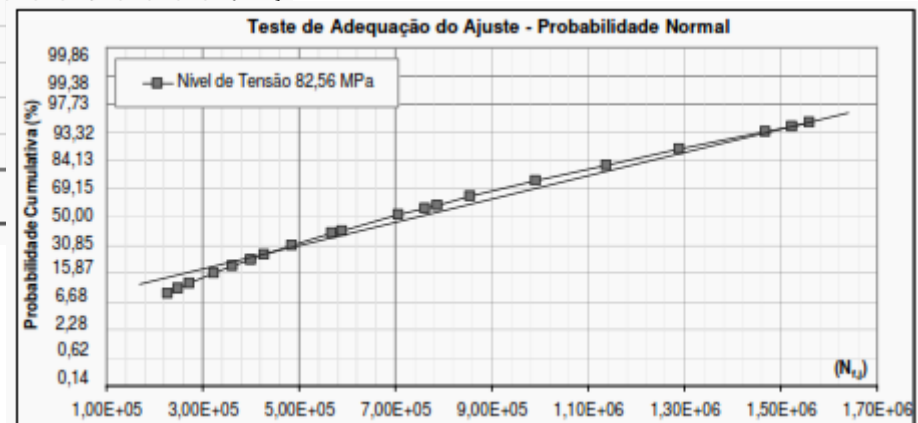
DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 4: Teste de adequação de ajuste para as amostras geradas

- Verificar se as amostras geradas podem representar com qualidade uma distribuição estatística de N_f , ou seja, se apresentam boa adequação de ajuste ao modelo de distribuição estatística que se propõem representar.



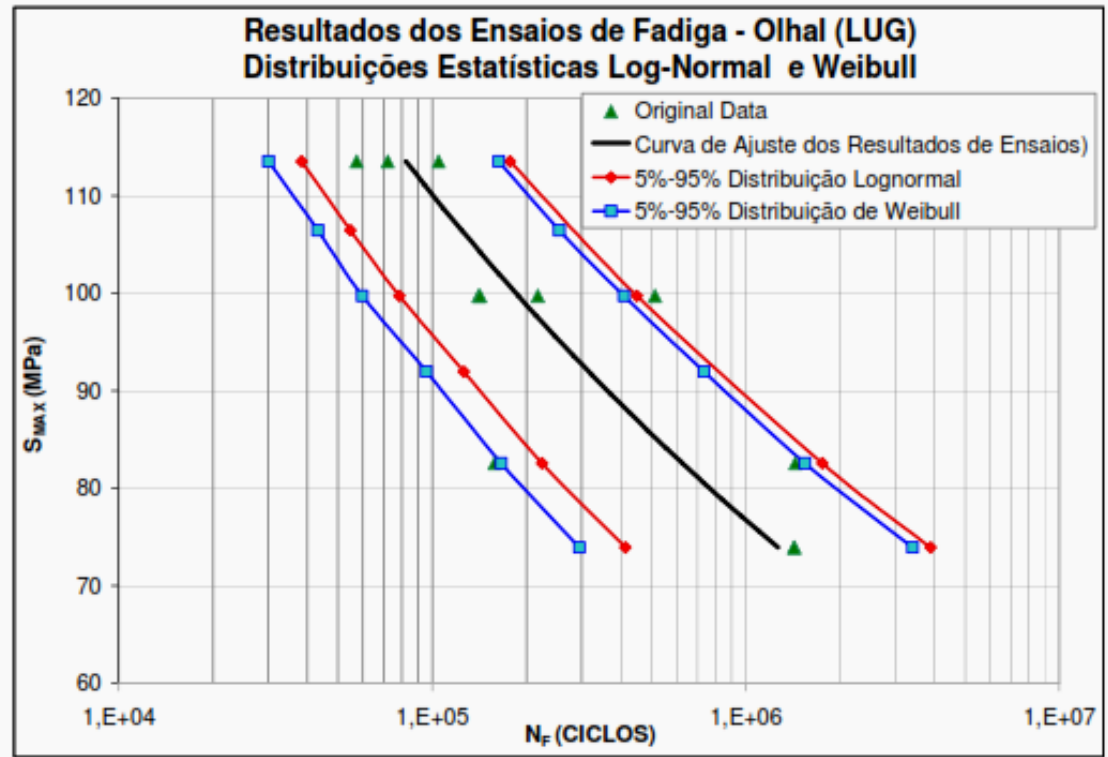
O gráfico de probabilidade é uma técnica muito difundida e baseia-se no exame visual subjetivo dos dados.



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 5: Geração de Distribuições Estatísticas para os níveis de tensão

- Para cada modelo de distribuição, foram determinados os valores de N_f correspondentes a 5% e 95% de probabilidade de ocorrência, para vários níveis de tensão.



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

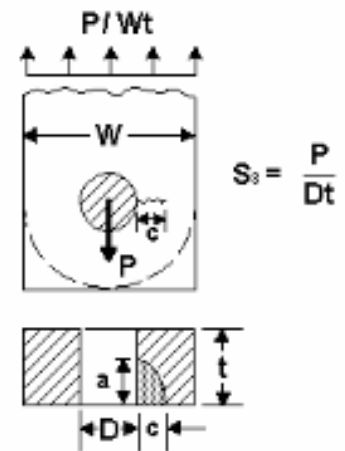
Passo 6: Retro-análise para determinação dos pontos de EIFS

- Inicialmente é definido, dentro das soluções disponíveis no software NASGRO, um modelo com forma e dimensões que simulem a configuração que se deseja analisar, selecionando-se também o material: AA 7475 T7351.
- Simula-se a propagação da trinca, considerando-se diversos valores arbitrados da trinca inicial, que levarão a diferentes números de ciclos para a falha.
- Busca-se obter um valor de trinca inicial que leve a um número de ciclos para falha próximo ao valor de uma das amostras geradas.

Equação NASGRO de propagação da trinca:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{(1-f)}{(1-R)} \Delta K \right)^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q}$$

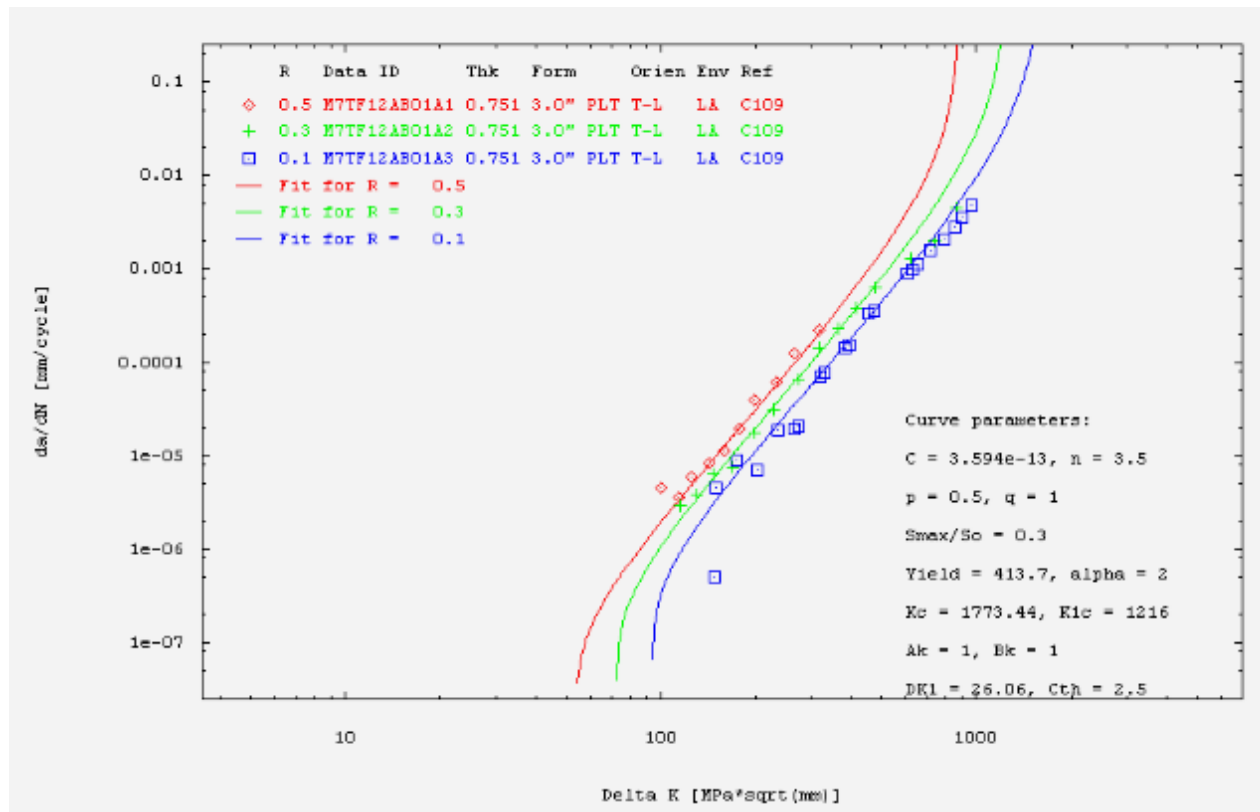
Solução NASGRO para simular a propagação da trinca na configuração LUG:



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Resultados da retro-análise para determinação dos pontos de EIFS:

- Para cada nível de carregamento, arbitrou-se diversos valores da trinca inicial e posteriormente refinou-se o cálculo para uma tolerância de 4% em N_f .



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

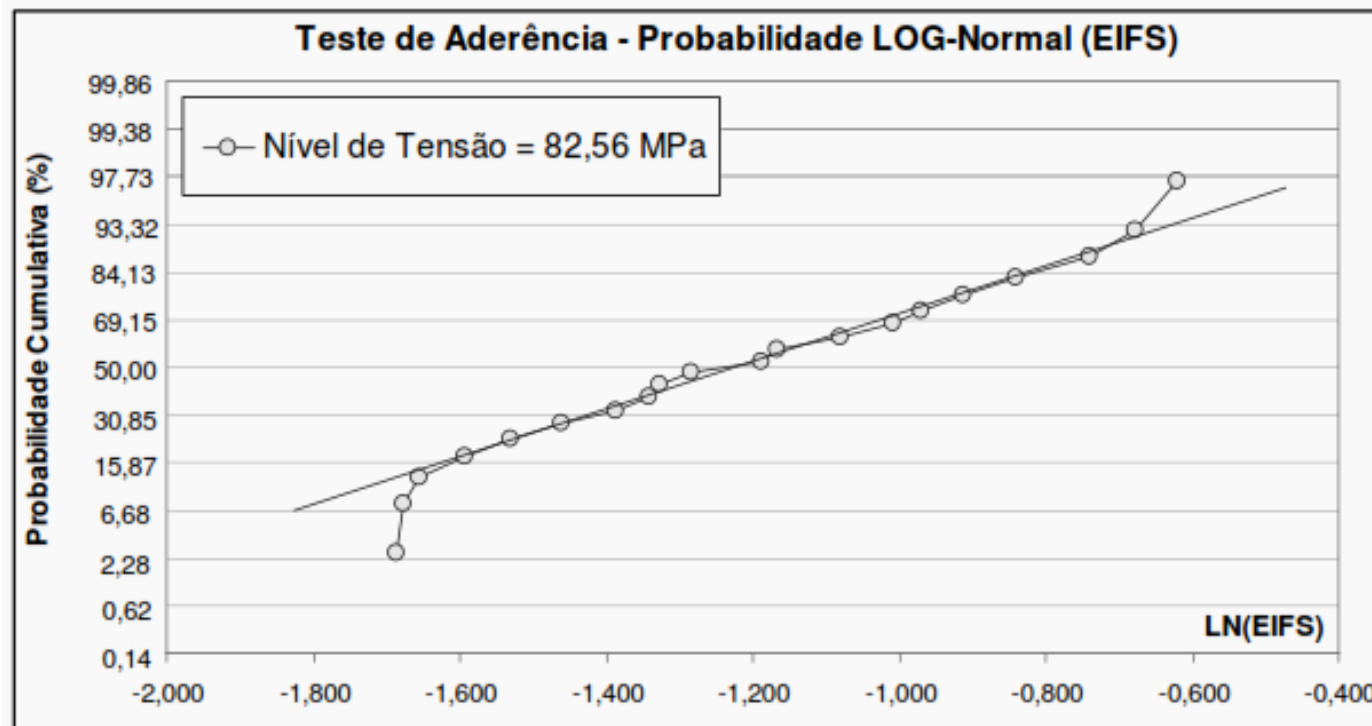
Exemplo: Retro-análise para determinação de EIFS para tensão 82,56 MPa

Nível de Tensão – Carga _{MAX} = 82,56 MPa					
Amostras N _f	Valores Preliminares a _i ARBITRADA X N _i NASGRO		a _i (retro-análise)	NASGRO	Δ %
227217	0,2350	231391	0,2400	228193	0,430
248916	0,1720	285536	0,2100	249389	0,190
272857	0,1640	295053	0,1820	274710	0,679
323065	0,1550	306823	0,1440	323021	-0,014
362690	0,1500	313917	0,1220	363416	0,200
399222	0,1190	370007	0,1070	399872	0,163
428572	0,1060	402653	0,0980	426841	-0,404
485446	0,0715	543753	0,0830	484188	-0,259
567273	0,0700	552911	0,0680	565729	-0,272
588369	0,0690	559230	0,0650	586386	-0,337
706091	0,0488	740182	0,0520	702440	-0,517
760890	0,0464	771804	0,0470	763604	0,357
786490	0,0445	799190	0,0455	784499	-0,253
855601	0,0438	809862	0,0410	856095	0,058
990738	0,0325	1043795	0,0345	991522	0,079
1137991	0,0272	1218474	0,0294	1138505	0,045
1289730	0,0270	1226373	0,0255	1289472	-0,020
1467126	0,0260	1267650	0,0221	1463333	-0,259
1523823	0,0196	1628543	0,0211	1524841	0,067
1558795	0,0195	1636008	0,0206	1557774	-0,066

DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 7: Teste de adequação de bom ajuste para os pontos de EIFS

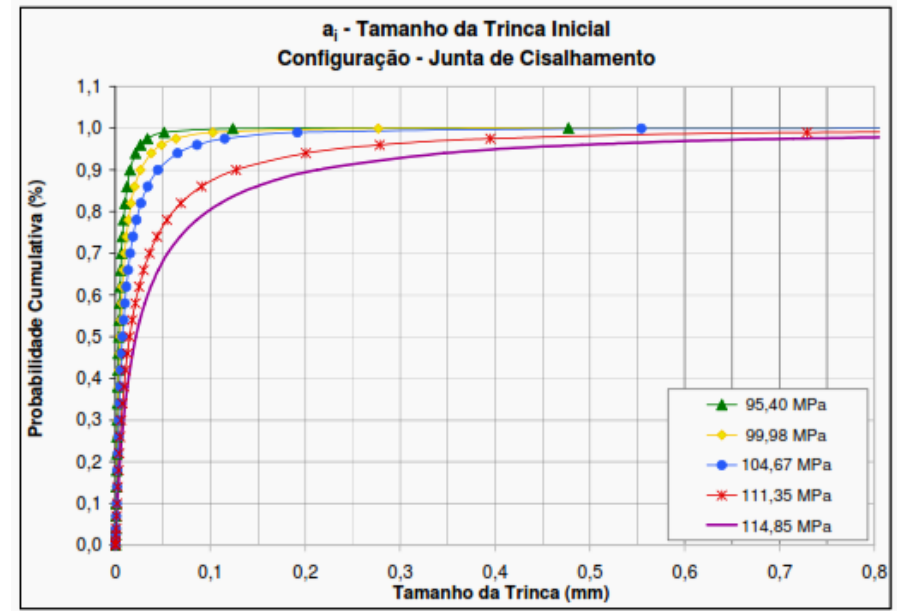
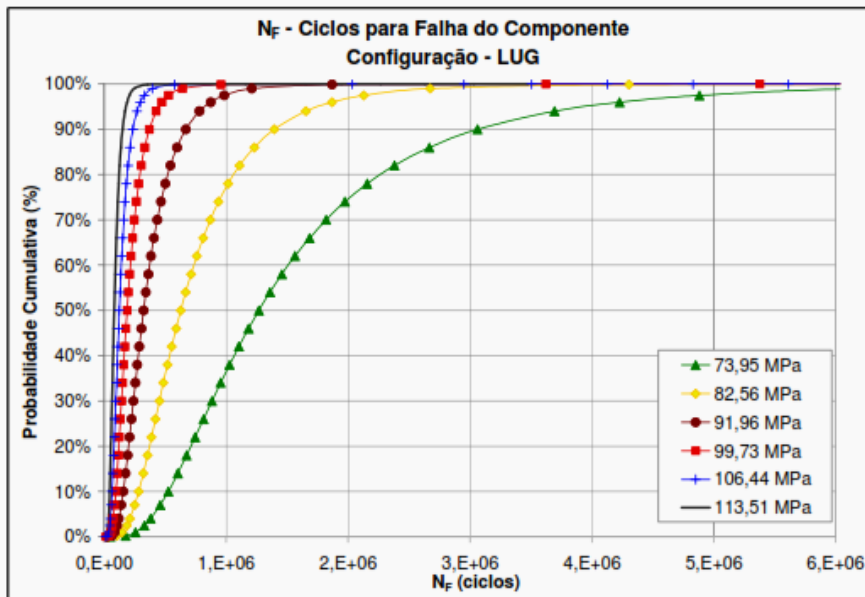
- Verificar se os pontos determinados por retro-análise podem representar com qualidade uma distribuição estatística de EIFS.



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 8: Distribuição de EIFS para cada nível de tensão

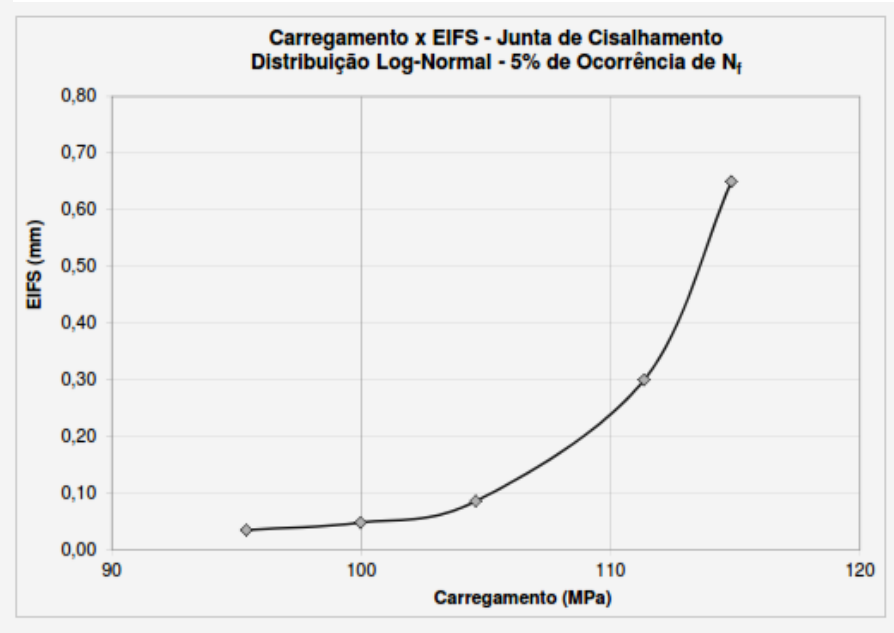
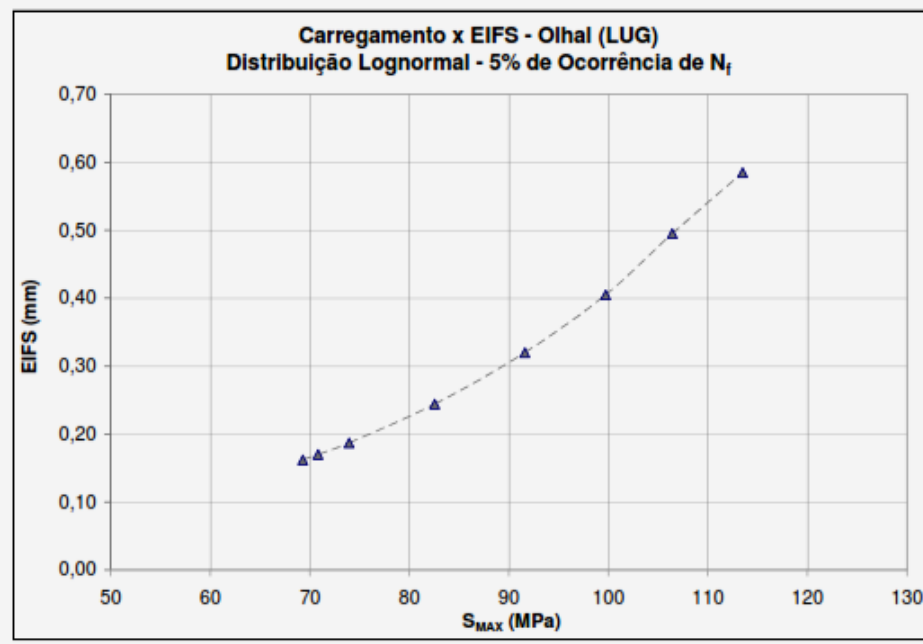
- A partir da distribuição de EIFS, pode-se estabelecer diversos julgamentos de engenharia. Por exemplo, pode-se **verificar se**, para um dado nível de tensão, **o tamanho de trinca inicial equivalente é maior ou menor que o tamanho de trinca inicial adotado no enfoque determinístico.**



DETERMINAÇÃO DA TRINCA INICIAL POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Passo 9: Determinação de curvas Iso-Probabilísticas

- Exemplo: considerando-se 95% de probabilidade de ocorrência de um dado tamanho de trinca inicial equivalente, qual o valor de EIFS para cada nível de tensão ou em função do número de ciclos para falha do componente.



OS CONCEITOS DE “LEAD CRACK” E “EPS”

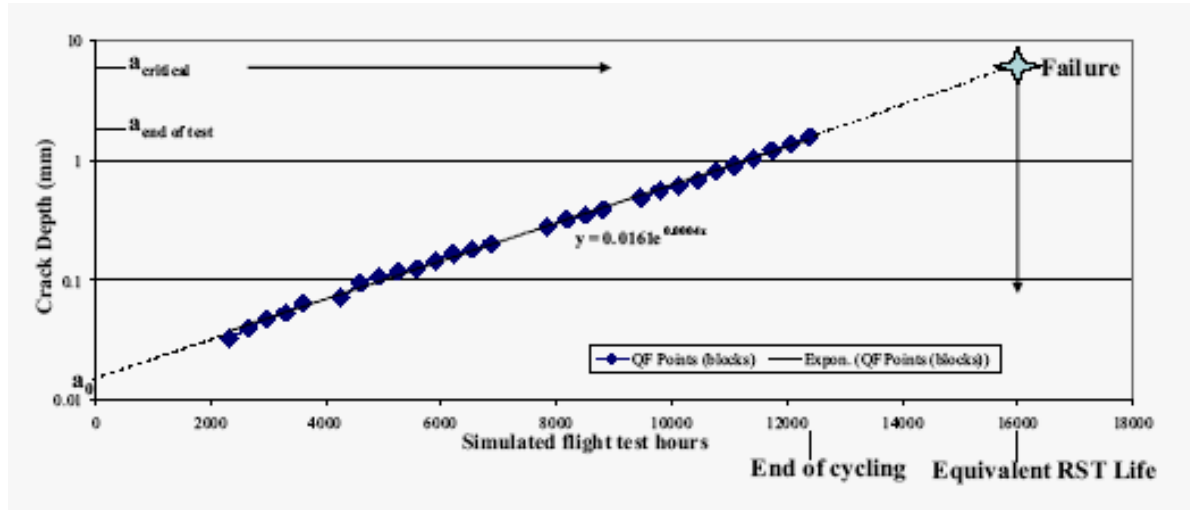
Considerações Iniciais

- A previsão precisa da vida em fadiga de estruturas sob carregamentos de amplitude variável (espectros de carregamento), particularmente no caso de trincas pequenas, ainda apresenta desafios, principalmente tendo em vista as demandas dos projetistas e operadores por melhor performance com custos de manutenção reduzidos.
- É raro o caso em que os pequenos corpos-de-prova de laboratório sejam totalmente representativos de uma estrutura, particularmente no que tange os acabamentos superficiais que são produzidos durante a fabricação.
- Uma forma de resolver esta questão é ensaiar a estrutura, seja ela um componente representativo ou mesmo o avião completo. Outra forma de melhorar o conhecimento de como o avião irá responder em serviço é fazer corpos-de-prova mais representativos dos detalhes críticos da estrutura, por exemplo aplicando tratamentos de superfície que reproduzam as descontinuidades de manufatura. Se trincas realísticas são geradas, a medição de seu crescimento e a caracterização das descontinuidades iniciais assegura que os corpos-de-prova sejam representativos.
- O conceito de Lead Crack: Se uma região da estrutura tem propensão a trincar, várias trincas possivelmente irão nuclear e crescer neste local. Dentre elas, a Lead Crack é aquela que cresce mais rapidamente. A **Lead Crack** começa a crescer no instante em que o avião é posto em serviço.

OS CONCEITOS DE “LEAD CRACK” E “EPS”

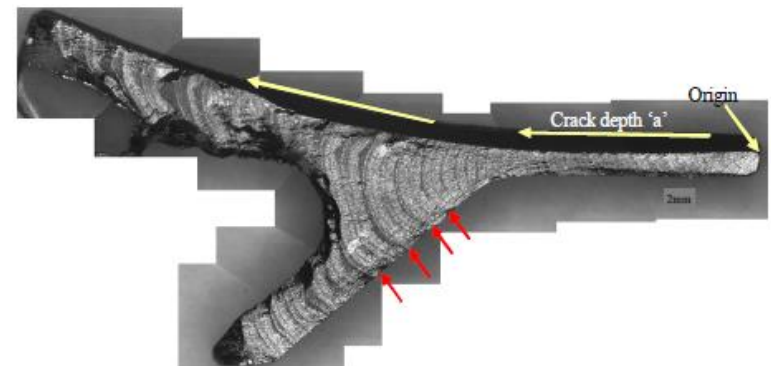
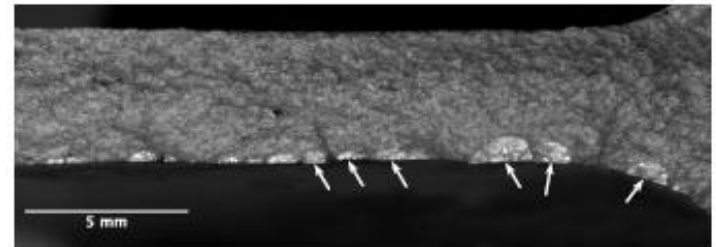
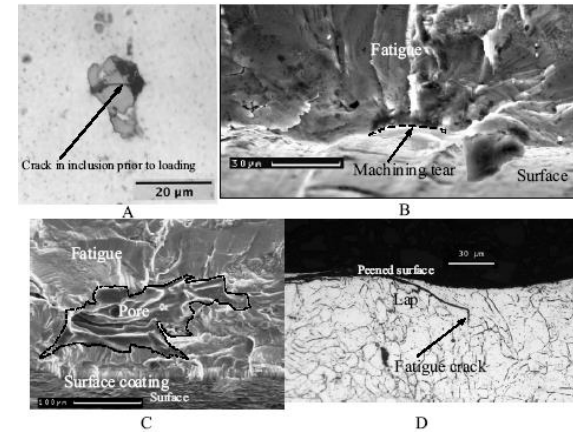
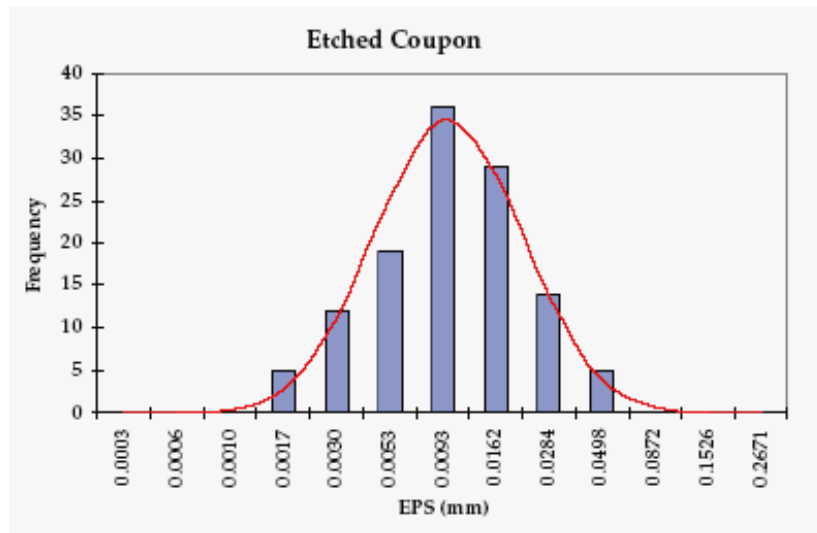
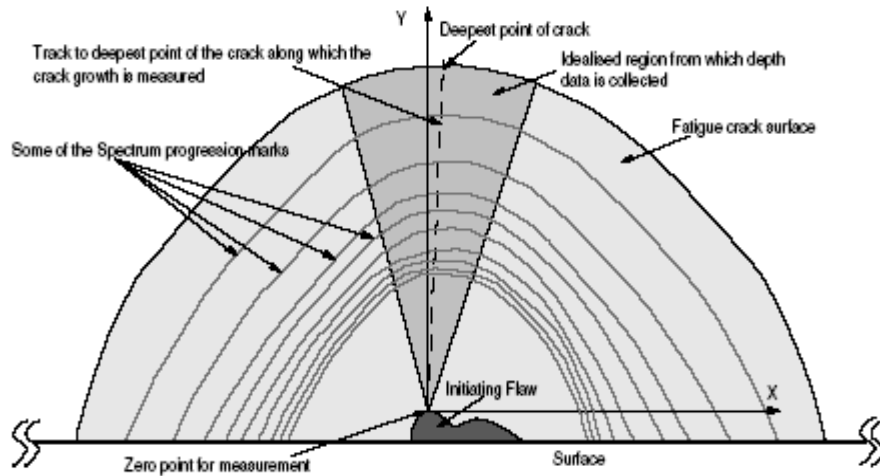
Abordagem proposta pela DSTO (Austrália)

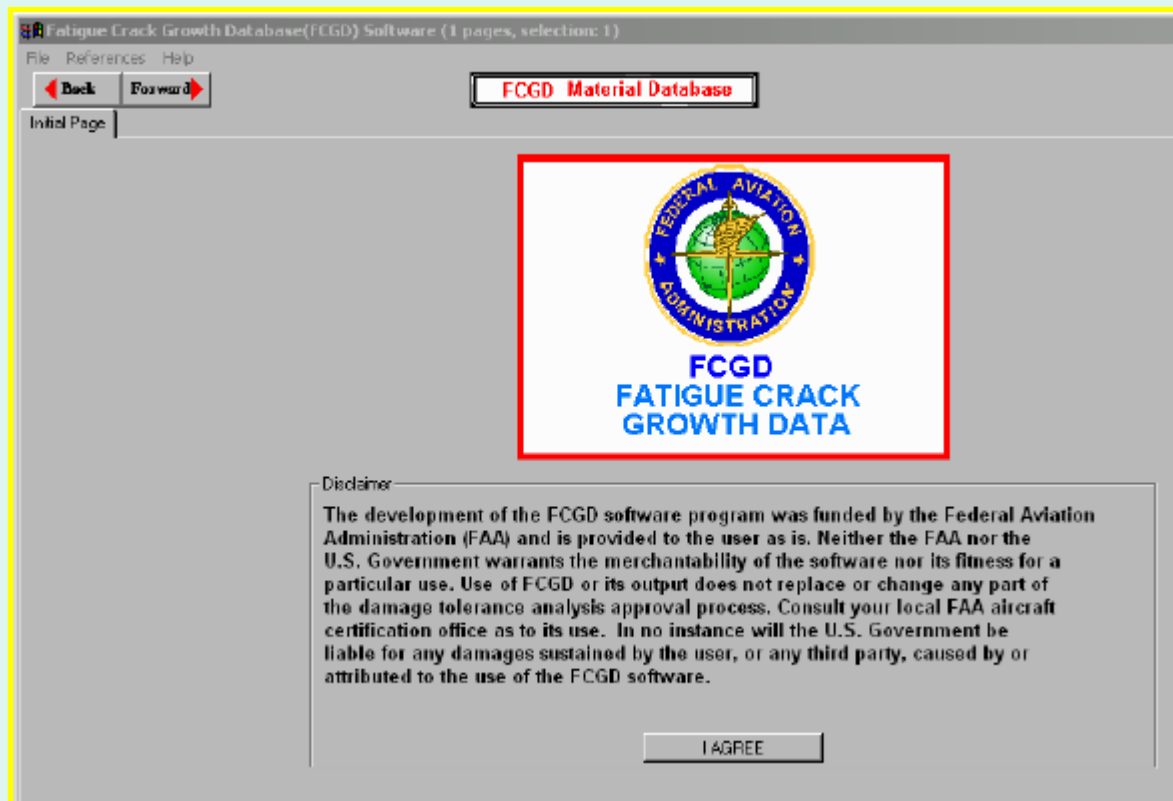
- Trinca de fadiga que irá levar à falha uma estrutura aeronáutica segue um comportamento aproximadamente exponencial.
- A propagação da trinca é avaliada por meio de fractografia quantitativa.
- A trinca inicial é definida pelo **Equivalent Precrack Size (EPS)** e pode ser determinada por retroprojeção ao “tempo zero” da curva de propagação.
- O valor de EPS não é necessariamente o tamanho real do defeito iniciador da trinca de fadiga, mas obviamente tem relação com este.
- A variabilidade do EPS, ou da descontinuidade inicial a partir da qual as trincas crescem, é um fator importante para a variabilidade da vida em fadiga.



$$a = a_0 \exp(\beta N)$$

OS CONCEITOS DE “LEAD CRACK” E “EPS”





FIM DA PARTE 5