



Giovanni Di Giorgio

**FONDAMENTI  
DI FENOMENOLOGIA  
DELLA FATICA  
E DELLA TENSOCORROSIONE  
NELLE STRUTTURE  
AERONAUTICHE**

Giovanni Di Giorgio

**Fondamenti di fenomenologia  
della fatica e della tensocorrosione  
nelle strutture aeronautiche**



Copyright © MMXIV  
ARACNE editrice S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Raffaele Garofalo, 133/ A-B  
00173 Roma  
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-7059-8

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: aprile 2014

# Indice

Prefazione	15	
Sigle ed abbreviazioni	17	
Elenco dei simboli	19	
<b>Capitolo 1</b>	<b>Introduzione alla fatica ed ai criteri di progetto delle strutture</b>	
1.1	Introduzione	21
1.2	Le origini degli studi sulla fatica delle strutture aeronautiche e l'evoluzione delle normative	22
1.3	Progettazione strutturale, fatica e corrosione	26
1.4	Metodologie e criteri di progettazione	28
1.4.1	Il criterio di progetto <i>Safe Life</i>	28
1.4.2	Il criterio di progetto <i>Fail Safe</i>	28
1.4.3	Il criterio di progetto <i>Damage tolerance</i>	29
1.4.4	<i>Widespread fatigue damage</i>	32
	Bibliografia	33
<b>Capitolo 2</b>	<b>Requisiti di missione degli aeromobili e spettri di carico</b>	
2.1	Le strutture ed i problemi della fatica e della corrosione	35
2.2	Missione dell'aeromobile e condizioni di carico	37
2.2.1	Impostazione metodologica per la determinazione delle condizioni di carico	40
2.2.2	Considerazioni relative alle manovre ed alle relative condizioni di carico	45
2.2.2.1	Sequenza e blocco di missioni	45
2.3	Le Prove di volo	46
2.4	Spettro di carico nelle prove di fatica	47
2.5	Il monitoraggio in servizio operativo	50
2.6	Missioni e spettri di manovra	52
2.6.1	Missioni e spettri di manovra per un velivolo intercettore	53

2.6.2	Missioni e spettri di manovra per gli aeromobili ad ala rotante	57
2.7	Condizioni ambientali in servizio e corrosione per le strutture	60
2.8	Sequenze di carico standard	62
2.9	Spettri di carico e metodi conteggio	64
2.9.1	Classificazione dei principali metodi di conteggio	65
2.9.2	Il metodo o algoritmo <i>Rainflow</i>	66
	Bibliografia	70
<b>Capitolo 3</b>	<b>Proprietà fondamentali di fatica e di frattura dei materiali metallici</b>	
3.1	Introduzione	73
3.1	Condizioni di carico cicliche e definizioni fondamentali	74
3.3	Regimi di fatica	78
3.3.1	Osservazioni sui regimi caratterizzati da deformazione plastica	80
3.4	Limite di fatica del materiale ed effetto scala	82
3.5	Nucleazione e propagazione dei fenomeni di fatica nei materiali metallici	82
3.5.1	'Chiusura' della cricca attorno alla zona plastica	86
3.6	Richiami di meccanica della frattura dei materiali metallici	87
	Bibliografia	90
<b>Capitolo 4</b>	<b>La fatica nelle strutture aeronautiche in materiali metallici</b>	
4.1	Introduzione	91
4.2	Introduzione alla stima della vita a fatica	91
4.2.1	Equazioni basiche della velocità di propagazione delle cricche	92
4.2.2	Modelli empirici di Soderberg, Gerber, Goodman	95
4.2.2.1	Applicazione della regola di Goodman al dimensionamento preliminare di un componente	96
4.2.3	Stima della vita a fatica di un componente strutturale mediante la teoria del danno cumulativo	98

4.2.4	Spettro di manovra e vita a fatica	100
4.3	Metodologie di contrasto ai fenomeni di fatica	101
4.3.1	Concentrazione degli sforzi	103
4.3.1.1	Modellazione agli elementi finiti	106
4.3.1.2	Il fattore $K_f$	106
4.3.2	Induzione di tensioni residue di compressione mediante rullatura	107
4.3.3	Processo di pallinatura mediante getto di pallini metallici	108
4.3.3.1	La pallinatura nelle fasi di progettazione	109
4.3.3.2	Integrazione delle proprietà conferite dalla pallinatura con le ulteriori prestazioni dei componenti	113
4.3.3.3	La pallinatura e le fasi di costruzione	114
4.3.4	Processi avanzati di pallinatura	115
4.3.4.1	Pallinatura laser	115
4.4	Ulteriori fenomeni di fatica	116
4.5	Ulteriori considerazione sul fenomeno WFD	117
	Bibliografia	121

## Capitolo 5 La fatica nelle strutture aeronautiche in materiali compositi

5.1	Introduzione	125
5.2	Proprietà fondamentali dei materiali compositi	129
5.2.1	Richiami sui materiali compositi	129
5.2.1.1	Strutture sandwich	129
5.2.1.2	Laminati compositi	130
5.3	Fenomeni di fatica nei materiali compositi	134
5.3.1	Danneggiamento e cedimento dei laminati compositi	136
5.3.2	Danneggiamento di giunti strutturali con elementi di fissaggio	138
5.3.3	Danneggiamento progressivo delle strutture sandwich	139
5.3.4	Danneggiamento per impatto, effetto delle condizioni ambientali	140
5.4	Osservazioni sulla resistenza e fatica dei materiali metallici e dei materiali compositi	142
5.5	Modelli di calcolo della vita a fatica di laminati compositi	143
5.5.1	Metodologie di approccio alla stima della fatica per i laminati compositi	143

5.5.2	Distribuzione di Weibull a due parametri	144
5.5.3	Il modello di Sendeckyj	145
5.6	Alcuni approcci alle prove sulle strutture in composito	147
	Bibliografia	150

## **Capitolo 6 La Corrosione nelle strutture aeronautiche**

6.1	Introduzione	153
6.2	Morfologia e classificazione dei fenomeni di corrosione	154
6.2.1	Corrosione e fatica	157
6.3	I fattori che influenzano la corrosione	159
6.4	Progettazione e criteri di protezione dalla corrosione	161
6.4.1	Materiali metallici e proprietà di resistenza alla corrosione	162
6.4.1.1	Leghe di Alluminio	163
6.4.1.2	Acciai	167
6.4.1.3	Leghe di Titanio	170
6.4.1.4	Leghe di Magnesio	171
6.4.1.5	Serie galvanica e criteri di selezione dei materiali	171
6.4.2	Introduzione ai sistemi di protezione superficiale anticorrosione dei componenti aerospaziali	171
6.4.2.1	Analisi di casi di deterioramento dei sistemi di protezione	176
6.5	Zone tipiche di corrosione per un velivolo da trasporto	181
6.6	Il fenomeno <i>fretting</i>	183
6.6.1	Meccanismo di propagazione, effetti, cedimento	184
6.6.2	Criteri di progettazione	185
6.6.3	Analisi di casi di danneggiamento dovuti al <i>fretting</i>	187
6.7	Effetti della corrosione ed integrità strutturale	188
6.8	Alcune considerazioni sulla prevenzione della corrosione per l'aeromobile	189
	Bibliografia	191

## **Capitolo 7 Fenomeni di tensocorrosione dei materiali metallici di impiego aeronautico**

7.1	Introduzione	193
-----	--------------	-----

7.2	Condizioni di innesco e propagazione della corrosione	194
7.3	Analisi dei fattori della corrosione sotto sforzo	196
7.3.1	Condizioni di carico	196
7.3.1.1	Tensioni residue interne	198
7.3.2	Materiali metallici aerospaziali e suscettibilità tensocorrosione	200
7.3.2.1	Acciai	200
7.3.2.2	Leghe di titanio	202
7.3.2.3	Leghe di alluminio	202
7.3.2.4	Leghe di magnesio	203
7.3.3	Il fattore ambientale	203
7.4	Prove di suscettibilità a tensocorrosione	204
7.5	Conclusioni	205
7.6	Corrosione sotto sforzo, fragilimento da idrogeno e corrosione a fatica	206
	Bibliografia	208

## **Capitolo 8 Danneggiamento, ispezione e tolleranza al danno**

8.1	Introduzione	211
8.2	I controlli non distruttivi per le strutture aeronautiche	212
8.3	Controlli non distruttivi per i materiali metallici	215
8.3.1	Ispezione visiva	215
8.3.2	Introduzione all'ispezione ai liquidi penetranti ed all'ispezione magnetica	216
8.3.2.1	Ispezione ai liquidi penetranti	217
8.3.2.2	Ispezione magnetica	219
8.3.3	Ispezione mediante attacco chimico Nital degli acciai	221
8.3.4	Metodo di ispezione delle correnti indotte ( <i>Eddy current method</i> )	222
8.3.5	Ispezione agli ultrasuoni	223
8.3.6	Ispezioni radiografiche	225
8.4	Controlli non distruttivi per i materiali compositi	226
8.4.1	<i>Tap testing</i> , ispezione sonora al martelletto	226
8.4.2	Ispezione agli ultrasuoni	226
8.4.3	Ispezioni radiografiche	227
8.5	Riepilogo sulle applicazioni dei controlli e sullo stato dei componenti	228
8.6	Riepilogo delle fonti di danneggiamento	231
	Bibliografia	234



Appendice A - Evoluzione storica degli studi sulla fatica dei metalli	237
Appendice B - Condizioni di trattamento termico delle leghe di alluminio di impiego aeronautico	239
Glossario	241
Indice delle figure	245
Indice delle tabelle	251
Indice analitico	255