

## Politecnico di Torino

## Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale A.A. 2022-2023

# Nanotecnologie applicate all'aeronautica come trattamento superficiale al fine di migliorare la resistenza alla corrosione

Relatore: Prof. Cestino Enrico Correlatori: Ing. Martilla Valentina Dott.ssa Zuccalà Sabrina

Candidato: Catapano Juri s283401





Il contenuto della trattazione è regolato da accordo di NDA, firmato da *Politecnico di Torino, CFM Air* e 4Ward360 Nanotechnology in data 03/08/2022

# Indice

1	Introduzione	9					
2	L'azienda CFM Air ed il progetto DARDO	10					
3	La corrosione						
	3.1 Classificazione della corrosione	15					
	3.1.1 Attacco uniforme	16					
	3.1.2 Corrosione galvanica	17					
	3.1.3 Corrosione interstiziale	18					
	3.1.4 Corrosione alveolare ( <i>Pitting</i> )	20					
	3.1.5 Corrosione intercristallina/intergranulare	22					
	3.1.6 Lisciviazione selettiva ( <i>Selective Leaching</i> )	23					
	3.1.7 Corrosione erosiva	24					
	3.1.8 Tensocorrosione ( <i>Stress Corrosion Cracking</i> )	24					
	3.2 Perché studiare i fenomeni corrosivi?	27					
4	Le nanotecnologie	30					
	4.1 Metodologie di produzione dei nanomateriali	30					
	4.2 Campi di applicazione delle nanotecnologie	32					
	4.3 Le nanote cnologie della $4Ward360$ Nanote chnology per la protezione dei metalli	34					
5	La fatica nei materiali metallici	36					
	5.1 Gli stadi del danneggiamento per fatica	36					
	5.2 Definizione dello Stress Concentration Factor $K_t$	39					
	5.3 Definizione dello Stress Intensity Factor K	41					
	5.4 Test sperimentali di danneggiamento a fatica	44					
	5.4.1 Definizione della curva di Wöhler o curva S-N	45					
	5.5 Incidente aereo: il caso del volo Atlantic Southeast Airlines 529	47					
		11					
6	Test Proposal	50					
	6.1 Campioni di prova	50					
	6.2 Test di corrosione ad immersione prolungata	51					
	6.2.1 Apparato strumentale	52					
	6.2.2 Soluzione corrosiva	53					
	6.2.3 Durata della prova di corrosione	53					
	6.3 Trattamento dei campioni dopo il periodo di immersione	54					
	6.4 Test meccanico: sollecitazione a fatica	55					
7	Fase sperimentale						
	7.1 Considerazioni sui costi e tempi delle prove	59					
	7.2 Apposizione del rivestimento superficiale	62					
		02					
8	Prima fase operativa: bagno corrosivo forzato	65					
	8.1 Apparato sperimentale	65					

	8.2	Soluzio	one utilizzata	67
	8.3	Condiz	zioni operative	70
		8.3.1	Grandezze controllate: temperatura e umidità	71
		8.3.2	Grandezza controllata: ph	73
	8.4	Risulta	ati ottenuti	74
		8.4.1	Dettaglio dei singoli provini: alluminio grezzo senza alcun trattamento	81
		8.4.2	Dettaglio dei singoli provini: alluminio trattato con rivestimento pro- tettivo <i>Primer</i>	82
		8.4.3	Dettaglio dei singoli provini: alluminio trattato con rivestimento pro- tettivo in nanotecnologie	84
9	Seco	onda fa	ase operativa: prove meccaniche di fatica	86
	9.1	Prima	tipologia di ciclo di carico	90
		9.1.1	Dettagli fotografici dei provini sottoposti alla prima tipologia di carico	91
		9.1.2	Analisi del numero di cicli di rottura per la prima tipologia di carico.	97
		9.1.3	Analisi delle aree di rottura per i provini sottoposti alla prima tipologia	
			di carico	98
	9.2	Second	la tipologia di ciclo di carico	100
		9.2.1	Dettagli fotografici dei provini sottoposti alla seconda tipologia di ciclo di carico	100
		9.2.2	Analisi del numero di cicli di rottura per la seconda tipologia di ciclo di carico	105
		9.2.3	Analisi delle aree di rottura per i provini sottoposti alla seconda tipo- logia di carico	100
	9.3	Terza	tipologia di carico	107
		9.3.1	Dettagli fotografici dei provini sottoposti alla terza tipologia di carico	108
		9.3.2 9.3.3	Analisi delle aree di rottura per i provini sottoposti alla terza tipologia	113
		5.0.0	di carico	114
10	Terz	a fase	operativa: analisi mediante <i>SEM</i>	116
	10.1	Analis	i superficiale dei campioni	117
		10.1.1	Dettaglio fotografico dei campioni MF 000, MCF 002, MCF 005, MCF	
			008 ed MCF 012	118
	10.2	Analis	i mediante <i>SEM</i> della sezione di rottura	123
		10.2.1	Dettaglio fotografico dei campioni $MCF$ 002, $MCF$ 005 ed $MCF$ 008	124
11	Ana	lisi de	i risultati	128
**	11 1	Aspett	to superficiale	128
	11.2	Numer	ro cicli di rottura	130
	11.4	11 2 1	Definizione del $K_{\star}$ teorico e confronto con quello sperimentale	132
		11.2.2	Definizione del $K_t$ con la relazione di Heuwood e confronto con quello	104
			sperimentale	142
		11.2.3	Definizione del $K_t$ con modello $FEM$ e confronto con quello sperimenta	le145
	11.3	Aree d	li rottura a fatica e di rottura statica	147

12 Conclusioni	150
13 Bibliografia	152
14 Ringraziamenti	154

# Elenco delle figure

1	Replica velivolo HURRICANE.	10
2	Replica velivolo Embraer TUCANO.	10
3	Replica velivolo Fiesler STORCH.	11
4	Velivolo MILLENIUM Master.	11
5	Velivolo DARDO.	12
6	Reazione chimica del ferro durante la corrosione ed il processo di estrazione	
	del metallo.	13
7	Schema della corrosione del ferro sotto una goccia d'acqua: dissoluzione del	
	metallo, riduzione dell'ossigeno e formazione della ruggine.	15
8	Rappresentazione schematica delle otto forme di corrosione.	16
9	Corrosione uniforme di componenti in acciaio.	17
10	Elementi per la corrosione galvanica.	17
11	Esempio di corrosione galvanica: acciaio al carbonio zincato (rondella) e ac-	
	ciaio inox (vite e componente)	18
12	Possibile sede di innesto per la corrosione interstiziale.	18
13	Esempio di corrosione interstiziale verificatosi tra un dado e la rispettiva rosetta.	19
14	Esempio di corrosione filiforme generata dall'acido citrico su lega AA1200 H22	
	dopo 72 ore di esposizione	20
15	Vista in sezione di un alveolo su Al 6061 provocato da soluzione di NaCl a 0.1M.	21
16	Corrosione alveolare su un componente in acciaio inox	21
17	Rappresentazione schematica della corrosione alveolare	22
18	Rappresentazione della corrosione intercristallina.	22
19	Ingrandimento 350x della corrosione intergranulare su componente in titanio	
	in contatto con metanolo anidro contenente tracce di cloruri	23
20	Ingrandimento 100x del fenomeno di lisciviazione selettiva in un componente	
	in ghisa	23
21	Stress Corrosion Cracking di acciaio 304 in soluzioni a concentrazioni differenti	
	di cloruro di magnesio.	25
22	Fasi di sviluppo per la creazione di una frattura da SCC	26
23	Frattura dell'involucro di un razzo in acciaio ad alta resistenza causato da SCC.	26
24	Foto del Silver Bridge crollato il 15 dicembre del 1967	28
25	Foto di un deposito di auto usate negli Stati Uniti in attesa di rottamazione.	29
26	Rappresentazione schematica della distribuzione disomogenea degli stress in	
	un elemento con foro centrale.	40
27	Sistema di coordinate nei pressi dell'apice della cricca	42
28	Diagramma di Wöhler	46
29	Velivolo EMB120	47
30	Fotografia del luogo dell'incidente	48
31	Schema del provino ad osso di cane tratto dalla normativa ASTM E8/E8M-21.	51
32	Schema dell'apparato strumentale per la realizzazione della prova di corrosione	
	pensato inizialmente.	52
33	Relazione per la stima della durata del test da normativa UNI EN ISO 9223.	53

34	Relazione per la stima del tasso di corrosione dell'alluminio nel primo anno da	
	normativa UNI EN ISO 9223	54
35	Forma abbozzata dei campioni in alluminio.	56
36	Supporto in acciaio per la realizzazione dei provini ad osso di cane.	57
37	Il collaboratore Andrea Felis nella realizzazione dei provini con la fresatrice.	57
38	Processo di foratura nella parte di estremità del provino.	58
39	Provini in alluminio nella forma desiderata ad osso di cane	58
40	Modello FEM con foro centrale da 2 mm	60
41	Modello FEM con foro centrale da 4 mm	60
42	Modello FEM con foro centrale da 6 mm	60
43	Andamento $\sigma_x$ nel modello FEM con foro da 2 mm	61
44	Andamento $\sigma_x$ nel modello FEM con foro da 4 mm	61
45	Andamento $\sigma_x$ nel modello FEM con foro da 6 mm	61
46	Realizzazione del foro centrale mediante trapano a colonna	62
47	Contenitore in materiale plastico per l'immersione.	66
48	Tondino in acciaio.	66
49	Filo metallico ricoperto in PVC.	67
50	Acqua distillata utilizzata per la soluzione.	68
51	Cloruro di sodio utilizzato per la soluzione	68
52	Bilancia da laboratorio utilizzata per il cloruro di sodio	70
53	Vasche di corrosione fotografate il 27 ottobre 2022.	70
54	Termometro a parete fotografato il 27 ottobre 2022.	71
55	Termometro a immersione utilizzato per le singole soluzioni corrosive	72
56	Provini in alluminio non trattati e immersi, fotografati il 10 Novembre 2022.	75
57	Provini in alluminio trattati con Primer e immersi, fotografati il 10 Novembre	
	2022	75
58	Provini in alluminio trattati con nanotecnologie e immersi, fotografati il 10	
	Novembre 2022	76
59	Dettaglio di un provino in immersione trattato con nanotecnologie.	77
60	Provini MCF 001, MCF 002 ed MCF 003 pre bagno corrosivo $(A)$ , post bagno	
	corrosivo $(B)$ e dopo la pulizia $(C)$ .	78
61	Provini MCF 004, MCF 005 ed MCF 006 pre bagno corrosivo $(A)$ , post bagno	
	corrosivo $(B)$ e dopo la pulizia $(C)$ .	79
62	Provini MCF 007, MCF 008 ed MCF 009 pre bagno corrosivo $(A)$ , post bagno	
	corrosivo $(B)$ e dopo la pulizia $(C)$	80
63	Provino MCF 001 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	81
64	Provino MCF 002 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	81
65	Provino MCF 003 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	82
66	Provino MCF 004 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	82
67	Provino MCF 005 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	83
68	Provino MCF 006 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	83
69	Provino MCF 007 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	84
70	Provino MCF 008 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	84
71	Provino MCF 009 completo $(A)$ , visto lateralmente $(B)$ e visto in dettaglio $(C)$ .	85

72	Macchina INSTROM utilizzata per le prove di fatica.	86
73	Provino in alluminio serrato nelle due ganasce.	87
74	Esempio di un provino portato a rottura.	87
75	Apparato strumentale collegato alla macchina di prova	88
76	Grafico con curve S-N tratto dal MIL HDBK-5H.	90
77	Provino MF 000: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$ .	92
78	Provino MCF 001: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$ .	93
79	Provino MCF 004: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$ .	94
80	Provino MCF 007: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$ .	95
81	Provino MCS 010: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$ .	96
82	Sezione di rottura del provino MCS 010.	99
83	Provino MCF 002: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	101
84	Provino MCF 005: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	102
85	Provino MCF 008: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	103
86	Provino MCS 011: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	104
87	Sezione di rottura del provino MCF 002	106
88	Provino MCF 003: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	109
89	Provino MCF 006: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	110
90	Provino MCF 009: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$	111
91	Provino MCS 012: tronconi separati posti su un piano $(A)$ , tronconi visti	
	dall'alto $(B)$ , visti dall'alto con inclinazione $(C)$ e sezione di rottura $(D)$ .	112
92	Sezione di rottura del provino MCF 006.	114
93	Strumento SEM presente al Politecnico di Torino	116
94	Cristalli di NaCl rilevati sulla superficie di un provino metallico.	117
95	Posizionamento dei campioni all'interno della camera a vuoto del SEM	118
96	Schermo output.	119
97	Superfici provino MF 000 (A) e provino MCF 002 (B)	120
98	Superficie provino MCF 005 (C). $\ldots$ Superficie provino MCF 005 (C). $\ldots$ Superficie provino MCF 005 (C).	121
99	Superfici provino MCF 008 (D) e provino MCF 012 (E).	122
100	Campioni della sezione di rottura ottenuti dai provini MCF 002 ( $A$ ), MCF 005 ( $D$ ) – MCF 002 ( $G$ )	100
101	$(B) \in \mathrm{MUF} \cup \mathrm{U08} (C), \dots, \dots,$	123
101	Posizionamento dei campioni nel SEM	124

102	Area di rottura statica e rottura a fatica del provino MCF 008	124
103	Ingrandimento dell'area di rottura statica e rottura a fatica del provino MCF	
	008	125
104	Bande di scorrimento nei provini MCF 002 (A), MCF 005 (B) ed MCF 008 (C)	.126
105	Direzioni individuate dalle linee di spiaggia nei provini MCF 002 (A), MCF	
	005 (B) ed MCF 008 (C)	126
106	Immagini al SEM della propagazione del fenomeno di fatica nell'alluminio 2024	
	T351	127
107	Le tre famiglie di provini prima del bagno corrosivo: alluminio grezzo sen-	
	za trattamento $(A)$ , alluminio con rivestimento Primer $(B)$ e alluminio con	
	rivestimento in nanotecnologie $(C)$ .	128
108	Le tre famiglie di provini estratte dal bagno di corrosione: alluminio grezzo	
	senza trattamento $(A)$ , alluminio con rivestimento Primer $(B)$ e alluminio con	
	rivestimento in nanotecnologie $(C)$ .	129
109	Confronto dei numeri di cicli necessari alla rottura per famiglia di provini	
	associati alle diverse tipologie di ciclo di carico.	131
110	Curve teoriche S-N ottenute con il $K_t$ ricavato dai risultati sperimentali della	
	prima tipologia di ciclo di carico.	135
111	Curve teoriche S-N ottenute con il $K_t$ della prima tipologia di ciclo di carico	
	dell'alluminio grezzo e dell'alluminio trattato con <i>Primer</i>	136
112	Curve teoriche $S$ - $N$ dell'alluminio trattato con nanotecnologie corroso e non	
	corroso	138
113	Curve di regressione lineare ottenute dai risultati sperimentali delle prove	
	meccaniche di fatica.	140
114	Ingrandimento della sezione superiore del grafico con le curve di regressione	
	lineare	141
115	Curva rappresentativa del $K_t$ per un componente con foro centrale	143
116	Curve teoriche S-N, ottenute con i $K_t$ ricavati dai dati sperimentali della prima	
	tipologia di ciclo di carico, a confronto con la curva S-N, ottenuta con il $K_t$	
	ricavato dall'equazione di Heywood.	144
117	Curve teoriche S-N, ottenute con i $K_t$ ricavati dai dati sperimentali della prima	
	tipologia di ciclo di carico e dall'equazione di Heywood, a confronto con le curve	
	S-N, ottenute con i $K_t$ , ricavati dai modelli FEM	146
118	Confronto delle aree di rottura a fatica e statica per ciascun provino, raggrup-	
	pato con quelli associati alla stessa tipologia di ciclo di carico.	148
119	Confronto delle aree di rottura a fatica e statica per ciascun provino, raggrup-	
	pato con quelli appartenenti alla stessa tipologia di rivestimento protettivo	149

# Elenco delle tabelle

1	Riassunto dei provini realizzati per lo studio	63
2	Provini utilizzati per la fase del bagno corrosivo.	65
3	Materiale utilizzato per la realizzazione del bagno corrosivo.	69
4	Valori di temperatura e umidità raccolti durante la fase di corrosione forzata.	73
5	Valori di ph registrati durante la fase di corrosione forzata.	74
6	Provini utilizzati per le prove meccaniche di fatica.	88
7	Provini scelti per ciascuna tipologia di ciclo di carico.	89
8	Provini assegnati alla prima tipolgia di ciclo di carico	91
9	Numero di cicli necessari alla rottura per i provini assegnati alla prima tipo-	
	logia di ciclo di carico.	97
10	Durata delle prove meccaniche per i provini assegnati alla prima tipologia di	
	ciclo di carico.	98
11	Aree di rottura a fatica e statica dei provini assegnati alla prima tipologia di	
	ciclo di carico.	99
12	Provini assegnati alla seconda tipologia di ciclo di carico.	100
13	Numero di cicli necessari alla rottura per i provini assegnati alla seconda	
	tipologia di ciclo di carico.	105
14	Durata delle prove meccaniche per i provini assegnati alla seconda tipologia	
	di ciclo di carico.	106
15	Aree di rottura a fatica e statica dei provini assegnati alla seconda tipologia	
	di ciclo di carico.	107
16	Provini assegnati alla terza tipologia di ciclo di carico.	108
17	Numero di cicli necessari alla rottura per i provini sottoposti alla terza tipologia	110
10		113
18	Durata delle prove meccaniche per i provini associati alla terza tipologia di	
10	ciclo di carico.	114
19	Aree di rottura dei provini associati alla terza tipologia di ciclo di carico	115
20	Variazioni effettive del $K_t$ rispetto a quanto previsto dalla curva teorica per	105
01	l'alluminio grezzo e quello trattato con <i>Primer</i> .	137
21	Variazioni effettive del $K_t$ rispetto a quanto previsto dalla curva teorica per	100
	l'alluminio trattato con nanotecnologie corroso e non corroso	139

## 1 Introduzione

Il velivolo DARDO si differenzia dai suoi omologhi appartenenti all'aviazione generale per la natura dei materiali utilizzati per la sua realizzazione. Esso infatti, è costituito per la maggior parte da materiali compositi, nello specifico tessuti in fibra di carbonio unidirezionale, che lo rendono estremamente leggero, pur mantenendo intatte le caratteristiche di rigidezza e robustezza richieste, e in minor parte da componenti metalliche. Quest'ultime sono utilizzate solo per le sezioni più sollecitate strutturalmente e per i dispositivi di attuazione meccanica. In particolare, il metallo principe è l'alluminio 2024 T3, che consente un buon compromesso tra leggerezza e prestazioni meccaniche. Tuttavia, il metallo porta con sé la ben nota problematica della corrosione, dovuta all'ambiente di lavoro del mezzo, e la conseguente riduzione delle caratteristiche meccaniche. Dalla considerazione di quello che è lo stato dell'arte in termini di protezione delle componenti metalliche dagli effetti della corrosione, nasce l'idea di ricercare un potenziale sostituto per la protezione superficiale. Ad oggi il metallo utilizzato sul velivolo subisce un trattamento superficiale di protezione che consiste nell'apposizione di una particolare vernice, nota come *Primer*, la quale inibisce gli effetti negativi della corrosione, garantendo buone prestazioni meccaniche nel tempo. La ricerca di una soluzione alternativa è ricaduta sulla proposta dell'azienda 4 Ward 360 Nanotechnology, che ha proposto di trattare le parti interessate da fenomeni corrosivi con un rivestimento superficiale in grado di rilasciare nanoparticelle di ossido di silicio nella struttura atomica dell'alluminio: queste nanoparticelle dovrebbero garantire un miglioramento della resistenza alla corrosione del metallo. Lo scopo dell'analisi qui presentata è proprio quello di verificare che le nanoparticelle abbiano degli effettivi benefici sulle proprietà meccaniche del metallo, avendo preservato quest'ultimo dal processo corrosivo forzato, meglio di quanto faccia ad oggi il rivestimento protettivo utilizzato. L'elaborato che viene presentato di seguito costituisce parte di uno studio più complesso, atto ad apportare delle migliorie al velivolo DARDO dell'azienda CFM Air. Il progetto vede nel suo insieme altri due campi di studio: quello termico, seguito dal collaboratore Andrea Felis, e quello sulla pulibilità del velivolo, seguito da Francesco Galvano. Da un punto di vista termico l'applicazione del rivestimento in nanotecnologie sulla superficie esterna del velivolo comporterebbe una riduzione del calore trasmesso all'interno del velivolo, riducendo anche la temperatura interna nella cabina di pilotaggio, mentre per quanto riguarda la pulibilità, il trattamento in nanotecnologie permetterebbe una minor adesione di qualsiasi sostanza sporcante sulle superfici del aeroplano.

# 2 L'azienda CFM Air ed il progetto DARDO

L'azienda *CFM Air*, certificata *UNI EN ISO 9100*, nasce nel 2005 a Cirié, piccolo centro cittadino alle porte di Caselle, sede dell'Aeroporto di Torino. Essa fa della progettazione e realizzazione di velivoli ultraleggeri e *UAV* di medie dimensioni in lega di alluminio e fibra di carbonio il suo scopo principale. L'azienda si è dapprima dedicata alla realizzazione di repliche di alcuni velivoli di notevole rilevanza storica del periodo risalente alla seconda guerra mondiale: l'*Hurricane*, il *Tucano* ed il *Fiesler Storch*, tutti interamente in alluminio.



Figura 1: Replica velivolo HURRICANE.



Figura 2: Replica velivolo Embraer TUCANO.



Figura 3: Replica velivolo Fiesler STORCH.

Il primo velivolo realizzato è stato il cacciabombardiere britannico Hurricane (figura 1), utilizzato durante il conflitto degli anni quaranta, il secondo è la replica dell'Embraer EMB312 Tucano (figura 2), monomotore turboelica da addestramento basico, prodotto dall'azienda Embraer dagli anni ottanta, ed il terzo, il Fiesler Storch (figura 3), è stato un velivolo monomotore utilizzato dall'aviazione tedesca durante la seconda guerra mondiale, prodotto dell'azienda tedesca Gerhard-Fiesler-WerkeGmbH. Il percorso di innovazione tecnologica, da sempre perseguito dall'azienda CFM Air, dopo numerosi progetti, tra i quali è da annoverarsi il MILLENIUM (figura 4), poiché primo velivolo in materiale composito, ha visto la sua massima espressione nel progetto DARDO.



Figura 4: Velivolo MILLENIUM Master.

Il progetto *DARDO* si caratterizza per la realizzazione di un velivolo pensato e realizzato per la maggior parte in materiale composito, nella fattispecie fibra di carbonio, ed in minima parte in alluminio, per le componenti maggiormente sollecitate, come linee di comando e carrello d'atterraggio. Il velivolo (*figura 5*), il cui primo test di volo risale al 16 luglio 2014, appartiene alla categoria degli ultraleggeri e per tale ragione deve rispettare necessariamente alcune specifiche:

- Peso di progetto massimo al decollo: 600 kg.
- Fattore di carico variabile tra -2,2g e +4,4g.
- Velocità massima di progetto: 370 km/h.
- Velocità di stallo non superiore a 64 km/h.



Figura 5: Velivolo DARDO.

Il velivolo presenta due posti affiancati ed è, come accennato, realizzato in fibra di carbonio unidirezionale. Una aerodinamica attentamente studiata, una struttura estremamente legge-ra, ma sufficientemente robusta per garantire elevati standard di sicurezza, ed una particolare attenzione al comfort dei passeggeri, che si esprime in dettagli pensati per stupire, rendono il velivolo DARDO uno spettacolare esempio di ultraleggero avanzato con prestazioni notevoli, superiori a quelle di un comune ultraleggero.

## 3 La corrosione

La corrosione è uno dei processi naturali più frequenti e conosciuti, a causa del fatto che spesso lascia tracce inequivocabili, riscontrate da chiunque almeno una volta nella vita quotidiana. Questo fenomeno naturale, associato nella gran parte dei casi alla formazione della ruggine sull'acciaio, ha non solo un impatto estetico evidente, ma anche un importante risvolto economico, se si pensa che circa un quinto dell'acciaio prodotto a livello mondiale è destinato a sostituire le componenti danneggiate dalla corrosione. Visti i motivi precedentemente esposti, una corretta ed efficace protezione dalla corrosione delle parti metalliche interessate contribuirebbe ad un ingente risparmio di denaro e materie prime. Tuttavia, l'aspetto economico, seppur rilevante, costituisce l'implicazione meno gravosa, poiché il primato in questi termini spetta certamente al pericolo che si corre, lasciando che le strutture subiscano danni da corrosione e vadano incontro a cedimenti, talvolta drammatici, causa di potenziali ed ingenti perdite umane. Il fenomeno della corrosione si configura come l'interazione chimico-fisica tra un particolare ambiente, con tutte le caratteristiche che lo definiscono, ed un metallo che vi risiede, il quale vede cambiare le sue proprietà e dunque le proprie capacità di fronteggiare i compiti strutturali ad esso affidati. Si parla dunque ed effettivamente di corrosione solo in presenza di una evidente variazione nelle proprietà del metallo. Nei metalli comunemente utilizzati per l'ingegneria, acciaio, zinco, rame e alluminio, il processo che porta alla corrosione si può considerare come la reazione inversa, termodinamicamente favorita, del processo di estrazione del metallo (fiqura 6).



**Figura 6:** Reazione chimica del ferro durante la corrosione ed il processo di estrazione del metallo.

Nella realtà tutti gli ambienti sono potenzialmente corrosivi e si distinguono tra loro solo per la facilità con cui permettono al processo di iniziare ed avanzare. I processi corrosivi in generale si verificano quando le condizioni sono favorevoli alle rispettive reazioni, essendo essi dei processi termodinamici, per cui vi possono essere altri fattori in grado di accelerare la reazione stessa. Una prima distinzione può essere fatta, se si considera l'interazione tra il metallo e l'ambiente che lo circonda:

- Reazione chimica.
- Reazione metallofisica.
- Reazione elettrochimica.

La tipica reazione di *corrosione chimica* si verifica a temperature elevate, quando il metallo reagisce ai gas caldi e forma così uno strato di ossido. Un classico esempio di *reazione metal-lofisica* invece, è rappresentato dall'infragilimento provocato dall'idrogeno che si diffonde in un metallo, con potenziale conseguente cedimento di un componente. L'infragilimento di cui sopra può essere la conseguenza di un processo di fabbricazione mal eseguito, come una applicazione inadeguata di un rivestimento superficiale (e.g. zincatura elettrochimica per prodotti in acciaio ad alta resistenza) ed in questo caso si parla di *infragilimento primario*, oppure può essere avviato da processi di corrosione (dissoluzione del metallo) ed in quest'ultimo caso si parla di *infragilimento da idrogeno*, indotto dalla corrosione, ed è noto come *infragilimento secondario*. La *reazione elettrochimica*, invece è quella più comune e comporta uno scambio elettrico per mezzo degli elettroni nel metallo e degli ioni in un elettrolita conduttore, quale può essere una pellicola d'acqua sulla superficie. Complessivamente la reazione può essere divisa in due reazioni parziali:

- Dissoluzione del metallo, nota come ossidazione o reazione anodica.
- *Riduzione* o *reazione catodica*: questa reazione riguarda soprattutto l'ossigeno presente nell'aria con l'acqua.

Queste reazioni parziali possono verificarsi sulla superficie del metallo con una distribuzione omogenea, definendo così un attacco omogeneo, oppure localmente e separatamente, provocando dorme di corrosione localizzata (e.g. corrosione alveolare). Il meccanismo e la natura elettrochimica della reazione corrosiva definiscono i requisiti necessari perché si verifichi il processo di corrosione:

- Un metallo conduttore.
- Un elettrolita (un sottile strato di umidità sulla superficie risulta sufficiente).
- Dell'ossigeno per la reazione catodica.

Se si considera a titolo esemplificativo il caso del ferro, le due reazioni di dissoluzione del metallo e di riduzione dell'ossigeno si verificano con una leggera separazione sulla superficie ed i loro prodotti (ioni Fe e OH) reagiscono nella goccia d'acqua, formando la ruggine, dal tipico colore rosso. Si riporta di seguito un semplice modello della reazione corrosiva (*figura* 7) con cui si possono spiegare molte forme di corrosione e si possono dedurre le misure per mitigarle. Infatti, impedendo o rallentando una delle reazioni parziali, si riduce anche il tasso di corrosione generale.



**Figura 7:** Schema della corrosione del ferro sotto una goccia d'acqua: dissoluzione del metallo, riduzione dell'ossigeno e formazione della ruggine.

In generale, lo stessa schema, riportato in *figura 7*, si applica ad altri metalli come lo zinco e l'alluminio, ma con reazioni chimiche leggermente differenti nell'elettrolita.

#### 3.1 Classificazione della corrosione

Generalmente ci si può imbattere in numerose classificazioni della corrosione: vi è la suddivisione tra corrosione a basse temperature e quella ad alte, la suddivisione tra ossidazione e corrosione elettrochimica ed infine, quella qui preferita e suggerita, che vede il processo essere suddiviso tra corrosione in ambiente umido e corrosione secca. La *corrosione in ambiente umido*, come facilmente intuibile, si verifica quando è presente un liquido. Solitamente vede tra i protagonisti del processo soluzioni acquose o elettroliti e riguarda la maggior parte dei processi corrosivi (e.g. acciaio corroso dall'acqua). Diversamente, la *corrosione secca* si verifica in assenza di liquidi e di solito gli agenti corrosivi sono gas o vapori. Questa tipologia di corrosione è spesso associata alle alte temperature, vista la natura degli agenti corrosivi (e.g. corrosione attuata dai gas della fornace sull'acciaio). Risulta utile classificare le differenti tipologie di corrosione in relazione all'aspetto che il metallo corroso manifesta esternamente. Ciascuna forma può essere identificata attraverso una mera osservazione visiva. Alcune delle otto forme di corrosione sono uniche, ma tutte sono più o meno legate tra loro. Le otto forme di corrosione individuabili sono:

- Attacco uniforme.
- Corrosione galvanica.
- Corrosione interstiziale.
- Corrosione alveolare (Pitting).
- Corrosione intercristallina/intergranulare.
- Lisciviazione selettiva (Selective leaching).

- Corrosione da erosione.
- Tensocorrosione (Stress Corrosion Cracking).



Figura 8: Rappresentazione schematica delle otto forme di corrosione.

Nella figura 8 è possibile osservare una rappresentazione semplificata delle differenti forme di corrosione che verranno di seguito trattate nello specifico.

#### 3.1.1 Attacco uniforme

Quando la superficie del metallo viene rimossa in modo quasi omogeneo da un processo di corrosione, si parla allora di corrosione uniforme, trovandosi di fronte al fenomeno più comune. Le reazioni chimiche parziali che lo caratterizzano, di cui è stato precedentemente detto, dunque dissoluzione del metallo e riduzione dell'ossigeno, si verificano statisticamente su tutta la superficie o gran parte di essa, determinando così una dissoluzione più o meno omogenea del metallo, riscontrabile nella diminuzione dello spessore dello stesso, e la formazione uniforme dei prodotti da corrosione. L'attacco uniforme, definito anche corrosione generalizzata, non rappresenta un motivo di grande preoccupazione dal punto di vista tecnico, poiché, mediante semplici test di laboratorio (e.g. l'immersione di componenti in fluidi), è facilmente prevedibile e dunque è facile attuare le adeguate contromisure, che nella gran parte dei casi sono rappresentate da utilizzo di materiali adeguati, rivestimenti superficiali adatti, inibitori della corrosione, protezione catodica o semplice aumento dello spessore del metallo coinvolto, aumentando così l'aspettativa di vita operativa del componente. Seppur sia caratteristica di componenti metalliche realizzate in acciaio al carbonio non protetto e acciaio zincato in condizioni di esposizione all'atmosfera, questo tipo di corrosione, quantificato come la quantità di metallo perso all'anno e misurato in micrometri ( $\mu$ m/anno), è piuttosto

improbabile che si verifichi: vi sono sempre delle zone, soprattutto in componenti complessi, che si corrodono con velocità maggiore e con maggiore intensità.



Figura 9: Corrosione uniforme di componenti in acciaio.

Questa forma di corrosione, di cui è possibile osservare un esempio nella *figura 9*, dove il fenomeno naturale colpisce delle barre in acciaio, non costituisce motivo di preoccupazione, mentre le altre sì, poiché più difficili da predire: sono localizzate e limitate a specifiche zone delle strutture interessate, configurandosi per tale ragione come causa inaspettata di cedimenti prematuri.

#### 3.1.2 Corrosione galvanica

Due metalli differenti, immersi in una soluzione elettrolitica acquosa, spesso danno vita ad una differenza di potenziale. Se questi metalli vengono posti in contatto tra loro, anche mediante collegamento elettrico, la differenza di potenziale produce un flusso di elettroni tra le componenti metalliche. Solitamente il metallo meno nobile viene dissolto (reazione parziale della dissoluzione anodica), mentre il metallo più nobile non viene attaccato dal processo corrosivo (funge da catodo per la riduzione dell'ossigeno). In generale, il catodo, o metallo catodico, si corrode molto poco o addirittura non presenta questa fenomenologia in questo tipo di accoppiamento, come si può osservare nella *figura 10*.



Figura 10: Elementi per la corrosione galvanica.

Quando si assiste al fenomeno della corrosione galvanica, il tasso di corrosione del metallo meno nobile è superiore a quanto sarebbe in un ambiente corrosivo libero, senza il contatto con un altro metallo. Naturalmente, confrontando i dati termodinamici a disposizione e quelli derivanti dall'esperienza, è possibile prevedere quali sono le combinazioni di materiali metallici che darebbero luogo ad una corrosione di questo tipo. Questa tipologia di corrosione viene anche sfruttata nel caso in cui si voglia proteggere un metallo: lo zinco, accoppiato agli acciai basso-legati, risulta essere il metallo meno nobile e dunque oggetto del processo corrosivo, proteggendo l'acciaio dal fenomeno galvanico.



**Figura 11:** Esempio di corrosione galvanica: acciaio al carbonio zincato (rondella) e acciaio inox (vite e componente).

Nella *figura 11* viene mostrato un esempio di corrosione galvanica: l'acciaio al carbonio zincato è quello che nell'accoppiamento srutturale risulta essere il meno nobile tra i metalli, per cui oggetto del fenomeno corrosivo. A causa dell'elettricità e dei metalli coinvolti, questa forma di corrosione viene definita *galvanica* o *metallo-metallo*. La forza guida per questo tipo di fenomeno è di fatto costituita dalla differenza di potenziale sviluppata dai due metalli.

#### 3.1.3 Corrosione interstiziale

Spesso accade che un'intensa e localizzata corrosione si verifichi in corrispondenza di interstizi o crepe, che si creano tra due superfici a contatto, le quali possono essere realizzate con lo stesso metallo, con metalli differenti o addirittura con un metallo ed un non metallo, esposte ad agenti corrosivi.



Figura 12: Possibile sede di innesto per la corrosione interstiziale.

Questo genere di attacco è di solito associato a piccoli volumi di soluzioni stagnanti causati dalla presenza di fessure, come si scorge nel modello rappresentativo della *figura 12*, guarnizioni, giunti sovrapposti, depositi superficiali, interstizi presenti sotto i bulloni e teste di rivetti. Per questa ragione, questa forma di corrosione è definita *interstiziale* o *da deposito*. Esempi di depositi che possono produrre corrosione interstiziale sono sabbia, residui di sporco, prodotti di corrosione o residui solidi in generale. I depositi in generale agiscono come schermo e definiscono le condizioni stagnanti, necessarie alla corrosione. Per far sì che l'interstizio diventi sede per l'innesco del fenomeno corrosivo deve essere sufficientemente ampio per permettere l'entrata del liquido e sufficientemente stretto per mantenere le condizioni di una zona stagnante, come quello che si può creare tra una rosetta ed un dado (*figura 13*). Per tale ragione questo tipo di corrosione richiede solitamente delle aperture sul metallo di pochi millesimi di un pollice o meno di profondità.



**Figura 13:** Esempio di corrosione interstiziale verificatosi tra un dado e la rispettiva rosetta.

Un particolare caso di corrosione interstiziale è costituito dalla *corrosione filiforme*, di cui si può apprezzare un ingrandimento al microscopio, riportato nella *figura 14*, che spesso si verifica al di sotto di film protettivi. E' una tipologia di corrosione interstiziale piuttosto facile da incontrare, il cui esempio più comune è l'attacco di superfici smaltate o laccate di contenitori per cibi e bevande esposti all'atmosfera. Essa si manifesta come filamenti di prodotti di corrosione con colorazione rossastra o marrone, facilmente individuabili ed è stata osservata su superfici di acciaio, magnesio e alluminio coperti da rivestimenti in argento, oro, fosfati e smalti. Questo tipo di corrosione non intacca la funzionalità del componente metallico che ne è affetto, poiché è un fenomeno che riguarda solo ed esclusivamente la superficie dello stesso.



**Figura 14:** Esempio di corrosione filiforme generata dall'acido citrico su lega AA1200 H22 dopo 72 ore di esposizione.

Nella *figura 14* viene riportato un esempio di *corrosione filiforme*, generata dall'acido citrico su lega AA1200 H22 dopo 72 ore di esposizione.

#### 3.1.4 Corrosione alveolare (*Pitting*)

Con la definizione *corrosione alveolare*, nota in gergo tecnico con il termine *Pitting*, si fa riferimento ad una forma di corrosione estremamente localizzata, che si manifesta come fori, chiamati a punto *alveoli*, che definiscono la rottura del film protettivo passivante del metallo stesso. Da un punto di vista estetico, questo tipo di corrosione si manifesta con la formazione di piccoli puntini di colorazione differente rispetto al metallo circostante sulla superficie del componente. Questi piccoli pozzi, *pits* in inglese, che presentano geometria puntiforme e colorazione differente, sono indice di una rimozione del materiale e spesso si trovano isolati o molto ravvicinati tra loro, conferendo alla superficie un aspetto rugoso e possono essere facilmente descritti come cavità, le cui dimensioni del diametro e della profondità coincidono.



Figura 15: Vista in sezione di un alveolo su Al 6061 provocato da soluzione di NaCl a 0.1M.

Le cavità, di cui si può apprezzare un esempio al microscopio nella *figura 15*, che si creano, comportano una bassa perdita di massa del metallo e sono difficili da rilevare, a causa delle dimensioni caratteristiche e perché spesso la loro superficie risulta coperta dai prodotti di corrosione stessi. In aggiunta, risulta complesso valutare quantitativamente e comparare l'estensione del fenomeno per la variabilità dei fori che si possono formare nelle stesse condizioni, tanto da rendere questa forma di corrosione difficilmente predicibile con test di laboratorio. Questa tipologia di corrosione si verifica principalmente nei metalli passivi come l'alluminio, il titanio e l'acciaio inox, che devono la loro resistenza alla corrosione ad un sottile strato di ossido sulla superficie con spessore di pochi nanometri. Il processo di corrosione alveolare ha inizio proprio con una frattura locale dello strato passivo.



Figura 16: Corrosione alveolare su un componente in acciaio inox.

Nella *figura 16* si osservano dei *pits* in stato avanzato, poiché già visibili ad occhio nudo e riconoscibili come puntini bianchi sulla superficie del componente. Questa forma di corrosione è una delle più distruttive e insidiose: generalmente il fenomeno richiede mesi o anni

per manifestarsi chiaramente al punto da esser visibile e, una volta avviatosi, procede all'interno del metallo con una velocità sempre crescente, rendendo questa tipologia di corrosione estremamente pericolosa. La corrosione alveolare spesso si caratterizza come l'inizio di forme corrosive ben più gravi, quali ad esempio la tensiocorrosione.



Figura 17: Rappresentazione schematica della corrosione alveolare.

La differenza sostanziale tra una corrosione uniforme e la corrosione alveolare è rappresentata schematicamente nella figura 17.

### 3.1.5 Corrosione intercristallina/intergranulare

La corrosione intercristallina è una forma particolare di corrosione localizzata, in cui l'attacco corrosivo ha luogo lungo un percorso molto ristretto, che solitamente si sviluppa seguendo i bordi di grano della struttura cristallina. Quando un metallo si corrode ne risulta un attacco uniforme, poiché i bordi di grano sono solitamente solo leggermente più reattivi della matrice. Tuttavia, sotto alcune condizioni specifiche, le interfacce tra i grani risultano particolarmente reattive e questo sfocia nella corrosione intergranulare. L'attacco localizzato e adiacente ai bordi di grano con un interesse relativamente ristretto dei grani stessi è definito corrosione intergranulare ed è schematizzato nella figura 18, dove si può osservare come il processo segua i confini dei grani cristallini. Questo tipo di corrosione può essere causato da impurità presenti nei bordi di grano, arricchimento di uno degli elementi leganti o soppressione di uno di essi nelle aree interessate.



Figura 18: Rappresentazione della corrosione intercristallina.

L'effetto più comune di questa tipologia di corrosione, di cui si può osservare un esempio grazie ad un ingrandimento di un componente in titanio, trattato con metanolo anidro contenente dei cloruri, al microscopio nella *figura 19*, è una rapida disgregazione meccanica, la quale comporta una perdita in duttilità del materiale. E' una forma di corrosione che comunemente viene prevenuta con l'utilizzo di materiali e processi di produzione appropriati.



**Figura 19:** Ingrandimento 350x della corrosione intergranulare su componente in titanio in contatto con metanolo anidro contenente tracce di cloruri.

#### 3.1.6 Lisciviazione selettiva (Selective Leaching)

La *lisciviazione selettiva*, nota anche come *corrosione selettiva* o meno comunemente con altri termini quali *dealloying*, *demetallificazione* e *troncatura*, è un particolare tipo di corrosione che si verifica nelle leghe per soluzione solida, quando in particolari condizioni un elemento subisce un processo di lisciviazione a partire dalla condizione iniziale in forma preferenziale. Il materiale meno nobile è rimosso dalla lega mediante corrosione galvanica su scala micrometrica. Le leghe più suscettibili a questo tipo di corrosione sono quelle che contengono elementi metallici maggiormente distanti nella serie del potenziale elettrochimico, ad esempio rame e zinco nell'ottone. Gli elementi che sono maggiormente esposti a questa tipologia di corrosione sono: zinco, cobalto, alluminio, cromo e ferro.



**Figura 20:** Ingrandimento 100x del fenomeno di lisciviazione selettiva in un componente in ghisa.

Nella figura 20 vi è l'ingrandimento di un componente in ghisa, che presenta il fenomeno corrosivo della lisciviazione selettiva.

#### 3.1.7 Corrosione erosiva

La corrosione erosiva è l'accelerazione del processo di corrosione o l'incremento della velocità di deterioramento causato dal movimento relativo tra un fluido corrosivo e la superficie di un metallo. Di solito questo movimento è piuttosto rapido ed è accompagnato da usura meccanica o abrasione. La velocità del fluido gioca un ruolo fondamentale nel processo ed un flusso turbolento certamente incrementa la corrosione del metallo, rispetto a quanto fatto dalla stessa tipologia di fluido, ma in regime laminare. Il metallo viene rimosso dalla superficie similmente a ioni dissolti o in forma di prodotti solidi di corrosione. A volte il movimento dell'ambiente rallenta la corrosione, in particolare quando l'attacco localizzato si verifica in condizioni di stagnazione, ma in questo caso non si parla di corrosione erosiva, perché il deterioramento non è incrementato. La corrosione erosiva è caratterizzata da scanalature, canali, onde, fori arrotondati e valli e di solito si presenta con una direzione preferenziale. Nella maggior parte dei casi i cedimenti dovuti a questa tipologia di corrosione avvengono in un tempo relativamente ristretto e in modo inaspettato: risulta difficile predire lo sviluppo temporale a causa della staticità intrinseca dei fenomeni coinvolti nei test di laboratorio. Molti metalli e leghe sono suscettibili a questo tipo di corrosione ed ai danni ad esso legati e dipendono anche dallo sviluppo di un film protettivo sulla superficie o una sorta di struttura resistente alla corrosione. Esempi sono l'alluminio, il piombo e l'acciaio inossidabile. La corrosione erosiva si verifica quando le superfici protettive risultano danneggiate o logorate. Sono numerosi gli agenti corrosivi, causa di questa forma di corrosione: gas, soluzioni acquose, sistemi organici e metalli liquidi. Per esempio particelle solide in sospensione in un liquido possono essere particolarmente distruttive. Qualsiasi sistema esposto al movimento di fluidi è soggetto all'erosione corrosiva.

#### 3.1.8 Tensocorrosione (Stress Corrosion Cracking)

La *tensocorrosione*, nota con il termine inglese di *Stress Corrosion Cracking (SCC)*, si presenta quando vi è compartecipazione di una tensione meccanica e di un mezzo corrosivo sullo stesso elemento. Essa può portare all'improvviso cedimento di metalli, solitamente duttili, soggetti a livelli di sollecitazione di molto inferiori alla loro tensione di snervamento. Le sollecitazioni interne ad un materiale possono essere sufficienti ad avviare un attacco di tensocorrosione.



**Figura 21:** Stress Corrosion Cracking di acciaio 304 in soluzioni a concentrazioni differenti di cloruro di magnesio.

Nella figura 21 sono stati fotografati gli effetti di un processo di *tensocorrosione* su un componente in acciaio 304 immerso in soluzioni di cloruro di magnesio a concentrazioni differenti. Questa tipologia di corrosione non si caratterizza solamente come una sovrapposizione di fenomeni corrosivi e sollecitazioni meccaniche, ma può essere effettivamente visto come un processo autocatalitico autoaccelerante che produce tassi consistenti di dissoluzione del metallo (reazione anodica). Durante lo sviluppo del fenomeno in questione, la maggior parte della superficie del metallo risulta virtualmente inattaccata, fino a quando una piccola fessura attraversa il componente. Il tutto prende avvio dalla formazione di un alveolo, come si può apprezzare nella rappresentazione schematica del fenomeno in *figura 22*, che evolve in una crepa, la quale definisce una nuova superficie metallica attiva, dove può cominciare un nuovo processo di corrosione. Questo provoca un'ulteriore propagazione della crepa e quindi la formazione di nuove superfici metalliche attive. Il processo di dissoluzione del metallo nella crepa avanza rapidamente, fino al punto in cui vi è il cedimento meccanico.



Figura 22: Fasi di sviluppo per la creazione di una frattura da SCC.

I due classici casi di *SCC* sono season cracking dell'ottone e il caustic embrittlement dell'acciaio. Entrambe le obsolete terminologie descrivono le condizioni ambientali presenti, che favoriscono l'insorgenza dello *Stress Corrosion Cracking*. Il primo si riferisce allo *SCC* che è stato rilevato per la prima volta nelle cartucce dei proiettili durante i periodi di intense precipitazioni, specialmente negli ambienti tropicali. Solo in seguito si comprese che il componente più importante presente nell'ambiente circostante era l'ammonio, derivante dalla decomposizione degli organismi viventi. Il secondo si riferiva invece, ai cedimenti strutturali nei quali veniva rilevata una forte presenza di idrossido caustico o sodico nell'area in cui si innescava la frattura, fenomeno rilevato frequentemente nelle esplosioni di contenitori rivettati trasportati dalle prime locomotive a vapore. Un esempio di questa seconda tipologia è riportato nella fotografia in *figura 23*, dove si può osservare la frattura dell'involucro di un razzo in acciaio.



**Figura 23:** Frattura dell'involucro di un razzo in acciaio ad alta resistenza causato da SCC.

In generale, le variabili più importanti per queste tipologie di fenomeni sono la temperatura, la composizione della soluzione, la composizione del metallo, la tensione e la struttura metallica, tuttavia vi sono tre requisiti fondamentali perché il fenomeno insorga:

- Meccanico (carico/sollecitazione).
- Materiale (un metallo o una lega suscettibile al fenomeno).
- Ambiente (altamente corrosivo, come i cloruri).

Nella maggior parte dei casi la corrosione è avviata dai cloruri che attaccano lo strato passivo del metallo. Esattamente come la SCC, vi è un'altra tipologia di infragilimento legata all'ambiente operativo del componente: l'*infragilimento da idrogeno*. Questo è provocato dalla diffusione di atomi di idrogeno nel metallo. La presenza di questo gas riduce l'integrità meccanica del metallo e comporta la formazione di crepe e la frattura da infragilimento a livelli di sollecitazione inferiori alla tensione di snervamento. Come la tensocorrosione, può provocare cedimenti improvvisi del componente metallico strutturale, senza dare alcun segnale d'allarme. Comunemente, il danno da idrogeno riguarda solamente l'acciaio ad alta resistenza con resistenze a trazione pari o superiori a circa  $1000N/mm^2$ . Anche per questa tipologia di corrosione legata all'ambiente, devono essere rispettate tre condizioni contemporaneamente:

- Meccanica (carico/sollecitazione).
- Materiale (durezza, struttura).
- Ambientale (idrogeno esterno/interno).

La sorgente di idrogeno può essere il processo stesso di fabbricazione dell'acciaio, il decappaggio e l'elettrogalvanizzazione. Invece, una fonte secondaria può essere rappresentata dall'idrogeno formatosi durante il processo di corrosione, che si diffonde nel materiale, provocando una riduzione della resistenza o della duttilità dello stesso.

### 3.2 Perché studiare i fenomeni corrosivi?

Viviamo in società fortemente industrializzate, che si fondano sull'utilizzo di strutture metalliche. Differenti tipi di acciai sono utilizzati per le strutture commerciali, i ponti, le automobili, i treni da trasporto passeggeri, gli aerei, le navi, le abitazioni, i contenitori per il cibo... Anche le leghe di alluminio trovano largo impiego nelle società moderne: velivoli, packaging alimentare, circuiti elettronici, strumenti e dispositivi medici. Ad oggi vi sono 85 metalli presenti nella tavola degli elementi chimici conosciuti e tutti, chi più chi meno, tendono a reagire con l'ambiente circostante con caratteristiche differenti, dando luogo al fenomeno della corrosione. Ci sono numerose ragioni che spingono a studiare questa tipologia di fenomeno naturale, ma tutte possono essere sintetizzate in tre aspetti puramente pratici:

- La salvaguardia della vita umana.
- Il costo legato al fenomeno.
- La conservazione dei materiali.

Il 15 dicembre del 1967 il Silver Bridge in Ohio, Stati Uniti d'America, cedette (*figura 24*), provocando la morte di 46 persone. La causa del cedimento strutturale fu attribuita allo stress meccanico ed alla corrosione degli elementi strutturali.



Figura 24: Foto del Silver Bridge crollato il 15 dicembre del 1967.

Il 28 aprile del 1988 la cabina di un velivolo commerciale in rotta da Hilo verso Honolulu nelle Hawaii, si disintegrò improvvisamente. Morì nell'incidente un membro dell'equipaggio di volo e rimasero feriti 65 passeggeri. La causa del problema venne individuata nell'effetto combinato di affaticamento del metallo e corrosione. E' evidente come la conoscenza, derivante da uno studio approfondito e continuo dei fenomeni alla base dei processi di corrosione delle strutture metalliche, possa permettere di prevenire il verificarsi di eventi potenzialmente catastrofici, che richiedono il pagamento in vite umane. Nel 1978 è stato condotto uno studio su larga scala negli Stati Uniti d'America per valutare quali fossero gli effetti in termini economici della corrosione dei metalli. Il risultato fu impressionante: il costo totale della corrosione, solo per l'anno 1975, si aggirava intorno ai 70 miliardi di dollari, pari approssimativamente al 5% del prodotto interno lordo. Un altro studio più recente, basato sugli anni 1999, 2000 e 2001, riportò come cifra l'ingente valore di 276 miliardi. Numerosi altri studi della stessa natura sono stati condotti nel tempo e su più nazioni: la cifra, legata alla problematica della corrosione, si aggira sempre intorno al 3-5% del prodotto interno lordo del paese interessato. Risulta immediatamente chiaro come questo fenomeno, che interessa le strutture metalliche e non solo, abbia una ricaduta piuttosto rilevante sull'economia di ciascun paese e che debba necessariamente essere limitato per quanto possibile, attraverso una conoscenza adeguata dello stesso. Il terzo aspetto più rilevante, citato precedentemente, riguarda la conservazione delle materie prime. I metalli, che vanno incontro ai processi corrosivi, subiscono implicitamente dei fenomeni di degradazione, che comportano una perdita delle proprietà meccaniche. Questo aspetto ha come diretta conseguenza la necessità di sostituire il componente con uno nuovo e dunque il consumo sempre più importante di risorse, che scarseggiano sempre più; da qui la necessità di trovare soluzioni che possano limitare e rallentare i fenomeni corrosivi o addirittura inibirli.



**Figura 25:** Foto di un deposito di auto usate negli Stati Uniti in attesa di rottamazione.

Nella *figura 25* viene riportata la fotografia di un deposito di auto negli Stati Uniti in attesa di essere rottamate, esempio della grande quantità di metallo disponibile e spesso non recuperato in tempo, causa di ricerca di nuovo materiale. Da un punto di vista meno pragmatico la corrosione costituisce un interessante campo di studio, poiché racchiude in sé numerose branche scientifiche quali la chimica, la meccanica e l'ingegneria dei materiali, rappresentando così una sfida intellettuale accattivante e sempre in evoluzione.

## 4 Le nanotecnologie

Ad oggi con il termine *nanomateriali* si definiscono tutti i materiali caratterizzati dall'avere almeno una delle tre dimensioni fisiche spaziali caratteristiche inferiori ai 100 nm. La dimensione nanometrica rappresenta il confine tra il mondo macroscopico e quello atomico e, più in particolare, il passaggio tra la validità delle leggi della fisica classica e le leggi della fisica quantistica. Le nanotecnologie fanno della capacità di agire e manipolare la materia su scala nanometrica la principale peculiarità ed hanno come obiettivo lo sfruttamento delle proprietà e dei fenomeni fisico-chimici, che si presentano su questa scala dimensionale, fortemente influenzati dall'elevatissimo rapporto superficie/volume di questi materiali. In un primo momento i nanomateriali possono essere classificati sulla base del numero di dimensioni che rientrano nella scala nanometrica. Si distinguono strutture:

- Zero-dimensionali: tutte e tre le dimensioni sono su scala nanometrica (e.g. nanocristalli, cluster, quantum dots).
- *Mono-dimensionali*: solo una delle tre dimensioni è superiore ai 100 nm (e.g. nanofili, nanotubi).
- *Bi-dimensionali*: solo una delle tre dimensioni è su scala nanometrica (e.g. matrici di nanoparticelle, superfici e film sottili).
- *Tri-dimensionali*: nessuna delle tre dimensioni è su scala nanometrica.

A queste categorie possono poi appartenere materiali amorfi o cristallini, mono o policristallini, costituiti da uno o più elementi chimici, isolati o posti in una matrice. I materiali ridotti a scala nanometrica possono presentare caratteristiche totalmente differenti, e spesso opposte, a quelle che presenterebbero se si trovassero su scala dimensionale maggiore: queste diametrali differenze si spiegano con l'insorgere di effetti quantistici, quali la variazione della struttura elettronica, l'elevato numero di atomi superficiali, l'aumento dei legami insaturi e le variazioni della banda energetica proibita.

## 4.1 Metodologie di produzione dei nanomateriali

La realizzazione dei nanomateriali vede come requisito fondamentale il controllo del processo di sintesi, che determina le specifiche morfologiche, dunque le proprietà strutturali e funzionali, e può seguire un approccio chimico o fisico:

- Approccio chimico (*bottom up*): vede l'assemblaggio atomo dopo atomo o molecola dopo molecola, sfruttando la naturale capacità di alcuni atomi o molecole di autoassemblarsi.
- Approccio fisico (top down): vede la creazione di strutture molto piccole, partendo da macromateriali.

Da un punto di vista pratico, spesso i due approcci trovano impiego contemporaneamente. Le metodologie con cui vengono ottenuti i materiali sono numerose, per cui si riportano di seguito quelle maggiormente utilizzate:

- Condensazione in gas inerte: utilizzata ad esempio per i nanomateriali zero-dimensionali, vede un materiale organico o inorganico vaporizzato in un ambiente sottovuoto, nel quale viene immesso generalmente Ar o He. Quando gli atomi evaporano, subiscono una rapida perdita di energia, collidendo così sugli atomi di gas inerte. Il vapore si raffredda rapidamente e supersatura per formare nanoparticelle di dimensioni comprese tra 2 e 100 nm, le quali vengono raccolte su una struttura tubolare, raffreddata con azoto liquido, dalla quale vengono successivamente raschiate via. Questa tecnologia permette di ottenere nanoparticelle di leghe metalliche o compositi metallo/ossido, utilizzando sorgenti multiple.
- *Espansioni in gas inerte*: utilizzata per nanomateriali zero-dimensionali, il materiale viene vaporizzato e gli atomi così ottenuti vengono trasportati da gas ad alta pressione, tipicamente He, che poi si espande attraverso una strozzatura a velocità supersonica in una camera a bassa pressione. L'espansione adiabatica, subita dal gas, ha come conseguenza un rapido raffreddamento, che comporta una condensazione degli atomi vaporizzati.
- Trattamento sono-chimico: utilizzata per materiali zero-dimensionali, vede la realizzazione di una reazione chimica grazie all'utilizzo di ultrasuoni, nel campo di frequenze tra 15 kHz e 1 GHz. L'onda ultrasonica, generata da un trasduttore magnetostrittivo o piezoelettrico, si propaga all'interno di un contenitore contenente un liquido, che ne consente la trasmissione. Le reazioni chimiche avvengono per cavitazione: la componente elastica delle onde è sufficientemente intensa da espandere il liquido e formare una piccola cavità; quella compressiva agisce sulla cavità, ma prima che questo accada, una parte dei reagenti vaporizza al suo interno, cosicché la successiva onda elastica faccia espandere nuovamente la bolla, il cui volume oscilla alla frequenza dell'onda acustica. Quando la bolla raggiunge una dimensione critica, collassa. Questo fenomeno è un processo adiabatico, a causa delle elevatissime velocità con cui il tutto si verifica. Le temperature e le pressioni coinvolte sono molto elevate (dell'ordine dei 5000°C e 2000 atm) ed è proprio questa caratteristica che attiva le reazioni di formazione delle nanoparticelle. Solitamente con questa tecnica si utilizzano precursori organo-metallici, ceramici e metallici.
- Deposizione Sol-gel: utilizzata per nanomateriali zero-dimensionali, questa tecnica permette di ottenere particelle ultrafini, nanofilm e membrane nanoporose. Si parte dalla realizzazione di una soluzione di uno o più precursori, in genere sali metallici o compositi organo-metallici, con appropriato solvente. I precursori vengono sottoposti ad una reazione di polimerizzazione, che permettere di ottenere una sospensione colloidale (detta *sol*), costituita da particelle discrete finemente disperse, mantenute in sospensione grazie ad un tensioattivo. La sospensione può essere trattata per estrarre le particelle o depositata su un substrato. Essa è quindi convertita in un gel, mediante trattamento chimico, che produce un superpolimero, dato da un'enorme molecola sotto forma di reticolo tridimensionale. La successiva evaporazione del solvente consente di ottenere un film denso o nanoporoso. Questa tecnologia permette di realizzare vernici, detergenti, materiali tubolari e rivestimenti.

- Autoassemblaggio molecolare: utilizzata per nanomateriali zero-dimensionali e bi-dimensionali, questa tecnologia consiste nell'organizzazione automatica di molecole organiche e/o inorganiche. E' necessario semplicemente creare le condizioni ambiente per cui queste reazioni spontanee possano avvenire.
- Deposizione fisica da fase vapore, PVD: utilizzata per nanomateriali zero-dimensionali o bi-dimensionali, questa tecnica vede uno strato sottile di materiale depositato da fase vapore su un substrato da rivestire: il costituente da depositare evapora in una camera sottovuoto grazie all'azione di riscaldamento diretto o mediante un fascio elettronico, per poi condensare su un substrato freddo. Cambiando il materiale in fase di evaporazione è possibile realizzare un prodotto multistrato. Questa tecnologia viene utilizzata per rivestimenti protettivi, antiusura e catalitici.
- *Elettrodeposizione*, *ELD*: utilizzata per nanomateriali mono-dimensionali e bi-dimensionali, consente di depositare nanoparticelle o strati metallici su un substrato conduttore. Il processo consiste nella riduzione potenziostatica o galvanostatica di ioni metallici presenti in soluzione acquosa sulla superficie del substrato. Questa tecnica è normalmente utilizzata per la realizzazione di rivestimenti a scopo protettivo, estetico e funzionale.
- *Sintesi elettrochimica di nanotubi*: utilizzata per nanomateriali mono-dimensionali, è un processo di formazione di nanotubi, grazie all'ossidazione elettrochimica di un metallo in un elettrolita contenente ioni fluoruro.
- Deposizione chimica da fase vapore, CVD: utilizzata per nanomateriali zero, mono, bi e tri-dimenisionali, si basa sulla dissociazione, generalmente catalitica, in fase gassosa delle molecole dei precursori e sulla deposizione degli atomi, così ottenuti, sulla superficie di un substrato. Tutte le tecniche di CVD richiedono che la miscela dei gas precursori utilizzata sia attivata con una sorgente di energia e questa definisce il particolare processo: Thermal CVD, Hot Filaments CVD, Plasma Enhanced CVD e Micro Wave CVD.
- *Macinazione e alligazione meccanica ad alta energia*: utilizzata per nanomateriali tridimensionali, è una tecnica che combina una deformazione estrema con una alligazione energica di due materiali: le particelle dei due materiali vengono immesse in un mulino a sfere ad alta energia di macinazione, così che i materiali vengano intrappolati, schiacciati, fusi e spezzati. Questo processo realizza particelle meccanicamente alligate, altamente deformate, fino alla nanoscala.

### 4.2 Campi di applicazione delle nanotecnologie

Seppur con il termine *nanotecnologie* si faccia riferimento ad una branca della scienza dei materiali non ancora profondamente studiata e conosciuta, le applicazioni nanotecnologiche sono già numerose nel mondo odierno e tra le più disparate, che coprono sia aspetti civili che militari, dove l'innovazione e la ricerca sono più che in altri campi particolarmente accentuate. Le nanoparticelle trovano una loro particolare applicazione ad esempio nel settore industriale alimentare, dove, attraverso la costituzione di aggregati atomici o molecolari, si ottiene un rivestimento protettivo che rallenta la maturazione dell'alimento stesso o si uti-

lizzano degli agenti antimicrobici che influiscono positivamente sulla durata dell'alimento, rappresentando così un'ottima soluzione per combattere l'ormai noto problema dello spreco alimentare. Nello stesso settore le nanotecnologie non vengono solamente poste sulla superficie dell'alimento per rallentare la sua naturale evoluzione, ma vengono anche utilizzate per realizzare nano-sensori in grado di tenere sotto controllo i parametri di conservazione dello stesso, soprattutto durante le fasi critiche di stoccaggio e trasporto. Notoriamente l'introduzione delle nanotecnologie ha coinvolto ormai maggiormente il settore delle costruzioni, grazie alla realizzazione di nuovi materiali, strutturati diversamente a livello microscopico, quali i nano-tubi, utilizzati in particolare per le strutture portanti con notevole risparmio in peso, il calcestruzzo ad alta resistenza, i siliconi a conduzione termica o i materiali anti-corrosione, autopulenti, isolanti, anti-scivolo o idrorepellenti, quelli che permettono di ridurre il rumore e di preservare dalla proliferazione batterica. In tal senso, questi materiali innovativi vengono utilizzati anche per la salvaguardia del patrimonio mobiliare ed immobiliare di molti paesi. Le nanotecnologie assumono particolare importanza anche nel settore dell'elettronica, dove hanno fatto sì che vi fossero grandi evoluzioni, costituendo di fatto uno dei maggiori campi di applicazione. La dimensione caratteristica di questi materiali, ha permesso e permette di realizzare componenti sempre più piccoli e performanti, che troviamo già in numerosi oggetti di uso comune: videocamere, scanner, sensori anti-collisione e fari intelligenti. Anche l'ambito medico ha visto nel tempo una graduale, quanto importante, introduzione delle nanotecnologie. Queste hanno permesso la nascita della *medicina di precisione*: la realizzazione di nano-particelle ha concesso l'abbattimento fisico che impediva naturalmente alcuni processi. Infatti, la membrana cellulare non rappresenta più un limite insormontabile, ma può essere facilmente superata, permettendo così di operare al livello dei processi biologici. La speranza coltivata ad oggi è quella di riuscire a progettare e costruire robot della dimensione nanometrica, che siano in grado di realizzare particolari, quanto estremamente precisi ed efficaci, interventi chirurgici. Ovviamente parallelamente al campo medico, vi è quello farmaceutico, dove le nanoparticelle vengono pensate e realizzate come veicoli di molecole in grado di raggiungere obiettivi specifici. Un altro settore in cui le nanotecnologie cominciano a trovare largamente impiego è quello della produzione di energia: i componenti che presentano questo tipo di tecnologia permettono di migliorare l'efficienza nella produzione, nella gestione e nel risparmio energetico. Tutto ciò è stato reso possibile dallo sviluppo di nanocatalizzatori ad esempio, in grado di migliorare l'efficienza dei motori termici o nanostrutture che rendono i nuovi materiali più leggeri, ma al contempo più forti e meglio coibentati. Un esempio estremamente significativo dell'utilizzo di questa nuova tecnologia nel comparto energetico è rappresentato dalla possibilità di sostituire i tradizionali pannelli fotovoltaici con la cosiddetta vernice solare, che permetterebbe di produrre energia, semplicemente sfruttando l'umidità presente nell'aria, grazie ad un gel di silice. Già nel 2008 un team di ricercatori italiani ha compiuto un passo importante in questa direzione in collaborazione con l'Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati del CNR di Bologna, pensando alla realizzazione di una particolare vernice capace di sfruttare l'energia solare per produrre energia elettrica. La vernice progettata e prodotta, composta da più strati, definita Photon Inside, vede una struttura realizzata con 5 strati della grandezza nanometrica ognuno con funzioni differenti: il primo permette di aderire alla superficie su cui viene posta, il secondo ed il quarto realizzati con materiale elettricamente conduttivo, il terzo in grado di assorbire fotoni e convertirli in

energia elettrica ed il quinto necessario a racchiudere tutti gli altri strati. Si è stimato per la vernice una resa di 3 kW di energia per 50  $m^2$  di pittura. Inoltre, questa vernice non contiene silicio, diversamente da molte altre, il che costituisce motivo di pregio, considerando il difficile reperimento dell'elemento ed il suo costo sempre più elevato. Anche il comparto tessile ha cominciato a beneficiare dell'introduzione delle tecnologie su scala nanometrica: sono stati prodotti tessuti intelligenti in grado di garantire idrorepellenza, capacità di autopulirsi e costituire una barriera alle fiamme. Come abbiamo già visto le nanotecnologie offrono numerose opportunità applicative e sicuramente dove trovano largo spazio per essere studiate e applicate è il settore militare, sempre all'avanguardia in termini di ricerca tecnologica. In tal senso, vengono studiati maggiormente per la realizzazione dei sistemi d'arma e di difesa, per i mezzi bellici e per gli equipaggiamenti del singolo soldato. Ovviamente non è dato sapere quanto la ricerca abbia prodotto concretamente, ma si sa che si parla già di laser nanopotenziati, munizioni con maggiore capacità esplosiva, nano-robot autoreplicanti, sistemi di difesa in grado di maggiorare il proprio campo d'azione e la propria sensibilità per rilevare la presenza di esplosivi ed eventualmente neutralizzarli, sistemi filtranti che impediscano il passaggio di sostanze pericolose in ambienti strategicamente rilevanti, sistemi di protezione superficiale dei mezzi di trasporto e da combattimento che riducano l'usura, aumentino la protezione dagli attacchi esterni e richiedano minore manutenzione, con conseguente riduzione dei costi e implementazione delle nanotecnologie nei trattamenti biochimici del soldato per il miglioramento delle sue capacità individuali e dunque performance sul campo, oltre alla progettazione di indumenti migliori. Se quanto presentato fino ad ora risulta poco visibile nella quotidianità di tutti noi, è anche vero che le nanoparticelle sono ad oggi utilizzate anche per le superfici antigraffio di vetri e metalli, per la realizzazione di microsfere pulenti nei dentifrici, e sottoforma di biossido di titanio per la protezione dai raggi ultravioletti nelle creme solari.

## 4.3 Le nanotecnologie della *4 Ward360 Nanotechnology* per la protezione dei metalli

Per la protezione del metallo base con cui vengono realizzati i componenti strutturali maggiormente sollecitati del velivolo *DARDO*, l'alluminio 2024 T3, la società *4Ward360 Nanotechnology*, ha proposto un particolare trattamento nanotecnologico con matrice realizzata in diossido di silicio, a base d'acqua o etanolo, che crea una protezione non visibile ad occhio nudo sulle superfici in acciaio e metalliche in generale. Il trattamento proposto, noto nel dettaglio come *4Ward\_Metal*, non è filmogeno ed è traspirante e reversibile, rappresentando un'innovazione nel campo della protezione del metallo, poiché modifica l'energia superficiale dello stesso: minore è l'energia di superficie e minore risulta la possibilità di adesione dello sporco e di altri contaminanti. Infatti il trattamento *4Ward\_Metal* realizza una barriera repulsiva nei confronti degli agenti esterni, pur garantendo due vantaggi importanti: è privo di solventi e non inquina. Una volta trattata la superficie metallica, questa acquisisce alcune caratteristiche importanti, che vengono riassunte di seguito:

- Idrorepellenza.
- Effetto anti-impronta.
- Effetto distaccante per calcare, residui di saponi e smog.
- Effetto distaccante per salsedine e sabbia.
- Effetto distaccante della superficie metallica dallo stampo di lavorazione.
- Effetto protettivo contro la corrosione.
- Effetto protettivo antibatterico.
- Resistenza alle basse e alle alte temperature: da -35°C a +450°C.
- Protezione antighiaccio.

Le caratterstiche elencate sopra, in particolare la possibilità di proteggere il materiale dalla corrosione, hanno fatto sì che il trattamento proposto dalla 4Ward360 Nanotechnology costituisse un buon candidato per la ricerca di un sostituto dell'attuale rivestimento garantito alle componenti metalliche del velivolo prodotto dall'azienda CFM Air.

# 5 La fatica nei materiali metallici

La fatica è un fenomeno meccanico che si caratterizza per una progressiva degradazione del materiale interessato, il quale risulta soggetto a carichi variabili nel tempo, capaci di portare a rottura il componente, pur rimanendo nel limite di elasticità del materiale. I cedimenti per fatica sono un problema tecnico ben noto nelle strutture metalliche. Già a partire dal diciannovesimo secolo sono stati documentati numerosi incidenti, frutto di questo fenomeno e per tale ragione si cominciarono a studiarne le cause per la prima volta. Studi degni di nota sono certamente quelli condotti da August Wöhler, il quale riconobbe che l'applicazione di un singolo carico, lontano da quello che avrebbe portato a rottura il materiale immediatamente, non costituiva motivo di danno per il componente. Tuttavia, se lo stesso carico fosse stato applicato ciclicamente al materiale, avrebbe comportato il cedimento dello stesso. Il fenomeno rimase nel diciannovesimo secolo abbastanza misterioso, poiché non si riusciva a dare un'evidenza concreta dell'esistenza dello stesso e soprattutto poiché si manifestava improvvisamente. Nel ventesimo secolo si cominciò a capire come l'applicazione di un carico ciclico innescasse il meccanismo della fatica a partire dalla nucleazione di una piccola cricca, seguita dall'accrescimento della stessa ed infine dal cedimento della struttura. In un componente soggetto ad un carico ciclico, i nuclei delle crepe di fatica iniziano su scala microscopica, per poi accrescersi su scala macroscopica ed infine giungere alla dimensione che porta alla rottura del componente, la quale avviene nel ciclo finale della vita a fatica dello stesso. Alcuni studi condotti in materia hanno dimostrato che i nuclei delle cricche per fatica cominciano a svilupparsi come invisibili microcricche in bande di scorrimento e si palesano fin da subito nella vita a fatica di un materiale, soprattutto se il carico applicato si avvicina molto al *limite di fatica* del materiale, definito come il livello di stress al di sotto del quale non si verifica il cedimento per fatica. Una volta che la cricca diviene visibile, e dunque raggiunge dimensioni ragguardevoli, la parte di vita rimanente costituisce una piccola percentuale di quella totale a fatica del componente stesso. E' particolarmente rilevante la suddivisione del processo complessivo in due fasi temporali precise: il periodo di creazione della cricca, quello iniziale, ed il periodo di acrescimento della stessa. Questa distinzione è fondamentale, poichè la prima fase è soggetta all'esistenza di numerosi fattori che possono influire, come i trattamenti superficiali e la rifinitura superficiale, mentre la seconda è praticamente indipendente da questi. Anche gli agenti corrosivi influenzano le due fasi, ma con caratteristiche differenti. Per questa ragione i metodi per predire la vita a fatica devono essere tarati sul periodo che si sta considerando: per il periodo iniziale si fa riferimento ad un importante parametro noto come Stress Concentration Factor, mentre per la fase di accrescimento e crescita della cricca, si parla di Stress Intensity Factor.

## 5.1 Gli stadi del danneggiamento per fatica

Si è già detto come un ciclo di sollecitazioni meccaniche, nei materiali metallici, induca delle deformazioni plastiche cicliche su scala microscopica o, in altre parole, il fenomeno delle dislocazioni della strutura cristallina del materiale. Queste deformazioni plastiche si verificano, poiché localmente la sollecitazione applicata supera il carico di snervamento e ciò accade in seguito alla presenza di piccole imperfezioni presenti nel materiale, quali possono essere le discontinuità legate alla presenza dei bordi di grano, le inclusioni non metalliche, i composti interstiziali e le rugosità superficiali. Il danneggiamento per fatica del materiale si articola lungo alcune fasi di sviluppo che possono essere così riassunte:

- Innesco della frattura.
- Fase di nucleazione.
- Propagazione della cricca.
- Frattura finale.

La prima fase di sviluppo del danneggiamento per fatica viene anche definita di assestamento *microstrutturale*, poiché ha l'effetto di stabilizzare il ciclo di isteresi plastica del materiale. definendo così alcune importanti caratteristiche meccaniche e fisiche del metallo. Il processo avviene a livelli di sollecitazioni inferiori rispetto a quelli che comporterebbero la rottura immediata del componente e per tale ragione la deformazione plastica è limitata a un piccolo numero di grani del materiale. Questa microplasticità si verifica preferibilmente nei grani della superficie del materiale, a causa del minore vincolo allo scorrimento presente in queste zone: infatti, sulla superficie libera di un materiale, il materiale circostante è presente solo da un lato, poiché dall'altro lato è presente l'ambiente esterno. Di conseguenza, la deformazione plastica nei grani superficiali è meno vincolata dai grani vicini rispetto ai grani subsuperficiali e può avvenire a un livello di sollecitazione inferiore. Lo slittamento ciclico, perché si verifichi, richiede uno sforzo di taglio ciclico e, su microscala, questo non è distribuito in modo omogeneo nel materiale, bensì varia da grano a grano sui piani di scorrimento cristallografici, a seconda delle dimensioni e della forma degli stessi, dell'orientamento cristallografico al loro interno e dell'anisotropia elastica del materiale. In alcuni grani sulla superficie del materiale, queste condizioni sono più favorevoli allo slittamento ciclico rispetto ad altri grani superficiali ed è qui che prende avvio il fenomeno. Se si verifica uno slittamento in un grano, si crea un gradino di slittamento sulla superficie del materiale e questo implica che un bordo di nuovo materiale sarà esposto all'ambiente e, almeno per gran parte dei materiali strutturali, il materiale fresco in superficie sarà immediatamente coperto da uno strato di ossido. Tali monostrati aderiscono fortemente alla superficie del materiale e non sono facilmente rimovibili, costituendo una causa della irreversibilità del fenomeno stesso. Un altro aspetto significativo è che lo scorrimento, durante l'aumento del carico, implica anche un certo indurimento della deformazione nella banda di scorrimento. Di conseguenza, al momento dello scarico sarà presente una maggiore sollecitazione di taglio sulla stessa banda di scorrimento, ma ora nella direzione opposta. Lo scorrimento inverso si verificherà quindi preferibilmente nella stessa banda di scorrimento. Il fenomeno della fatica è un processo irreversibile, in prima battuta per almeno due ragioni: il monostrato di ossido non può essere semplicemente rimosso dalla fase di scorrimento e l'indurimento da deformazione nella banda di scorrimento non è completamente reversibile. Di conseguenza, lo scorrimento inverso, sebbene avvenga nella stessa banda di scorrimento, si verificherà su piani di scorrimento paralleli adiacenti. La stessa seguenza di eventi può verificarsi al secondo ciclo. La minore limitazione dello scorrimento ciclico sulla superficie del materiale è stata indicata come una condizione favorevole all'innesco della cricca sulla superficie libera. Tuttavia, esistono più argomenti a favore dell'innesco di cricche sulla superficie del materiale. Una ragione molto pratica è la distribuzione disomogenea delle sollecitazioni dovuta all'effetto di intaglio di un foro o di un'altra discontinuità geometrica. A causa di una distribuzione disomogenea delle sollecitazioni, si verifica un picco di sollecitazione in superficie, detta concentrazione delle sollecitazioni. Inoltre, la rugosità superficiale favorisce l'innesco di cricche sulla superficie del materiale. Altre condizioni superficiali con un effetto simile sono le fosse di corrosione e i danni da fatica da *fretting*, che si verificano entrambi sulla superficie del materiale. Dunque, risulta di fondamentale importanza comprendere come la fase iniziale del processo di fatica, inteso come la nascita di una cricca ed il suo iniziale propagarsi sia un fenomeno superficiale. La seconda fase del processo complessivo vede la creazione di vere e proprie microcricche in corrispondenza delle microintrusioni che si sono create nella fase precedente, poichè è in queste zone che la sollecitazione risulta amplificata per effetto d'intaglio e porterà più facilmente al cedimento del materiale. Le microcricche che si formano tendono a riunirsi, dando vita ad una vera e propria cricca, che si ritiene tale quando raggiunge la dimensione di circa 0.1 mm. La crescita delle cricche da fatica nel periodo che contraddistingue questa fase non è più influenzata dalle condizioni superficiali del materiale, poiché è un fenomeno strettamente legato alle caratteristiche del materiale stesso. La terza fase, detta di propagazione della cricca, vede un avanzamento della stessa per un piccolo tratto lungo la direzione 45° dei difetti di estrusione e poi ortogonalmente alla direzione del carico esterno. In particolare, dopo la nucleazione della cricca, la sua propagazione avviene in maniera transgranulare, come nel caso di una frattura fragile, e in senso perpendicolare a quello del massimo sforzo. Ad ogni ciclo di sforzo la cricca avanza di un passo e lascia a volte tracce caratteristiche, dette striature. All'apice della cricca si ha una particolare intensificazione degli sforzi: se il materiale è tenace, si ha deformazione plastica e propagazione della cricca come nella frattura duttile, quindi aumenta il raggio di plasticizzazione all'apice della cricca e di conseguenza  $\sigma_m ax$ diminuisce, arrestando l'avanzamento della cricca stessa. Questo arrestarsi e ripartire della cricca per ogni ciclo dà origine alla formazione delle *linee di spiaqqia* tipiche della zona di propagazione. Poiché la crescita delle microcricche dipende dalla plasticità ciclica, le barriere allo scorrimento possono costituire una soglia per la crescita delle cricche. In numerosi studi si è effettivamente osservato che il tasso di crescita della cricca, misurato come incremento della lunghezza della cricca per ciclo, diminuisce quando l'apice della cricca si avvicina al primo bordo di grano della struttura cristallina del materiale, per poi aumentare nuovamente, dopo aver attraversato il confine del grano e diminuire successivamente quando si appresta ad attraversare il secondo confine del grano. Dopo aver superato tale confine di grano, la microcricca continua a crescere con un tasso costantemente crescente. Il fronte di cricca deve rimanere coerente con la struttura del materiale e per tale ragione la cricca non può crescere in ogni grano in una direzione arbitraria e a qualsiasi velocità di crescita indipendente dalla crescita della cricca nei grani adiacenti. Questa continuità impedisce grandi gradienti del tasso di crescita della cricca lungo il fronte di cricca. Non appena il numero di grani lungo il fronte di cricca diventa sufficientemente grande, la crescita della cricca avviene come un processo più'o meno continuo lungo l'intero fronte di cricca. Il fronte di cricca può essere approssimato da una linea continua, che potrebbe avere una forma semiellittica. La velocità di crescita della cricca dipende dalla resistenza alla crescita della cricca del materiale. La presenza delle linee di spiaggia, chiamate in alcuni casi anche striature può fornire informazioni essenziali per l'analisi dei guasti che si verificano in servizio. In primo luogo, se si

osservano striature, è evidente che almeno una parte del cedimento si è verificata a causa di carichi ciclici. Inoltre, le striature possono fornire informazioni sulla direzione di crescita della cricca e sul tasso di crescita della stessa. Purtroppo, queste però non sono ugualmente visibili per tutti i materiali: le osservazioni più rilevanti sono state ottenute sulle leghe di alluminio, tuttavia, ne è stata riscontrata la presenza anche su vari tipi di acciai, leghe di titanio e alcune altre leghe, ma di solito in modo meno abbondante e con margini meno definiti. E' importante comprendere però che, se non si osservano linee di spiaggia, non si deve concludere immediatamente che il materiale non sia andato incontro al fenomeno di fatica. La quarta ed ultima fase del processo si realizza nella frattura finale del componente: la cricca, avanzando lungo il suo cammino, comporta una riduzione della sezione resistente del componente e, quando questa raggiunge una dimensione critica, tale per cui non è più in grado di sopportare il carico applicato, si ha la rottura per schianto del pezzo.

# 5.2 Definizione dello Stress Concentration Factor $K_t$

I calcoli sulla resistenza delle strutture si basano principalmente sulla *teoria dell'elasticità*. Se la tensione di snervamento viene superata, si verifica una deformazione plastica e si deve ricorrere alla più complessa *teoria della plasticità*. Il fenomeno della fatica, tuttavia, è un fenomeno che si verifica a livelli di sollecitazione relativamente bassi, dunque si può facilmente ipotizzare che il comportamento elastico sia applicabile. Il comportamento elastico macroscopico di un materiale isotropo è caratterizzato da tre costanti elastiche: il modulo elastico o modulo di Young (E), il modulo di taglio (G) e il coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), legati dalla nota relazione  $E = 2G(1+\nu)$ . In una struttura reale risulta praticamente impossibile evitare gli intagli geometrici, come i fori, e questi causano una distribuzione disomogenea delle solecitazioni con una concentrazione delle sollecitazioni all'apice dell'intaglio, come mostrato nella figura 26: all'apice del foro vi è una intensificazione notevole delle sollecitazioni, che diminuisce gradualmente allontanandosi dallo stesso.



**Figura 26:** Rappresentazione schematica della distribuzione disomogenea degli stress in un elemento con foro centrale.

Il fattore teorico di concentrazione delle sollecitazioni, noto come  $K_t$ , è definito come il rapporto tra la sollecitazione di picco alla radice dell'intaglio e la sollecitazione nominale che si avrebbe se non si verificasse una concentrazione di sollecitazioni. L'intensità della concentrazione di sollecitazioni dipende dalla geometria della configurazione dell'intaglio, generalmente indicata come forma dell'intaglio.

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{peak}}}{\sigma_{\text{nominal}}}$$

L'elemento rettangolare con un foro centrale mostrato nella figura sopra è un prototipo di struttura con intaglio, che viene spesso utilizzato negli esperimenti sulla fatica per studiare gli effetti dell'intaglio sul comportamento meccanico del componente: se l'elemento è caricato da una distribuzione omogenea delle sollecitazioni, il foro causerà una distribuzione disomogenea delle sollecitazioni nella sezione critica, che è la sezione minima in corrispondenza del foro. Questa distribuzione delle sollecitazioni è caratterizzata da una sollecitazione di picco,  $\sigma_{peak}$ , alla radice dell'intaglio e da una sollecitazione nominale della sezione netta,  $\sigma_{nominal}$ . Il rapporto tra la sollecitazione di picco e la sollecitazione nominale nella sezione netta porta alla definizione comunemente utilizzata del fattore di concentrazione delle sollecitazioni  $K_t$ . Va sottolineato che si suppone che tutte le deformazioni siano elastiche. Il  $K_t$  è essenzialmente un concetto elastico: fornisce un'indicazione diretta della gravità della concentrazione di sollecitazione di sollecitazione del sollecitazione di amplificazione del livello di sollecitazione che è nominalmente presente nella sezione netta dell'intaglio. A volte può risultare utile vedere il rapporto

tra la sollecitazione di picco e la sollecitazione S applicata al componente, che viene indicato con  $K_{tg}$ .

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{\text{peak}}}{S}$$

I due fattori,  $K_t \in K_{tg}$ , sono ovviamente correlati dalla seguente relazione, dove la dimensione W rappresenta la larghezza del provino e D il diametro del foro, così come si può osservare sopra.

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{\text{nominal}}}{S} K_t = \frac{W}{W - D} K_t$$

E' facile osservare che  $K_{tg} > K_t$ . Comunemente il  $K_t$  è il fattore più utilizzato per indicare la concentrazione delle sollecitazioni e da un punto di vista pratico i valori di  $K_t$  possono essere ottenuti con diversi metodi:

- Metodi analitici.
- Metodi *FEM*.
- Misurazioni con estensimetri.
- Misurazioni foto-elastiche.

#### 5.3 Definizione dello Stress Intensity Factor K

Precedentemente si è parlato della concentrazione delle sollecitazioni intorno agli intagli, con il fattore di concentrazione delle sollecitazioni  $K_t$  come parametro importante per caratterizzare l'intensità della distribuzione delle sollecitazioni intorno all'anomalia geometrica. La fase di innesco della cricca, che dipende fortemente da questo valore, è seguita dal periodo di crescita della stessa. Per una cricca che affronta la sua fase di accrescimento, il valore  $K_t$  non è più un concetto significativo per indicare la gravità della distribuzione delle sollecitazioni intorno all'apice della stessa, poiché una cricca è un intaglio con un raggio alla punta pari a zero, che farebbe tendere il valore ad infinito e questo si verificherebbe per qualsiasi lunghezza di cricca. Un nuovo concetto per descrivere la gravità della distribuzione delle sollecitazioni intorno all'apice della cricca è il cosiddetto Stess Intensity Factor K. Questo concetto è stato originariamente sviluppato grazie al lavoro di Irwin: l'applicazione del fattore di intensità delle sollecitazioni per presentare i dati di crescita delle cricche da fatica e per prevedere la crescita delle cricche da fatica viene definita meccanica della frattura elastica lineare. La differenza tra un intaglio e una cricca può essere illustrata considerando un foro ellittico (semiassi a e b e raggio della punta  $\rho$ ). In una lastra infinita caricata a trazione il fattore di concentrazione degli sforzi  $K_t$  è dato da

$$K_t = 1 + 2\frac{a}{b} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

con il raggio in punta  $\rho = b^2/a$ . Il foro ellittico diventa una cricca facendo tendere l'asse minore b a zero. Se b = 0 il foro è una cricca con un raggio in punta  $\rho = 0$ , e secondo l'equazione, dunque  $K_t = \infty$ , indipendentemente dalla lunghezza della semi-cricca. Tuttavia, questo risultato non è utile. La distribuzione delle sollecitazioni intorno all'apice di una cricca mostra un quadro caratteristico e l'intensità delle stesse dipende dallo *Stress Intensity Factor* K, che può essere scritto come

$$K = \beta S \sqrt{\pi a}$$

Nell'equazione riportata sopra, S è la sollecitazione di carico remota, a è la lunghezza della cricca e  $\beta$  è un fattore adimensionale che dipende dalla geometria del provino o del componente strutturale. La caratteristica importante è che la distribuzione delle sollecitazioni intorno all'apice della cricca può essere completamente descritta come una funzione lineare del fattore di intensità delle sollecitazioni K. Le componenti dello stress non possono essere scritte come semplici funzioni delle coordinate (x,y). Tuttavia, se l'attenzione si limita all'area intorno all'apice della cricca, così come mostrato nella figura 27, si ottengono funzioni esplicite considerando limiti analitici per una breve distanza di un punto (x,y) dall'apice stesso, cioè relativamente breve rispetto alla lunghezza della cricca.



Figura 27: Sistema di coordinate nei pressi dell'apice della cricca.

Dal sistema di coordinate rappresentato nella *figura 27*, dove viene isolata una porzione di spazio nei pressi dell'apice della cricca, si può ricavare un'importante caratteristica dimensionale:

## $r \ll a$

Con le coordinate polari, considerando il sistema di coordinate definito, si ottengono quindi le seguenti equazioni per una cricca in una lastra infinita caricata a trazione:

$$\sigma_x = \frac{S\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) - S$$
$$\sigma_y = \frac{S\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)$$
$$\tau_{xy} = \frac{S\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}$$

Le equazioni sono asintoticamente corrette per piccoli valori di r. Ciò implica che sono una buona approssimazione nella regione dell'apice e sono caratterizzate da alcune caratteristiche degne di nota:

- La distribuzione delle sollecitazioni all'estremità della cricca mostra una singolarità, poiché tutte le componenti delle sollecitazioni vanno all'infinito per  $r \to 0$  per ogni valore di  $\theta$ . Esse aumentano con  $1/\sqrt{r}$ . Ovviamente una sollecitazione con valore infinito non può essere presente alla punta della cricca, dunque deve verificarsi una certa plasticità in questa zona.
- Nell'equazione è presente un termine finito non singolare (S) per  $\sigma_x$ . In generale, questo termine è trascurabile rispetto al primo termine singolare dell'equazione. Per questo motivo, il termine -S viene solitamente omesso. Ma un risultato interessante si applica al bordo superiore e inferiore della fessura, cioè per  $\theta = \pm 180^{\circ}$ . Per questi valori di  $\theta$  il termine singolare è nullo e quindi  $\sigma_x = S$ , una sollecitazione di compressione pari alla sollecitazione di trazione remota. Sebbene le equazioni si applichino solo all'area della punta della cricca, la soluzione esatta per l'intera lastra indica che  $\sigma_x = S$  lungo l'intero bordo superiore e inferiore della cricca.
- È da notare che  $\pi$  ricorre nei radicandi di entrambi i numeratori e denominatori delle equazioni. Di conseguenza,  $\pi$  avrebbe potuto essere omesso, modificando così la definizione del fattore K di un fattore  $\sqrt{\pi}$ . Sebbene ciò sia stato fatto in alcune pubblicazioni più vecchie, non è stato fatto in seguito e storicamente il fattore  $\pi$  è sopravvissuto.

Dopo aver trascurato il termine non singolare -S nell'equazione precedente, le tre equazioni possono essere scritte come:

$$\sigma_{i,j} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{i,j}(\theta)$$
$$K = S\sqrt{\pi a}$$

Le equazioni precedenti si applicano a una cricca di modo I in una lastra infinita caricata a trazione. Tuttavia, è possibile dimostrare che le equazioni sono applicabili anche a elementi di dimensioni finite, purché la geometria del componente sia simmetrica rispetto all'asse x, in modo da avere ancora cricche di modo I. Le dimensioni finite sono tenute in considerazione da un fattore di correzione della geometria,  $\beta$ , nell'equazione per il fattore di intensità delle sollecitazioni:

$$K = \beta S \sqrt{\pi a}$$

A titolo d'esempio il fattore  $\beta$  vale 1 per una lastra infinita. Risulta fondamentale comprendere come non sia corretto pensare che il fattore di concentrazione delle sollecitazioni  $K_t$  e il fattore di intensità delle sollecitazioni K siano concetti in qualche modo simili, rispettivamente per un intaglio e per una cricca. Entrambi i concetti si basano sulla teoria dell'elasticità, tuttavia il  $K_t$  è un fattore di forma adimensionale che tiene conto solo della geometria e non del carico applicato, mentre il fattore di intensità delle sollecitazioni K tiene conto di entrambi e quindi non può più essere adimensionale.

#### 5.4 Test sperimentali di danneggiamento a fatica

Le prove di fatica vengono eseguite con finalità differenti: gli obiettivi ingegneristici sono la determinazione delle proprietà di fatica dei materiali, dei giunti, degli elementi strutturali, mentre gli obiettivi di ricerca delle prove di fatica riguardano la comprensione del fenomeno della fatica e delle sue variabili. L'ampia letteratura sui problemi di fatica illustra la grande varietà di scopi delle indagini condotte in questo senso, tra i quali si possono sicuramente annoverare:

- Raccolta di dati sulle proprietà di fatica dei materiali per la loro selezione da parte del progettista.
- Indagini sugli effetti delle diverse finiture superficiali e delle tecniche di produzione.
- Indagini su giunti e altri elementi strutturali.
- Indagini sulla nucleazione e sulla propagazione delle cricche.
- Prove comparative per testare diverse condizioni superficiali.
- Verifica dei modelli di previsione della fatica.

Le prove di fatica concedono ampia possibilità di scelta in termini di carichi applicabili, campioni da sottoporre a test, ambienti in cui realizzare le prove e apparecchiature necessarie. E' ovvio che la scelta delle variabili sperimentali dipenderà dal tipo di indagine da svolgere, per cui le principali variabili da selezionare sono:

- Tipologia di provino.
- Tipologia di carichi di fatica da utilizzare per la prova.
- Procedure e modalità operative per la realizzazione della prova.

Tuttavia, esistono delle costanti per queste prove meccaniche: richiedono generalmente uno sforzo sperimentale e un tempo significativi, il che implica che queste prove siano anche più costose dei semplici test condotti per la valutazione delle altre proprietà meccaniche. Proprio per le caratteristiche che contraddistinguono questo genere di test, è necessaria un'attenta pianificazione delle procedure sperimentali e della valutazione dei risultati che si otterranno. Dunque, la pianificazione dovrebbe sempre iniziare con una definizione esplicita del problema da indagare.

#### 5.4.1 Definizione della curva di Wöhler o curva S-N

Intorno al XIX secolo, la rottura improvvisa e inspiegabile di alcuni componenti meccanici, nella fattispecie si parla di assi ferroviari, che andavano incontro a cedimento con carichi ben al di sotto di quelli statici massimi ammessi per cui erano stati progettati, spinse August Wöhler a considerare e studiare il fenomeno alla ricerca di una spiegazione. Egli intuì che il cedimento improvviso era da giustificarsi con l'applicazione ciclica di un carico, in grado di affaticare notevolmente il componente, e tentò di riprodurre quanto accadeva nella realtà con alcuni test in laboratorio. Il risultato ottenuto fu estremamente importante, tanto che ancora oggi permea la pogettazione ingegneristica: i *Diagrammi di Wölher*. I diagrammi di Wöhler sono costituiti da una curva nel piano, su base statistica, che mette in relazione l'ampiezza massima del ciclo di sollecitaione, in termini di sforzo applicato, ed il numero di cicli corrispondenti che ha portato a rottura il componente con quel dato carico.



Figura 28: Diagramma di Wöhler.

La realizzazione del diagramma, di cui viene riportato un esempio nella figura 28, prevede alcune fasi operative:

- Si definisce in laboratorio un particolare ciclo di sollecitazione, caratterizzato da un'ampiezza e una frequenza di applicazione del carico.
- Si applica il ciclo di carico scelto ad un elevato numero di provini e si annota il numero di cicli che ha portato a rottura il singolo provino con quel dato ciclo di carico.
- Si riporta il valor medio del numero di cicli necessari alla rottura per quella sollecitazione applicata.

Si osserva facilemente che i provini non giungeranno a rottura allo stesso numero di cicli, pur venendo sottoposti alla stessa tipologia di carico, ma si avrà una dispersione dei risultati, che tuttavia avviene secondo una distribuzione normale. Le fasi operative citate in elenco sopra, vanno ripetute per un buon numero di ampiezze differenti del carico applicato. La curva che congiunge tutti i valori medi ad ogni valore di sollecitazione testato, detta anche curva S-N, poiché S identifica il termine Stress, e N, i termini Number of cycles, è la curva di Wöhler al 50% di probabilità di rottura: esiste una probabilità pari al 50% che i provini, testati a quel preciso valore di carico, si rompano prima del numero di cicli identificato. Questa probabilità può ovviamente essere ridotta se, per ogni valore di sollecitazione scelto per il ciclo di carico, non si riporta sul diagramma il valore medio dei numeri di cicli ottenuti, ma quello corrispondente al valore di probabilità scelto. La curva divide il piano in due zone ben distinte: un qualsiasi punto al di sopra della curva individua una condizione per cui il componente sarà soggetto a fenomeni di fatica e andrà incontro a rottura per tale ragione, mentre un qualsiasi punto al di sotto individua una condizione per cui il pezzo non andrà incorntro a rottura per fatica. Spesso accade che alcuni materiali, come ad esempio l'alluminio, abbiano un limite inferiore, che identifica uno sforzo massimo al di sotto del quale il materiale non si rompe per fatica, seppur sottoposto ad un numero elevatissimo di cicli, idealmente infinito, di applicazione del carico. Tale limite è conosciuto come *limite di fatica* del materiale. Da un punto di vista della progettazione ingegneristica il limite di fatica viene determinato con un numero di cicli preciso per ragioni di sicurezza, che, pur non essendo pari ad infinito, è rappresentato da un valore estremamente elevato. Un aspetto estremamente importante da tenere a mente è che i valori riportati nel piano e che definiscono la curva di Wöhler sono frutto dei test eseguiti su provini rappresentativi del materiale considerato, pertanto non rappresentano a pieno il componente reale che si sta studiando o si vuole progettare. Per tale ragione, in fase di progettazione, vengono introdotti alcuni coefficienti correttivi che tengono necessariamente conto di ciò che contraddistingue il componente reale dal provino rappresentativo: processi di lavorazione, dimensioni, presenza di imperfezioni geometriche (e.g. intagli, graffi, fori...), trattamenti superficiali e condizioni operative.

# 5.5 Incidente aereo: il caso del volo Atlantic Southeast Airlines 529

In ambito aeronautico il fenomeno della corrosione costituisce una problematica assai importante e pericolosa, a cui risulta necessario prestare particolare attenzione in fase di progetto, ma soprattutto durante la vita operativa del componente, al fine di programmare correttamente la manutenzione del pezzo ed intervenire tempestivamente per evitare che gli effetti possano essere catastrofici. Fortunatamente, il caso del volo *Atlantic Southeast Airlines 529* non è tra quelli in cui si sono registrate numerose perdite in vite umane, pur costituendo una pagina buia della storia aeronautica, poiché l'accaduto ha tristemente e nuovamente evidenziato l'importanza di non sottovalutare il fenomeno della corrosione, sopratutto se combinato all'applicazione ciclica di sollecitazioni meccaniche.



Figura 29: Velivolo EMB120.

Il 12 agosto del 1995 un velivolo Embraer EMB 120, della stessa tipologia di quello riportato in *figura 29*, si schiantò sulla rotta tra l'aeroporto di Atlanta e quello di Gulfport. Il volo 529 decollò dall'aeroporto di Atlanta alle ore 12:23. Alle ore 12:43, quando ancora si trovava

in fase di salita per raggiungere la quota di 5500 m dal suolo, gli occupanti dell'aereo furono distratti da un rumore forte, improvviso e insolito che il copilota, sopravvisuto all'incidente ed in seguito ad esso, durante le indagini, descrisse come "il rumore di una mazza da baseball che colpisce un bidone di alluminio". L'origine del rumore fu da subito piuttosto chiara: una delle pale dell'elica del motore sinistro era andata distrutta, provocando la deformazione della gondola del motore e del profilo dell'ala. Anche se il modello di velivolo, come tutti i bimotori, avrebbe potuto volare con un solo motore in funzione, i danni provocati causarono una netta diminuzione di portanza dell'ala sinistra con la conseguente perdita di quota. I piloti cercarono dapprima di rientrare all'aeroporto dal quale erano decollati ad Atlanta, ma, siccome la perdita di quota era troppo rapida, chiesero un aeroporto più vicino. Tuttavia, furono costretti a tentare un atterraggio di emergenza in un campo situato nella contea di Carroll, in Georgia, dove urtarono le cime di alcuni alberi e si schiantarono al suolo.



Figura 30: Fotografia del luogo dell'incidente.

L'impatto, che portò alla separazione del velivolo in più parti, come si può vedere nella fotografia del luogo dell'incidente in *figura 30*, non fu particolarmente violento e tutti i membri dell'equipaggio ed i passeggeri riuscirono a sopravvivere ad esso, tuttavia la disavventura non era ancora finita: quasi immediatamente si sviluppò un incendio che uccise 8 persone, compreso il primo ufficiale Gannaway. Il copilota Warmerdam, il quale riportò esclusivamente la lussazione di una spalla, riuscì a rompere il vetro della cabina di pilotaggio, utilizzando una scure e, aiutato da un passeggero, riuscì ad uscire dall'aereo. Diversi passeggeri subirono gravi ustioni nell'incendo divampato e sette di loro morirono nel primo mese dopo l'incidente. La sciagura portò alla morte di ben 8 persone, lasciando però un ricordo indelebile nelle restanti 20 persone sopravvissute. All'incidente seguirono le consuete indagini per cercar di rilevare quale fosse stata la causa del disastro. Essa fu individuata nella rottura dell'elica del motore coivolto, ma l'aspetto più interessante fu l'aver determinato che la rottura non avvenne per motivi legati al volo, come l'impatto con un volatile, bensì per l'effetto combinato del fenomeno della fatica e della corrosione. L'analisi dei resti della pala coinvolta rivelò che il metallo aveva subito nel tempo un processo importante di affaticamento, causato e

incrementato dalla corrosione del metallo, dovuta al cloro presente nell'ambiente operativo del velivolo. Le indagini appurarono inoltre, che pur essendoci stati già due precedenti guasti che avevano coinvolto le eliche del motore, senza che avessero portato a incidenti simili, queste non erano state sottoposte ad una corretta ispezione, che risultò essere invece incompleta e superficiale, poiché non portò alla luce lo stato di corrosione in atto, tanto che il *National Transportation Safety Board*, biasimò l'operato della officina che si occupò della manutenzione, la *Hamilton standard*, per l'''inadeguata tecnica di ispezione e manutenzione, formazione, documentazione e comunicazione" e sia la stessa officina che la *Federal Aviation Administration* per "non aver richiesto ed effettuato frequenti test ad ultrasuoni sulle pale delle eliche".

# 6 Test Proposal

Ai fini di studiare concretamente la possibilità di sostituire i rivestimenti protettivi delle componenti in alluminio del velivolo DARDO in uso ad oggi con una protezione in nanotecnologie, fornita dall'azienda 4 Ward360 Nanotechnology, il Politecnico di Torino, rappresentato dal professor Enrico Cestino e dal sottoscritto, coadiuvato da Andrea Felis e Francesco Galvano, su richiesta dell'azienda CFM Air di Ciriè, ha pensato ad una serie di prove sperimentali. A partire dal mese di luglio 2022 in occasione di differenti incontri tenutisi tra le diverse parti coinvolte, si è giunti ad una bozza di quelle che sarebbero state le prove da effettuarsi. Ovviamente, questo primo documento redatto, che viene qui riassunto, ha subito diverse modifiche in itinere, per far fronte a necessità delle aziende coinvolte, disponibilità di attrezzature necessarie, esigenze di costi da affrontarsi, tempistiche da rispettare e confronti con studi presenti in letteratura scientifica. Per tale ragione nei capitoli successivi verranno meglio definite le condizioni operative di ciascuna fase di studio ed evidenziate anche le eventuali differenze rispetto a quanto stabilito inizialmente per l'analisi. In prima battuta si è convenuto di testare le proprietà di resistenza alla corrosione dell'alluminio, protetto dalle due tipologie di rivestimento superficiale, *Primer*, attualmente in uso, e rivestimento in nanotecnologie, grazie ad un test di immersione prolungata in soluzione salina. Per valutare poi come la corrosione avrebbe influito negativamente sulle proprietà meccaniche del metallo e come e quanto eventualmente i differenti rivestimenti protettivi sarebbero stati in grado di proteggere il metallo da questo punto di vista si è pensato di sottoporre i componenti precedentemente testati a corrosione ad un test di fatica. Si è pensato di suddividere il processo di analisi in differenti fasi operative, che vengono di seguito riassunte per come sono state concepite in fase iniziale.

# 6.1 Campioni di prova

Per rappresentare le componenti metalliche del velivolo, realizzate in alluminio 2024 T3, si è deciso di ottenere dei provini dello stesso materiale e, in vista della prova di fatica che avrebbero affrontato, di realizzarli con geometria e dimensioni suggeriti dalla normativa di riferimento in materia di test a trazione, la *ASTM E8/E8M-21*, cioè con la classica forma ad *osso di cane*. Si riporta di seguito lo schema del provino, estratto dalla normativa sopracitata.



Figura 31: Schema del provino ad osso di cane tratto dalla normativa ASTM E8/E8M-21.

Le dimensioni scelte per la prova sono quelle appartenenti alla colonna denominata *Sheet Type*, presente nella sezione dedicata al provino nella normativa di riferimento, di cui si è riportato un estratto in *figura 31*, poiché lo spessore suggerito coincideva con quello della lamiera a disposizione in azienda. Per facilitare la prova di immersione prolungata per il test di corrosione, alla struttura del provino, suggerita dalla normativa, si è deciso di aggiungere un prolungamento ad una delle due zone di afferraggio dello stesso, per poter realizzare un foro, necessario al posizionamento del gancio, di cui si dirà successivamente. Si è deciso di realizzare tredici provini, rappresentativi delle differenti famiglie di rivestimento protettivo, così suddivisi:

- Quattro provini in alluminio grezzo senza alcun rivestimento protettivo.
- Tre provini in alluminio con rivestimento Primer, attualmente utilizzato sul velivolo.
- Sei provini in alluminio con rivestimento in nanotecnologie.

#### 6.2 Test di corrosione ad immersione prolungata

Dopo aver realizzato i 13 provini in materiale metallico, nella fattispecie alluminio 2024 T3, con la collaborazione dell'azienda CFM Air, e dopo averne trattati tre con rivestimento protettivo Primer, attualmente in uso sull'aeromobile, e sei con rivestimento in nanotecnologie, lasciandone così quattro in alluminio grezzo senza alcun rivestimento, si è pensato di sottoporre solo nove dei provini totali realizzati ad un bagno corrosivo, secondo la normativa di riferimento ASTM G31-21. I nove provini, che avrebbero subito il processo di corrosione, sarebbero stati suddivisi in tre famiglie di appartenenza, rappresentative di un rivestimento superficiale:

• Tre provini in alluminio grezzo senza alcun rivestimento protettivo.

- Tre provini in alluminio con rivestimento protettivo Primer.
- Tre provini in alluminio con rivestimento protettivo in nanotecnologie.

#### 6.2.1 Apparato strumentale

Per la realizzazione della prova di corrosione, poiché la normativa di riferimento non prevede specifiche stringenti in materia, si è pensato inizialmente ad un apparato strumentale piuttosto semplice che avrebbe permesso di lasciare i provini a bagno per il tempo stimato di corrosione. Per la prova sarebbero stati sufficienti i seguenti elementi:

- Un vaso capiente con chiusura superficiale adeguata.
- Un termometro per la rilevazione della temperatura della soluzione.
- Una struttura di supporto con gancio, in materiale isolante, al quale poter appendere i singoli provini, precedentemente forati superiormente.

Si riporta di seguito nella *figura 32* una rappresentazione schematica di quanto previsto inizialmente per la prova e di come le varie componenti sarebbero state utilizzate per dar vita all'apparato strumentale.



**Figura 32:** Schema dell'apparato strumentale per la realizzazione della prova di corrosione pensato inizialmente.

Per far fronte alle necessità della normativa, si è pensato inizialmente di utilizzare un'asta in vetro o ceramica, ganci in vetro, corde in plastica o più in generale supporti metallici isolati o rivestiti, così che non potessero interagire con la soluzione corrosiva. L'asta sarebbe stata posta all'esterno della vasca e avrebbe permesso, mediante filo in plastica con gancio terminale in materiale isolante, di sorreggere il provino in immersione, lasciandolo sospeso nella soluzione.

#### 6.2.2 Soluzione corrosiva

Per la prova si è pensato di utilizzare una soluzione salina, avente alcune caratteristiche:

- Preparata sciogliendo in acqua distillata o deionizzata una massa di cloruro di sodio sufficiente a dare una concentrazione di 35 g/l con uno scarto in difetto o eccesso di 1 g/l.
- Conducibilità non superiore a 2 mS/m a 25°C.
- Cloruro di sodio avente frazione in massa dei metalli pesanti (Rame, Nichel e Piombo) inferiore allo 0.005%. Non avrebbe dovuto contenere una frazione in massa di ioduro di sodio superiore allo 0.1% ed una frazione in massa delle impurità totali superiore allo 0.5%, calcolata per il sale secco.
- Non si sarebbe dovuto utilizzare cloruro di sodio con agenti antiagglomeranti, poiché avrebbero potuto agire come acceleranti o inibitori della corrosione.
- Il volume della soluzione sarebbe stato predefinito dalla specifica e non sarebbe stato inferiore a 3 l per decimetro quadrato di area del provino.

Poiché la prova avrebbe costituito esclusivamente un metodo di confronto per la valutazione dei differenti rivestimenti superficiali protettivi, si è deciso di controllare alcune condizioni operative: temperatura, pH e composizione della soluzione iniziale.

#### 6.2.3 Durata della prova di corrosione

Per stimare la durata della prova di corrosione, dunque il tempo di immersione dei provini, si sono cercate in letteratura delle relazioni di riferimento, poiché il risultato cambia notevolmente in relazione al materiale considerato, fermo restando che tanto più il periodo di immersione fosse stato consistente, tanto più attendibile sarebbe stato il risultato della prova. In generale, per le prove di corrosione vi sono due raccomandazioni, che si è deciso di rispettare fin da subito:

• Se il tasso di corrosione è moderato o basso, si può stimare la durata della prova con la seguente equazione, riportata in *figura 33*, estrapolata dalla normativa UNI EN ISO 9223:

#### Duration of test (h)

= 50/corrosion rate (mm/y) or 2000/corrosion rate (mpy)

**Figura 33:** Relazione per la stima della durata del test da normativa UNI EN ISO 9223.

• Generalmente i periodi di prova vanno da 24 a 240 ore, cioè da 1 giorno a 10 giorni.

Con riferimento alla normativa UNI EN ISO 9223, il tasso di corrosione per l'alluminio è stato stimato attraverso la relazione riportata nella figura 34:

 $r_{corr} = 0,004 \ 2 \cdot P_d^{0,73} \cdot \exp(0,025 \cdot \text{RH} + f_{AI}) + 0,0018 \cdot S_d^{0,60} \cdot \exp(0,020 \cdot \text{RH} + 0,094 \cdot T)$  $f_{AI} = 0,009 \cdot (T - 10)$  when  $T \le 10$  °C; otherwise  $-0,043 \cdot (T - 10)$  $N = 113, R^2 = 0.65$ where is first-year corrosion rate of metal, expressed in micrometres per year (µm/a); rcorr Т is the annual average temperature, expressed in degrees Celsius (°C); RH is the annual average relative humidity, expressed as a percentage (%); is the annual average SO2 deposition, expressed in milligrams per square metre per day  $P_{d}$ [mg/(m<sup>2</sup>·d)]; is the annual average CI- deposition, expressed in milligrams per square metre per day Sd [mg/(m<sup>2</sup>·d)].

**Figura 34:** Relazione per la stima del tasso di corrosione dell'alluminio nel primo anno da normativa UNI EN ISO 9223.

Nell'equazione sono necessari alcuni parametri che fanno riferimento alle condizioni ambientali in cui il metallo va ad operare. Utilizzando i dati necessari, reperiti nel database dell'*Arpa Piemonte* e dal servizio meteorologico offerto dall'Aeroporto di Torino-Caselle in collaborazione con il *Centro Epson Meteo*, che vengono riportati qui di seguito:

- $T = 12.5^{\circ}C.$
- RH = 73.8%.
- $Pd = 12 \ \mu g/m^3$ .
- Sd =  $12 \ \mu g/m^3$ .

si è ottenuto un tasso di corrosione dell'alluminio nelle condizioni climatiche caratteristiche piemontesi pari a 0.223 mm/anno. Sostituendo questo valore nella relazione sopra riportata, la durata stimata per il test è risultata essere pari a 228 ore (circa 10 giorni).

## 6.3 Trattamento dei campioni dopo il periodo di immersione

Dopo il periodo passato in immersione nella soluzione corrosiva, si è pensato che i campioni, secondo le indicazioni fornite nella normativa di riferimento, sarebbero stati sottoposti ad un processo di pulizia che avrebbe portato alla rimozione di tutti i prodotti di corrosione formatisi ed eventualmente dei residui di sale rimasti sulla superficie. Prima della rimozione dei prodotti superficiali, però si è stabilito che i provini sarebbero stati fotografati adeguatamente per avere prova visiva dell'aspetto finale, immediatamente dopo il processo di corrosione. In seguito alla rimozione dei residui superficiali, i provini sarebbero stati pesati nuovamente, per verificare eventuali variazioni apprezzabili rispetto alla condizione di partenza, e fotografati per valutarne l'aspetto estetico.

# 6.4 Test meccanico: sollecitazione a fatica

Per la valutazione di eventuali variazioni nelle proprietà meccaniche dei materiali e potenziali benefici apportati dall'utilizzo di un rivestimento superficiale, *Primer* o nanotecnologie, ma soprattutto per poter rispondere alla domanda fondamentale, quale dei due sarebbe risultato eventualmente migliore, si è pensato di sottoporre i provini corrosi ad un test di fatica, prendendo spunto dalla normativa di riferimento, ASTM E466-21, che tratta questa tipologia di test in controllo di forza ad ampiezza costante. Inoltre, per meglio apprezzare eventuali differenze, si è pensato di sottoporre al test anche dei provini rappresentativi della famiglia con rivestimento in nanotecnologie, non corrosi. Si riassume di seguito quanti e quali provini sarebbero stati sottoposti al test di fatica:

- Tre provini in alluminio grezzo senza alcun rivestimento superficiale sottoposti a corrosione.
- Tre provini in alluminio con rivestimento superficiale *Primer* sottoposti a corrosione.
- Sei provini in alluminio con rivestimento superficiale in nanotecnologie, di cui tre sottoposti a corrosione e tre non corrosi.

In fase iniziale, l'idea che ha prevalso è stata quella di valutare un provino per ogni famiglia di rivestimento superficiale con un determinato ciclo di carico. La definizione precisa del carico e della frequenza di applicazione dello stesso è avvenuta solo successivamente.

# 7 Fase sperimentale

Una volta conclusasi la fase di definizione preliminare con l'ultima riunione organizzativa, alla quale hanno partecipato tutte le componenti necessarie alla definizione del programma sperimentale ed alla sua realizzazione, dunque il *Politecnico di Torino*, l'azienda *CFM Air* con i suoi due consulenti nelle figure degli ingegneri Lorenzo Chesta e Vito Sapienza, e l'azienda 4Ward360 Nanotechnology, ha avuto inizio la fase sperimentale vera e propria. Questa è necessariamente iniziata con la realizzazione dei provini metallici. La realizzazione dei campioni in alluminio 2024 T3 è avvenuta interamente all'interno dell'azienda, proprietaria del progetto DARDO e omonimo velivolo, cioè la *CFM air*, la quale ha sede a Ciriè, un comune alle porte di Torino nei pressi dell'Aeroporto di Caselle. La realizzazione dei provini ha avuto inizio da una lastra del materiale desiderato, avente spessore pari a 3 mm, dalla quale sono state ricavate delle sezioni rettangolari, aventi ingombro massimo pari a 220 mm x 20 mm. Le sezioni rettangolari sono state ottenute mediante sega a nastro dalla lastra di partenza e sottoposte ad un processo di limatura manuale, per eliminare i residui metallici taglienti presenti sui bordi di ciascun campione ottenuto, così da garantire la sicurezza dell'operatore che si sarebbe poi occupato delle lavorazioni successive.



Figura 35: Forma abbozzata dei campioni in alluminio.

Nella *figura 35* è riportata una fotografia dei provini realizzati in una forma preliminare rettangolare, che sarebbero poi stati sottoposti ad ulteriori lavorazioni. E' necessario ricordare che i componenti così ottenuti presentano una parte aggiuntiva, rispetto a quanto richiesto dalla normativa di riferimento per le prove di fatica. Infatti, la normativa specifica un ingombro massimo pari a 200 mm x 20 mm, mentre nel caso studio qui presentato un'estremità è stata maggiorata di 20 mm, portando così l'ingombro massimo ad essere di 220 mm x 20 mm. Questa incongruenza si spiega con l'esigenza di avere una zona del provino da poter forare per realizzare l'immersione nel bagno corrosivo e successivamente eliminare, ottenendo così la geometria richiesta dalla normativa, senza alterare il piano operativo stabilito. Una volta ottenuta la forma preliminare dei campioni di riferimento, ciascuno di essi è stato sottoposto ad un processo di fresatura, che ha richiesto da parte dell'azienda la creazione di un supporto ad hoc con la forma geometrica caratteristica per il provino ad osso di cane. Si riporta di seguito nella figura 36 una fotografia dello stesso.



**Figura 36:** Supporto in acciaio per la realizzazione dei provini ad osso di cane.

Ciascuna sezione rettangolare in alluminio è stata posta nel supporto e bloccata in esso, mediante le due linguette metalliche superiori, visibili nella fotografia, che, grazie ad un serraggio con vite, hanno reso possibile il bloccaggio del campione abbozzato. Il campione, reso solidale al supporto, è stato posto sul piano di lavoro della fresa e bloccato, permettendo così l'inizio della lavorazione. L'azionamento e funzionamento della fresatrice è avvenuto grazie all'utilizzo di due leve, una posta anteriormente la macchina e dunque il piano di lavoro, e l'altra lateralmente, le quali comandano rispettivamente lo spostamento longitudinale e trasversale del piano stesso.



**Figura 37:** Il collaboratore Andrea Felis nella realizzazione dei provini con la fresatrice.

In *figura 37* si può osservare il collaboratore Andrea Felis, mentre aziona la macchina per la lavorazione. L'operazione descritta sopra è stata ripetuta per ciascun provino nella sua forma abbozzata, ottenendo infine la forma desiderata, dunque quella ad osso di cane, richiesta dalla normativa di riferimento. Realizzati i provini con le caratteristiche richieste, un ulteriore passo è stato compiuto per facilitare la successiva fase di studio, cioè il bagno nella soluzione corrosiva. Per questa ragione, come espresso in fase preliminare con la test proposal, ciascun provino è stato forato nell'estremità aggiuntiva con un foro pari a 5 mm di diametro.



Figura 38: Processo di foratura nella parte di estremità del provino.

Per l'operazione è stato necessario un trapano a colonna, come si può osservare in *figura 38*, e sotto la supervisione di Marco Miccichè, capofficina presso l'azienda, sono stati ottenuti i campioni di prova in alluminio come stabilito nel documento iniziale di presentazione del processo di studio.



Figura 39: Provini in alluminio nella forma desiderata ad osso di cane.

Tuttavia, i provini ottenuti, così come si può vedere in *figura 39*, hanno visto un'ulteriore modifica, di cui si parlerà nel paragrafo seguente.

## 7.1 Considerazioni sui costi e tempi delle prove

Una volta ottenuti i provini nella loro geometria e con le dimensioni suggerite dalla normativa, con la sola differenza del tratto terminale aggiuntivo per esigenze di esecuzione della prova di immersione in soluzione corrosiva, si è pensato a quello che sarebbe stato il loro destino, terminato il periodo di immersione: ciascun provino, dei nove sottoposti al test, sarebbe stato sottoposto ad una prova di tipo meccanico, in particolare di fatica. Testare la resistenza dei provini in alluminio con differente rivestimento superficiale, così realizzati come mostrato sopra, avrebbe comportato certamente una durata di ciascuna prova di non irrilevante entità, a causa del fatto che in prima battuta, seppur non definiti con estrema certezza, i carichi e le frequenze scelti per il test non sarebbero stati particolarmente importanti. Altro aspetto non meno importante, che ha certamente contribuito a optare per la soluzione che a breve verrà esposta, è stata una considerazione di tipo economico: l'utilizzo della macchina necessaria ad effettuare le prove meccaniche di fatica, oltre a non poter essere utilizzata per periodi di tempo particolarmente lunghi, per ovvie ragioni logistiche del Politecnico di Torino, avrebbe comportato un dispendio energetico, e quindi economico, rilevante. Dunque, per limitare in qualche modo gli effetti delle problematiche sopra esposte, si è convenuto di introdurre nel provino un fattore di intensificazione degli sforzi, mediante la realizzazione di un foro centrale. Infatti, se il provino fosse stato sottoposto al test di fatica senza alcun foro centrale, il suo fattore di concentrazione delle sollecitazioni  $K_t$  sarebbe stato uguale a 1 e questo, comportando un andamento costante delle sollecitazioni lungo la sezione centrale del provino sottoposta alla sollecitazione, avrebbe fatto sì che le prove durassero più a lungo con le conseguenze sopra esposte. La decisione di procedere con la foratura dei provini in alluminio è stata prima convalidata da un punto di vista teorico con la realizzazione di un modello FEM (Finite Element Method) del campione metallico, mediante l'utilizzo del software PATRAN/NASTRAN. La realizzazione della simulazione FEM è avvenuta con un modello 2D Shell, al quale sono state associate le caratteristiche meccaniche che contraddistinguono l'alluminio, con spessore pari a 3 mm, così come i provini realizzati per le prove. Nel modello agli elementi finiti sono stati successivamente inseriti fori di dimensioni via via maggiori (diametro pari a 2 mm, 4 mm e 6 mm) e sottoposto il provino alla stessa tipologia di carico, per verificare il cambiamento degli sforzi nella zona centrale, in virtù della presenza della modifica strutturale introdotta.

3 1 0000	1 0000 . 3
	TTKE
	$\forall \uparrow \downarrow$
	1 0000 3

Figura 40: Modello FEM con foro centrale da 2 mm.

Y \_\_\_\_x



Figura 41: Modello FEM con foro centrale da 4 mm.



Figura 42: Modello FEM con foro centrale da 6 mm.

Le figure 40, 41 e 42 riportano i modelli *FEM* delle tre tipologie di provini che si è pensato inizialmente di realizzare. Per poter lanciare l'analisi ed ottenere il fattore di intensificazione degli sforzi, ciascun modello è stato vincolato geometricamente in z, secondo il sistema di coordinate visibile nelle immagini sopra riportate, e di ognuno sono stati vincolati i lati corti

nella traslazione lungo l'asse y. Sono stati aggiunti poi due vincoli in x, precisamente in corrispondenza di due nodi posti a metà dei lati lunghi, così da soddisfare tutte le esigenze dell'analisi richiesta. Per le tre tipologie di fori analizzati, si sono ottenuti i seguenti risultati in termini di stress lungo l'asse x.



Figura 43: Andamento  $\sigma_x$  nel modello FEM con foro da 2 mm.



**Figura 44:** Andamento  $\sigma_x$  nel modello FEM con foro da 4 mm.



**Figura 45:** Andamento  $\sigma_x$  nel modello FEM con foro da 6 mm.

Nelle figure 43, 44 e 45 si possono osservare i risultati per ciascun potenziale provino dell'analisi *FEM* condotta: le colorazioni differenti, secondo la scala cromatica, rappresentano l'intensità delle sollecitazioni nella zona considerata. La scelta finale è ricaduta alla fine su un foro di diametro pari a 2 mm, nella sezione centrale di ciascun campione, dove ci si aspettava si sarebbero rotti. Il foro scelto in fase di creazione dei provini, secondo il modello *FEM* realizzato, avrebbe comportato un incremento del *fattore di concentrazione delle sollecitazioni*, pari a  $K_t = 2.27$ . Anche in questo caso è stato fondamentale il supporto fornitoci dall'azienda *CFM Air*, nella figura del capofficina Marco Miccichè, il quale ha guidato le operazioni di utilizzo del trapano a colonna per soddisfare la richiesta e dunque ottenere il foro centrale.



Figura 46: Realizzazione del foro centrale mediante trapano a colonna.

Nella figura 46 si può vedere l'operatore che esegue il foro richiesto nella parte centrale di un provino.

# 7.2 Apposizione del rivestimento superficiale

I provini così realizzati, aventi due fori, che ricordiamo avere diametro pari a 2 mm per quello centrale, necessario ad incrementare il fattore di intensificazione degli sforzi e quindi limitare la durata del test successivo di fatica, e pari a 5 mm per quello presente in una delle due estremità, necessario per l'immersione nella vasca di corrosione, sono stati assegnati alle famiglie individuate per la rappresentatività del rivestimento superficiale. I provini sono stati tutti siglati per meglio rintracciarli e riconoscerli nelle diverse fasi e le rispettive famiglie di appartenenza sono le tre precedentemente citate:

• Alluminio grezzo senza alcun rivestimento superficiale.

- Alluminio rivestito con vernice *Primer*.
- Alluminio trattato con nanotecnologie.

Il rivestimento superficiale, noto con il termine *Primer*, è stato applicato sui singoli provini in alluminio dall'azienda *CFM Air*, mentre del rivestimento in nanotecnologie se n'è occupato l'azienda *4Ward360 Nanotechnology*. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva, nella quale ad ogni provino, identificato con una sua sigla, viene associato il rivestimento superficiale che lo caratterizza.

Metallo base	Rivestimento superficiale
Alluminio 2024 T3	Nessuno
Alluminio 2024 T3	Primer
Alluminio 2024 T3	Primer
Alluminio 2024 T3	Primer
Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie
	Metallo base Alluminio 2024 T3 Alluminio 2024 T3

 Tabella 1: Riassunto dei provini realizzati per lo studio.

Nella *tabella 1*, in particolare nella prima colonna di sinistra, è facile riconoscere come a ciascun provino sia stata associata una sigla alfanumerica. Si definisce di seguito il significato di ciascuna lettera utilizzata, per meglio comprendere la logica adottata:

- Lettera M identifica il termine Metal.
- Lettera T identifica il termine *Traction*.
- Lettera F identifica il termine Fatigue.
- Lettera C identifica il termine Corrosion.
- Lettera S identifica il termine Specimen.

A titolo di esempio si riportano di seguito alcune sigle, descritte per intero:

- $MT \ 000$  corrisponde all'unico provino in metallo, alluminio nello specifico, che verrà sottoposto esclusivamente alla prova di trazione.
- *MF 000* corrisponde all'unico provino in metallo, nello specifico alluminio, che verrà sottoposto alla prova di fatica, senza essere sottoposto precedentemente a quella di corrosione.

- *MCF 001* corrisponde al primo provino della famiglia in alluminio grezzo senza alcun rivestimento superficiale, che verrà sottoposto alla fase di corrosione e successivamente a quella di fatica.
- *MCS 010* corrisponde al quarto provino della famiglia in alluminio con trattamento in nanotecnologie, che non verrà sottoposto alla prova di corrosione, ma solo a quella di fatica e servirà come confronto con il suo omologo, l'*MCF 007*, che subirà anche il processo corrosivo.

# 8 Prima fase operativa: bagno corrosivo forzato

Conclusa tutta la parte preliminare del percorso di analisi, condotto sulle famiglie rappresentative della tipologia di rivestimento superficiale, lo studio vero e proprio ha avuto inizio dal processo forzato di corrosione. Questa fase è stata pensata per valutare in prima approssimazione quale tipologia di protezione garantisse i migliori risultati da un punto di vista estetico e quale soprattutto fosse in grado di proteggere il metallo base dall'attacco corrosivo. Dei quattordici provini realizzati complessivamente solo nove sono stati sottoposti a bagno corrosivo, garantendo tre campioni per ogni famiglia. Si riporta di seguito la *tabella 2*, riassuntiva dei provini utilizzati per questa fase.

Sigla identificativa del provino	Metallo base	Rivestimento superficiale
MCF 001	Alluminio 2024 T3	Nessuno
MCF 002	Alluminio 2024 T3	Nessuno
MCF 003	Alluminio 2024 T3	Nessuno
MCF 004	Alluminio 2024 T3	Primer
MCF 005	Alluminio 2024 T3	Primer
MCF 006	Alluminio 2024 T3	Primer
MCF 007	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie
MCF 008	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie
MCF 009	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie

Tabella 2: Provini utilizzati per la fase del bagno corrosivo.

#### 8.1 Apparato sperimentale

Come accennato nel Test Proposal per la prova di corrosione forzata si è fatto riferimento alla normativa ASTM G31-21, che si ricorda lasciare notevole libertà all'esecutore dell'esperimento in fatto di apparato strumentale e modalità di realizzazione del test. Per tale ragione inizialmente si era deciso di avvalersi di recipienti, capaci di contenere i tre provini in immersione per ciascuna famiglia di rivestimento protettivo, sostenuti, per mezzo di ganci in materiale isolante, da aste, poste all'esterno delle stesse vasche. Tuttavia, la realizzazione di questo apparato è risultata inutilmente complessa, per cui si è optato per una soluzione più immediata e semplice. Sono stati necessari per la creazione dell'apparato strumentale i seguenti elementi:

• Tre contenitori in materiale plastico (figura 47) con dimensioni: 380 mm x 265 mm x 285 mm.



Figura 47: Contenitore in materiale plastico per l'immersione.

• Tre tondini in acciaio del diametro di 5 mm e lunghezza pari a 1000 mm (figura 48).



Figura 48: Tondino in acciaio.

• Filo metallico ricoperto da PVC (figura 49).



Figura 49: Filo metallico ricoperto in PVC.

Le tre vasche realizzate sono state tutte posizionate su un tavolino, presente nel laboratorio di strutture aeronautiche del *Politecnico di Torino*, per far sì che i provini fossero esposti alle medesime condizioni ambientali.

# 8.2 Soluzione utilizzata

Per la prova di corrosione, come già detto, si è fatto riferimento alla normativa di riferimento in materia, la quale per la soluzione corrosiva da adottarsi prevede che questa sia quanto più rappresentativa delle condizioni operative del componente che si vuole sottoporre a test. Evidentemente, la corrosione che si verifica sui componenti metallici del velivolo *DARDO* è da attribuirsi a residui di acqua, fango e materiale organico che si depositano sulla struttura e all'esposizione agli agenti atmosferici, quando il velivolo non si trova in hangar. Poiché si voleva accelerare i tempi di corrosione, si è preferito optare per una soluzione suggerita dalla normativa stessa, anche se non troppo rappresentativa dell'ambiente operativo del velivolo, che prevedeva l'esclusivo utilizzo di acqua distillata e cloruro di sodio. Si riportano di seguito alcune caratteristiche fondamentali della soluzione utilizzata:

• Preparata sciogliendo in acqua distillata o deionizzata (figura 50) una massa di cloruro di sodio sufficiente a dare una concentrazione di 35 g/l con uno scarto in difetto o eccesso di 1 g/l.



Figura 50: Acqua distillata utilizzata per la soluzione.

- Conducibilità non superiore a 2 mS/m a 25°C.
- Il cloruro di sodio utilizzato avrebbe dovuto avere una frazione in massa dei metalli pesanti (Rame, Nichel e Piombo) inferiore allo 0.005% (come quello in *figura 51*).



Figura 51: Cloruro di sodio utilizzato per la soluzione.

- Non si sarebbe dovuto utilizzare cloruro di sodio con agenti antiagglomeranti, poiché avrebbero potuto agire come acceleranti o inibitori della corrosione.
- Il volume della soluzione sarebbe stato predefinito dalla specifica e non sarebbe stato inferiore a 3 l per decimetro quadrato di area del provino.

In riferimento all'ultima indicazione sulla quantità minima di soluzione necessaria per ciascun provino, si è calcolato, non tenendo conto della reale forma del provino, ma pensando allo stesso come un semplice parallelepipedo per sovrastimare le dimensioni, un'area totale di ciascun provino pari a 10240  $mm^2$ . Dovendo avere almeno 3 l per decimetro quadrato, ciascun provino ha richiesto per sé una quantità minima di soluzione pari a 3.072 l. Ricordando inoltre, che in ciascuna vasca di immersione sono stati posizionati i tre provini appartenenti alla famiglia di rivestimento protettivo da essi rappresentata, per ogni contenitore sarebbero stati necessari 9.216 l di soluzione. Questo risultato è stato raggiunto, pensando esclusivamente alla sola struttura del provino, ma non tenendo in considerazione la tipologia di vasca e l'apparato strumentale da volersi utilizzare. Per realizzare la prova infatti, e per semplificare la struttura da utilizzarsi, si è pensato di forare ciascuna vasca in due punti, posti alle estremità della stessa, per far passare al loro interno il tondino d'acciaio, così che questo risultasse bloccato dalla vasca stessa. A ciascun tondino si sarebbero appesi i tre provini della famiglia scelta, ricorrendo al filo metallico, ricoperto da PVC, che a sua volta sarebbe passato nel foro da 5 mm, presente nell'estremità aggiuntiva, realizzata per lo scopo, di ciascun campione. Una volta realizzato l'apparato, è apparso evidente come i 9.216 l stimati per ciascuna vasca di immersione, non sarebbero stati sufficienti per rispettare tutte le indicazioni previste dalla normativa di riferimento, a causa dell'ingombro fisico di ogni provino, in termini di lunghezza, e a causa della posizione dei fori di passaggio del tondino. In particolare, ciascun provino avrebbe dovuto trovarsi sospeso nella soluzione ed a 5 mm almeno dal pelo libero della soluzione e 5 mm almeno dal fondo della vasca. Per tali ragioni è stato necessario posizionare i provini e coprirli con la necessaria quantità di soluzione, calcolata questa volta come il volume della soluzione che ciascuna vasca avrebbe potuto ospitare. Per non sommergere con la soluzione anche il tondino in acciaio, le dimensioni della vasca, da considerare per calcolare il volume, sono state ricavate proprio a partire dall'altezza dei fori superiori, ottenendo un volume totale per le tre vasche di 55 l. Per l'occasione sono state dunque acquistate 11 taniche di acqua distillata da 5 l ciascuna. Seguendo sempre le istruzioni fornite dalla normativa, in particolare quella sulla concentrazione di cloruro di sodio nella soluzione, che identifica come valore minimo quello di 35g per ogni litro, si è facilmente ottenuto come la quantità necessaria di cloruro di sodio fosse di 1925g. Per l'occasione sono stati acquistati due pacchi di sale da cucina da 1 kg ciascuno. La tabella 3 riassume tutto il materiale acquistato ed utilizzato per la realizzazione della prova.

Componente	Acquistato	Utilizzato
Vasche	3 componenti	3 componenti
Tondini in acciaio	3 componenti	3 componenti
Filo metallico ricoperto da PVC	Bobina da 7 m	1.5 m di lunghezza
Cloruro di sodio	2000 g	1925 g
Acqua distillata	11 taniche da 5 l ciascuna	11 taniche da 5 l ciascuna

 Tabella 3: Materiale utilizzato per la realizzazione del bagno corrosivo.

Ottenuto tutto il materiale necessario, sono state posizionate le tre vasche con le tre tipologie di rivestimento protettivo su un unico supporto, per garantire vicinanza e dunque stesse condizioni ambientali. In ciascuna tanica sono stati versati mediante imbuto una quantità di cloruro di sodio pari a 175g, misurata con la bilancia in *figura 52*, per garantire la concentrazione voluta.



Figura 52: Bilancia da laboratorio utilizzata per il cloruro di sodio.

Versato il sale in ciascuna delle 11 taniche e agitate quest'ultime per favorire il discioglimento del cloruro nell'acqua, i provini sono stati sommersi completamente e così alle ore 16 del 27 ottobre 2022 ha preso avvio la fase di corrosione.



Figura 53: Vasche di corrosione fotografate il 27 ottobre 2022.

Nella *figura 53* si possono osservare le tre vasche utilizzate per la prova di corrosione, fotografate il primo giorno di questa fase operativa.

## 8.3 Condizioni operative

La fase di corrosione ha avuto inizio il 27 ottobre 2022 alle ore 16 ed ha avuto termine il giorno 16 novembre 2022 alle ore 8:15 per una durata totale di 20 giorni circa. Una prima differenza da evidenziare, rispetto a quanto previsto e stabilito in fase preparatoria per la durata del
test, è che quest'ultima non è durata 10 giorni, bensì 20. Questa notevole differenza è stata il frutto di una scelta necessaria al soddisfacimento di alcune esigenze: essere sicuri di avere un effetto corrosivo importante e sostanziale, lasciare i provini il minor tempo possibile a riposo dopo la fase di corrosione, avere la disponibilità dell'azienda per effettuare la pesatura dei provini e pulizia degli stessi dai residui di sale, avere a disposizione le strutture di laboratorio per la fase successiva dell'analisi, dunque la macchina per la prova di fatica e garantire la presenza del tecnico di laboratorio che supervisionasse le prove stesse. Tutte queste ragioni hanno portato a rivedere le tempistiche stabilite in fase preliminare. Tuttavia, questo aspetto non ha rappresentato un fattore negativo, anzi positivo: tanto più il componente è esposto alla soluzione corrosiva, tanto più apprezzabili sono gli effetti. Durante tutta la prova, oltre a fotografie raccolte in precisi istanti, sono state tenute sotto osservazione tre grandezze fondamentali per la definizione dell'ambiente di lavoro: temperatura, umidità e ph.

#### 8.3.1 Grandezze controllate: temperatura e umidità

Durante tutto il periodo di immersione dei provini nella soluzione corrosiva sono state rilevate due grandezze estremamente importanti ai fini della compresione e dell'inquadramento del contesto operativo: la temperatura e l'umidità. In particolare, per la temperatura è stata fatta distinzione tra quella dell'ambiente circostante, misurata con termometro a parete (figura 54), posto nei pressi delle vasche, e quella di ciascuna soluzione, che invece è stata ricavata mediante misurazione con termometro a immersione (figura 55).



Figura 54: Termometro a parete fotografato il 27 ottobre 2022.



**Figura 55:** Termometro a immersione utilizzato per le singole soluzioni corrosive.

Le temperature, sia quella dell'ambiente che delle singole vasche di immersione, sono state raccolte tutti giorni, una volta al giorno al mattino intorno alle 8, per l'intera durata dell'esperimento, tranne non è stato possibile accedere al laboratorio, causa festività o chiusura per il weekend. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva con i valori registrati per il singolo giorno considerato e per la quale, ai fini di una corretta interpretazione, si rende necessario specificare quanto di seguito:

- Vasca 1: provini con rivestimento in nanotecnologie MCF 007, MCF 008 e MCF 009.
- Vasca 2: provini senza alcun rivestimento MCF 001, MCF 002 e MCF 003.
- Vasca 3: provini con rivestimento Primer MCF 004, MCF 005 e MCF 006.

Data	Temperatura ambiente	Umidità	Temperatura vasca 1	Temperatura vasca 2	Temperatura vasca 3
27/10/2022	20.0 °C	71%	20.4 °C	20.3 °C	20.3 °C
28/10/2022	14.0 °C	70%	14.2 °C	14.3 °C	14.1 °C
29/10/2022	15.2 °C	70%	15.7 °C	15.7 °C	15.7 °C
30/10/2022	15.3 °C	70%	15.9 °C	15.7 °C	15.7 °C
02/11/2022	15.8 °C	75%	17.4 °C	17.4 °C	17.4 °C
03/11/2022	15.9 °C	72%	17.4 °C	17.4 °C	17.8 °C
04/11/2022	15.2 °C	71%	17.6 °C	17.0 °C	17.1 °C
05/11/2022	15.3 °C	71%	17.6 °C	17.2 °C	17.3 °C
06/11/2022	15.1 °C	70%	17.4 °C	17.0 °C	17.2 °C
07/11/2022	14.7 °C	70%	15.1 °C	14.9 °C	15.0 °C
08/11/2022	14.9 °C	71%	15.6 °C	15.2 °C	15.4 °C
09/11/2022	14.6 °C	70%	15.3 °C	15.0 °C	15.2 °C
10/11/2022	14.5 °C	70%	14.8 °C	14.3 °C	14.5 °C
11/11/2022	14.0 °C	69%	14.9 °C	14.5 °C	14.5 °C
12/11/2022	14.1 °C	70%	15.1 °C	14.8 °C	14.8 °C
14/11/2022	16.1 °C	58%	17.8 °C	17.3 °C	17.7 °C
15/11/2022	18.6 °C	51%	18.9 °C	19.1 °C	19.2 °C
16/11/2022	16.6 °C	53%	18.1 °C	18.1 °C	18.1 °C

**Tabella 4:** Valori di temperatura e umidità raccolti durante la fase di corrosione forzata.

Osservando i dati riportati nella tabella 4, è possibile riconoscere come ci sia stato un andamento decrescente della temperatura ambiente a partire dai 20°C del 27 ottobre 2022, data in cui la fase di corrosione ha avuto inizio, fino al 16 novembre 2022, data in cui questa fase ha avuto fine. L'andamento decrescente della temperatura è stato pressoché lineare, ma va evidenzato come gli ultimi tre giorni, pur facendo registrare un valore inferiore a quello di inizio registrazione, abbiano visto un aumento isolato. Generalmente, le tre vasche di immersione hanno fatto registrare temperature più elevate, seppur di pochi decimi di grado o in rari casi di qualche grado, della temperatura ambiente, grazie alla inerzia termica della soluzione. Confrontando i valori delle temperature di ciascuna vasca, rispetto alle altre, non si riesce ad individuare una caratteristica di una di esse che si ripete per tutte le registrazioni. Per tale ragione le piccole variazioni possono essere associate a errori di misurazioni, dovuti al termometro ad immersione ed alla sua sensibilità, o a micro variazioni nell'esposizione alle condizioni ambiente. Per quanto riguarda l'altra grandezza tenuta sotto controllo, l'umidità, si osserva come questa sia stata pressoché costante, attestatasi intorno al valore del 70%, fino al 12 novembre, per poi crollare al valore di 53%, registrato invece l'ultimo giorno di questa fase.

#### 8.3.2 Grandezza controllata: ph

Durante lo svolgersi della prova si è pensato fosse anche utile valutare il ph delle singole soluzioni, per verificare che non vi fossero, o nel caso contrario cercare di giustificarle, delle differenze in questo senso. Questa grandezza è stata controllata con due prelievi per ciascuna vasca di immersione a distanze temporali considerevoli. Si riporta di seguito la tabella 5 che riassume i risultati ottenuti dalle analisi.

Data	ph Vasca 1	ph Vasca 2	ph Vasca 3
27/10/2022	7.00	7.00	7.00
04/11/2022	6.96	6.74	7.26
16/11/2022	7.24	7.06	7.25

 Tabella 5:
 Valori di ph registrati durante la fase di corrosione forzata.

Per il confronto si è assunto lo stesso valore di partenza del ph, che non è stato ottenuto da analisi di laboratorio della soluzione ed è per questo evidenziato diversamente, pari a 7.00 che caratterizza l'acqua distillata, uguale per tutte e tre le vasche nello stato iniziale, ricordando che il cloruro di sodio non influenza questa grandezza. Come si può osservare dalla tabella riportata sopra, la prima misurazione è avvenuta ad otto giorni dall'inizio del test. Il ph delle tre soluzioni, in questa occasione ha mostrato delle variazioni per tutte e tre le vasche ed in particolare ha visto una diminuzione per le vasche 1 e 2, associate alle famiglie dei provini con nanotecnologie e senza alcun rivestimento. Tutte e due sono risultate più acide rispetto alla condizione di partenza, con una variazione più accentuata per la vasca numero 2. La vasca tre invece, associata alla famiglia del rivestimento *Primer*, ha visto un aumento del proprio ph, evidenziando così un andamento incline alla basicità rispetto alla condizione iniziale. La seconda misurazione è stata effettutata al termine della fase di corrosione, a 12 giorni dalla prima misurazione ed ha visto un ulteriore cambiamento nelle condizioni: tutte e tre le soluzioni hanno assunto un carattere basico. Le variazioni sono state più marcate per le vasche 1 e 2, mentre la vasca 3 non ha registrato particolari differenze, rimanendo pressoché invariata.

### 8.4 Risultati ottenuti

Durante lo svolgimento della prova di immersione prolungata dei provini, non sono state registrate sostanziali differenze nell'aspetto che le vasche presentavano: le tre soluzioni non si sono caratterizzate per colorazioni differenti e non avevano peculiarità degne di nota. Tuttavia, l'aspetto superficiale dei provini si è distinto fin dai primi giorni della prova. Si riportano di seguito le fotografie scattate ai provini immersi nella giornata del 10 Novembre 2022: nella *figure 56* si osserva la vasca dei provini in alluminio grezzo, nella *figura 57* quella dei campioni trattati con *Primer* e nella *figura 58* quella con i provini trattati con nanotecnologie.



**Figura 56:** Provini in alluminio non trattati e immersi, fotografati il 10 Novembre 2022.



**Figura 57:** Provini in alluminio trattati con Primer e immersi, fotografati il 10 Novembre 2022.



**Figura 58:** Provini in alluminio trattati con nanotecnologie e immersi, fotografati il 10 Novembre 2022.

Nelle tre vasche è stato possibile osservare alcune caratteristiche importanti: tutte e tre presentavano un accumulo di cloruro di sodio sul fondo in corrispondenza di ciascun provino, come se ognuno avesse attirato a sé il sale e questo non avesse avuto modo di aderire completamente alla superficie metallica, precipitando così nella soluzione. Da notarsi che gli accumuli del soluto sono stati decisamente più consistenti, e quindi evidenti, in corrispondenza dei provini in alluminio grezzo non trattato e in corrispondenza di quelli trattati con nanotecnologie. Sulla superficie dei campioni è stato possibile osservare come parte del cloruro di sodio abbia comunque gradatamente aderito, in particolar modo sui provini in alluminio grezzo non trattato e su quelli trattati con nanotecnologie, mentre su quelli trattati con nanotecnologie, mentre su quelli trattati dei rigonfiamenti del trattamento superficiale. Nella *figura 59*, dove si scorge un provino di quelli trattati con nanotecnologie, in particolare l'*MCF 009*, si può osservare un dettaglio particolarmente curioso e degno di nota.



**Figura 59:** Dettaglio di un provino in immersione trattato con nanotecnologie.

Grazie alla fotografia di *figura 59* si può notare la formazione di gas che ha dato vita a delle vere e proprie bolle in corrispondenza della faccia superiore più vicina al pelo libero della soluzione del provino. Questa caratteristica non ha trovato una spiegazione precisa, poiché si è verificata solo in corrispondenza di un provino, l'*MCF 009*, della famiglia rappresentativa di questo rivestimento protettivo e non in tutti. Probabilmente la causa è da ricercarsi nel non perfetto trattamento del provino stesso in quella zona. Terminata la fase di corrosione forzata, che si ricorda essere duarata dal 27 ottobre 2022 al 16 novembre 2022, i provini sono stati estratti dalle vasche di immersione e sono stati lasciati asciugare all'aria, semplicemente appoggiandoli su un panno, per evitare che le condizioni estetiche venissero modificate da azioni meccaniche, prima di poter essere fotografati e adeguatamente analizzati. Di seguito, nella *figura 60*, si riportano le fotografie della famiglia di provini rappresentativi dell'alluminio grezzo senza alcun rivestimento protettivo nelle diverse fasi che hanno caratterizzato il processo.



**Figura 60:** Provini MCF 001, MCF 002 ed MCF 003 pre bagno corrosivo (A), post bagno corrosivo (B)e dopo la pulizia (C).

Nell'immagine (A) della figura 60 è possibile osservare i provini in alluminio grezzo appena realizzati e contrassegnati dalla sigla identificativa, prima di esser posti a bagno, infatti presentano il tipico aspetto lucente del metallo, non intaccato in alcun modo. La fotografia (B) in figura 60 è sata scattata immediatamente dopo la fase di estrazione dal bagno corrosivo e successivamente la breve fase di asciugatura: i provini presentano un aspetto decisamente diverso. Hanno completamente perso la lucentezza caratteristica iniziale, presentano chiare zone in cui si sono formate delle incrostazioni di cloruro di sodio ed al tatto presentavano una superficie granulosa, decisamente meno liscia e scorrevole rispetto alla condizione di partenza. L'immagine (C) in figura 60 è invece rappresentativa degli stessi provini, una volta sottoposti ad un semplice processo di pulizia superficiale, effettuato con un panno in fibra, per poter eliminare i residui di sale. La superficie del metallo comunque non ha acquisito nuovamente l'aspetto che la caratterizzava prima del bagno corrosivo, rimanendo comunque opaca e poco scorrevole al tatto, seppur migliorata rispetto alla condizione della seconda fotografia. Si riportano ora nella figura 61 le fotografie della famiglia dei provini trattati superficialmente con il Primer.



**Figura 61:** Provini MCF 004, MCF 005 ed MCF 006 pre bagno corrosivo (A), post bagno corrosivo (B) e dopo la pulizia(C).

Nella fotogafia (A) della figura 61 è possibile osservare i tre provini usati per il bagno di corrosione, rappresentativi della famiglia con rivestimento protettivo in *Primer*, poco prima che venissero sottoposti ad immersione. L'aspetto superficiale dei campioni è omogeneo ed al tatto risultava non perfettamente scorrevole, a causa dell'apposizione di questa vernice sul metallo base. L'immagine (B) in figura 61 evidenzia chiaramente delle imperfezioni nell'aspetto superficiale dei provini, ovviamente riconducibili agli effetti del bagno corrosivo. Tutti i campioni non presentano più una finitura omogenea del trattamento superficiale, ma questo presenta dei rignfiamenti in alcune zone rispetto al metallo base, a formare delle bolle di entità più o meno rilevanti. Queste bolle sono evidentemente sintomo della mancata aderenza della vernice superficiale al metallo base, quasi ad identificare la capacità del Primer di immolarsi per evitare che sia il metallo a farne le spese. In alcuni punti dei singoli provini, la vernice protettiva costituente le singole bolle è addirittura venuta meno, lasciando così il metallo esposto all'azione corrosiva della soluzione. Questo si è molto probabilmente verificato dove il trattamento non è stato applicato in maniera particolarmente adeguata o con la dovuta attenzione ed è perciò riconducibile ad un errore umano in fase di preparazione dei campioni. La fotografia (C) in figura 61 non presenta significative differenze rispetto ai provini considerati prima della fase di pulizia, poiché non vi erano considerevoli incrostazioni di sale. Tuttavia, la pulizia, nella sua sempleità, ha accentuato il distacco di alcune strutture a bolle di cui sopra: se si osserva attentamente il provino MCF 005 nella zona inferiore dove inizia la strizione, è facilemnte individuabile la mancanza del rivestimento protettivo, che lascia così esposto il metallo base. Questo ha evidenziato come sia bastato un semplice panno in fibra per eliminare il rivestimento protettivo. Si riportano in figura 62 le fotografie del set di provini rappresentativo della famiglia con rivestimento protettivo in nanotecnologie.



**Figura 62:** Provini MCF 007, MCF 008 ed MCF 009 pre bagno corrosivo (A), post bagno corrosivo (B) e dopo la pulizia (C).

La fotografia (A) nella fiqura 62 ha come soggetti i tre provini in alluminio trattati superficialmente con nanotecnologie. Essi, esattamente come quelli in alluminio grezzo senza alcun trattamento, presentano un aspetto lucente, tipico dei metalli, ed una superficie perfettamente liscia ed omogena, salve le imperfezioni, associabili a graffi, frutto delle operazioni di lavorazione nella fase preliminare. L'immagine (B) in figura 62 ha come soggetti gli stessi tre provini, fotografati però appena estratti dalla soluzione corrosiva e lasciati asciugare a temperatura ambiente, prima che venissero sottoposti al processo di pulizia. L'aspetto è evidentemente, chiaramente e considerevolmente variato: il metallo ha perso la sua lucentezza e la sua rifinitura superficiale, assumendo una colorazione decisamente più scura ed evidenziando delle importanti incrostazioni di cloruro di sodio, che hanno conferito ai provini un aspetto farinoso al tatto e certamente non liscio e scorrevole. La fotografia (C) in figura 62 mostra gli stessi provini, dopo esser stati sottoposti al processo di pulizia superficiale: l'aspetto è tornato ad essere più uniforme e vicino a quello iniziale, ma vi sono comunque delle differenze notevoli nella colorazione e nella lucentezza del metallo. Non ci sono certamente più le incrostazioni di sale evidenziate precedentemente, ma si può notare che, dove prima vi erano, ora ci sono delle strutture cirolari puntiformi di colorazione grigio scuro, nera, sintomo probabilmente di una pulizia non troppo approfondita, tale da eliminare anch'essi, o di un attacco corrosivo maggiormente localizzato e più efficace in quelle zone. Al tatto essi hanno mantenuto l'aspetto farinoso, seppur con entità decisamente minore. In ultima analisi si potrebbe affermare che a primo impatto la famiglia dell'alluminio grezzo e quella delle nanotecnologie hanno presentato gli stessi effetti dovuti alla corrosione, salvo queste strutture puntiformi di colorazione più scura, riscontrate nell'ultimo caso.

#### 8.4.1 Dettaglio dei singoli provini: alluminio grezzo senza alcun trattamento

In questo paragrafo vengono riportate le fotografie dei singoli provini, considerati singolarmente, della famiglia rappresentativa dell'alluminio grezzo senza alcun trattamento protettivo superficiale, per apprezzare con più precisione gli effetti superficiali del processo forzato di corrosione. Trattasi dunque dei provini con le sigle  $MCF \ 001$  in figura 63,  $MCF \ 002$  in figura 64 ed  $MCF \ 003$  in figura 65.



**Figura 63:** Provino MCF 001 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).



**Figura 64:** Provino MCF 002 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).



**Figura 65:** Provino MCF 003 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).

#### 8.4.2 Dettaglio dei singoli provini: alluminio trattato con rivestimento protettivo *Primer*

In questo paragrafo vengono riportate le fotografie dei singoli provini, considerati singolarmente, della famiglia rappresentativa dell'alluminio trattato con rivestimento protettivo superficiale Primer, per apprezzare con più precisione gli effetti superficiali del processo forzato di corrosione. Trattasi dunque dei provini con le sigle  $MCF \ 004$  in figura 66,  $MCF \ 005$ in figura 67 ed  $MCF \ 006$  in figura 68.



**Figura 66:** Provino MCF 004 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).



**Figura 67:** Provino MCF 005 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).



**Figura 68:** Provino MCF 006 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).

#### 8.4.3 Dettaglio dei singoli provini: alluminio trattato con rivestimento protettivo in nanotecnologie

In questo paragrafo vengono riportate le fotografie dei singoli provini, considerati singolarmente, della famiglia rappresentativa dell'alluminio trattato con rivestimento protettivo superficiale con nanotecnologie, per apprezzare con più precisione gli effetti superficiali del processo forzato di corrosione. Trattasi dunque dei provini con le sigle MCF 007 in figura 69, MCF 008 in figura 70 ed MCF 009 in figura 71.



**Figura 69:** Provino MCF 007 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).



**Figura 70:** Provino MCF 008 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).



**Figura 71:** Provino MCF 009 completo (A), visto lateralmente (B) e visto in dettaglio (C).

### 9 Seconda fase operativa: prove meccaniche di fatica

Il processo di studio è stato pensato per indebolire la struttura del metallo, attraverso un processo di corrosione forzato, che, come si è visto ha avuto una durata di 20 giorni circa, rispetto ai 10 stimati inizialmente, e successivamente sottoporre i singoli provini ad uno sforzo meccanico. La tipologia di sforzo meccanico scelto per l'analisi è quella nota come *a fatica*: i singoli provini sono stati oggetto di sollecitazioni meccaniche ripetute, tutte di intensità inferiori a quelle di rottura del materiale considerato. Per la realizzazione delle prove si è fatto affidamento all'attrezzatura messa a disposizione dal *Politecnico di Torino*, in particolar modo alla macchina *INSTROM 8801*.



Figura 72: Macchina INSTROM utilizzata per le prove di fatica.

La macchina *INSTROM 8801*, visibile in *figura 72*, è costituita da un solido basamento, isolato su una piattaforma apposita che risulta a sé stante, rispetto al pavimento del laboratorio, per impedire che vibrazioni esterne possano interferire con il ciclo di carico imposto per l'esecuzione della prova, e da una struttura aperta superiore. La struttura aperta costituisce il supporto per le due ganasce, quella inferiore e quella superiore, che realizzano l'afferraggio del provino.



Figura 73: Provino in alluminio serrato nelle due ganasce.

Ciascun provino, infatti, viene posto e serrato all'interno delle due ganasce, come si può osservare in *figura 73*, dove è presente un provino trattato con *Primer*, cosicché l'applicazione del carico non comporti uno slittamento dello stesso, inficiando il risultato della prova. In generale, ogni campione testato è stato sottoposo ad un particolare ciclo di carico, che verrà meglio definito successivamente, e portato alla rottura completa, che avviene come si vede in *figura 74*: ciascun provino si è separato esattamente in corrispondenza del foro, dove si era previsto si verificasse la rottura, dando vita a due sezioni a sé stanti.



Figura 74: Esempio di un provino portato a rottura.

Il controllo della macchina di prova, nel suo funzionamento e nelle sue impostazioni, avviene grazie all'ausilio di un apparato elettronico posto di fianco alla macchina stessa e visibile in *figura 75*. Mediante questo apparato è possibile impostare il particolare cilo di carico desiderato, la tensione massima, la tensione minima e la frequenza di carico ed ottenere in

tempo reale il grafico della curva di carico, valutando così, al termine della prova, anche il numero di cicli a cui il provino è stato sottoposto prima di giungere a rottura.



Figura 75: Apparato strumentale collegato alla macchina di prova.

Come accennato in precedenza, tutti i provini sottoposti al processo di corrosione sono stati oggetto di investigazioni meccaniche, attraverso il test di fatica, ma non solo. Ai nove provini corrosi, sono stati aggiunti gli altri quattro provini, portando il totale di quelli testati meccanicamente a 13. La decisione di testare anche quelli non corrosi è nata dall'esigenza di avere un confronto diretto tra le stesse tipologie di rivestimenti superficiali con l'unica discriminante del processo corrosivo subito. Si riportano dunque nella *tabella* 6 tutti i provini sottoposti alla prova di fatica, evidenziando anche quelli che hanno subito il processo corrosivo.

Identificativo del provino	Materiale del provino	Rivestimento superficiale	Processo corrosivo
MF 000	Alluminio 2024 T3	Nessuno	No
MCF 001	Alluminio 2024 T3	Nessuno	Sì
MCF 002	Alluminio 2024 T3	Nessuno	Sì
MCF 003	Alluminio 2024 T3	Nessuno	Sì
MCF 004	Alluminio 2024 T3	Primer	Sì
MCF 005	Alluminio 2024 T3	Primer	Sì
MCF 006	Alluminio 2024 T3	Primer	Sì
MCF 007	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie	Sì
MCF 008	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie	Sì
MCF 009	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie	Sì
MCS 010	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie	No
MCS 011	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie	No
MCS 012	Alluminio 2024 T3	Nanotecnologie	No

 Tabella 6: Provini utilizzati per le prove meccaniche di fatica.

Come si evince dalla tabella riportata sopra, per ciascuna famiglia rappresentativa di un rivestimento protettivo, sono stati testati almeno tre provini. Data la disponibilità di campioni, limitata nel caso dell'alluminio grezzo senza rivestimento superficiale e considerevole nel caso di quello rivestito con nanotecnologie, è stato possibile testare 4 esemplari nel primo caso e 6 nel secondo, mentre per la famiglia del rivestimento *Primer* è stato necessario accontentarsi dei soli tre campioni sottoposti a corrosione. I 13 provini totali sono stati poi suddivisi ulteriormente, poiché si è deciso di operare con tre cicli di carico differenti, meglio definiti successivamente, aventi caratteristiche diverse. Per tale ragione ad ogni ciclo di carico è stato assegnato un certo numero di provini, come viene sintetizzato nella *tabella 7*.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Ciclo di carico
MF 000	Nessuno	Tipologia 1
MCF 001	Nessuno	Tipologia 1
MCF 004	Primer	Tipologia 1
MCF 007	Nanotecnologie	Tipologia 1
MCS 010	Nanotecnologie	Tipologia 1
MCF 002	Nessuno	Tipologia 2
MCF 005	Primer	Tipologia 2
MCF 008	Nanotecnologie	Tipologia 2
MCS 011	Nanotecnologie	Tipologia 2
MCF 003	Nessuno	Tipologia 3
MCF 006	Primer	Tipologia 3
MCF 009	Nanotecnologie	Tipologia 3
MCS 012	Nanotecnologie	Tipologia 3

 Tabella 7: Provini scelti per ciascuna tipologia di ciclo di carico.

Nel seguito verranno affrontate le differenti tipologie di carico, presentando anche i risultati ottenuti per le stesse. L'esigenza di condurre i test di fatica, operando con tre livelli di carico differenti, nasce dall'idea di avvicinarsi nelle modalità operative a quanto fatto per la definizione delle *curve S-N*, riportate nel manuale *MIL HDBK-5H*, che tratta dei metalli e degli elementi utilizzati per la progettazione di strutture aerospaziali. Si riporta di seguito nella *figura 76* un esempio delle *curve S-N* riportate nel manuale.



Figure 3.2.3.1.8(f). Best-fit S/N curves for notched,  $K_1 = 1.5$ , 2024-T3 aluminum alloy sheet, longitudinal direction.

Figura 76: Grafico con curve S-N tratto dal MIL HDBK-5H.

La procedura operativa per la realizzazione di questa curva prevede che si definiscano numerosi livelli di carico e ad ognuno venga assegnato un consistente numero di provini da testare con lo stesso e si registri il numero di cicli che porta ciascuno a rottura. La curva è una interpolazione quanto più vicina possibile ai dati sperimentali che si ottengono in laboratorio. Per completezza, nel grafico della *figura 76*, che riporta i risultati ottenuti per campioni in alluminio 2024-T3 con un *fattore di intensificazione degli sforzi* pari a 1.5, vi sono tipologie di dati sperimentali differenti, rappresentati da marcatori differenti, che evidenziano *Stress ratio*, diversi: il rapporto, nullo nel caso di questo studio, tra lo stress minimo applicato al provino e quello massimo, per una data curva nel piano differisce dagli altri.

#### 9.1 Prima tipologia di ciclo di carico

Le prove di fatica hanno avuto ufficialmente inizio la mattina di mercoledì 21 novembre 2022, presso il laboratorio del *Politecnico di Torino*. Per le prime prove si è deciso di realizzare un ciclo di carico che avesse la forza applicata massima, tra quelle proposte per le tre famiglie di carico, ed una frequenza di applicazione del carico pari ad un valore, che sarebbe stato lo stesso anche per le altre tipologie. Le caratteristiche per la prima tipologia di carico sono:

- Forza massima applicata pari a 11 kN.
- Forza minima applicata pari a 0 kN.
- Frequenza di applicazione del carico pari a 5 Hz.

In riferimento alla frequenza di applicazione del carico, durante l'esecuzione della prova è stata variata: inizialmente era stata scelta una frequenza pari a 3 Hz, per poi essere incrementata per i provini successivi, avendo valutato la prima scelta essere troppo bassa. Questa variazione ha avuto chiaramente degli effetti sui risultati, che potremo sottolineare e considerare meglio successivamente. Si ricordano di seguito, nella *tabella 8*, quali provini sono stati sottoposti alla prova di fatica con questa tipologia di carico:

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Ciclo di carico
MF 000	Nessuno	Tipologia 1
MCF 002	Nessuno	Tipologia 1
MCF 005	Primer	Tipologia 1
MCF 008	Nanotecnologie (corroso)	Tipologia 1
MCS 011	Nanotecnologie (non corroso)	Tipologia 1

 Tabella 8: Provini assegnati alla prima tipolgia di ciclo di carico.

#### 9.1.1 Dettagli fotografici dei provini sottoposti alla prima tipologia di carico

In questa sezione vengono riportate le fotografie effettuate su ciascun provino sottoposto alla prima tipologia di carico. Per ciascuno di essi ( $MF \ 000$  in figura 77,  $MCF \ 001$  in figura 78,  $MCF \ 004$  in figura 79,  $MCF \ 007$  in figura 80 ed  $MCS \ 010$  in figura 81) è stata realizzata una fotografia dove sono visibili entrambi i tronconi, creatisi in seguito alla rottura del provino originario, una dove gli stessi sono fotografati dall'alto, una dove sono fotografati dall'alto con una certa inclinazione ed un'ultima foto dove è presente solo uno dei due tronconi, per meglio evidenziare la sezione di rottura.



(A)

(B)



(C) (D)

**Figura 77:** Provino MF 000: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).









**Figura 78:** Provino MCF 001: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).



(A)

(B)





Figura 79: Provino MCF 004: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).



(A)

(B)



**Figura 80:** Provino MCF 007: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).





(B)



**Figura 81:** Provino MCS 010: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).

#### 9.1.2 Analisi del numero di cicli di rottura per la prima tipologia di carico

Ciascun test condotto sul singolo provino è stato attentamente seguito, grazie all'ausilio della strumentazione computerizzata posta vicno alla macchina di prova e collegata ad essa. Infatti, per ogni prova il software presente sul computer restituisce il grafico con l'andamento sinusoidale del carico applicato in modo ciclico al campione ed infine restituisce un documento di testo, dove è possibile leggere il numero di cicli necessari alla rottura e la durata in secondi della prova. Di seguito nella breve *tabella 9* vengono riportati i valori registrati dal software per ciascun provino, scelto per la prima tipologia di carico.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Numero di cicli necessari alla rottura
MF 000	Nessuno	5570.25
MCF 001	Nessuno	2312.25
MCF 004	Primer	2476.25
MCF 007	Nanotecnologie (corroso)	4467.25
MCS 010	Nanotecnologie (non corroso)	4532.75

**Tabella 9:** Numero di cicli necessari alla rottura per i provini assegnati alla prima tipologia di ciclo di carico.

Osservando la tabella 9, è immediatamente visibile come il primato in termini di cicli necessari alla rottura spetti al provino realizzato in alluminio senza alcun trattamento protettivo superficiale. Questo risultato è in linea con quanto ci si aspettava: non essendo stato sottoposto ad alcun processo corrosivo forzato, la struttura del metallo è rimasta intatta ed ha potuto affrontare il test di fatica senza alcun difetto iniziale. Diversamente i risultati per i provini in alluminio non trattato e trattato con *Primer* sono molto simili, seppur per il secondo sembri esserci un lieve miglioramento, con molta probabilità attribuibile alla capacità del trattamento di proteggere il metallo dalla corrosione. Tuttavia, entrambi i risultati sono decisamente inferiori rispetto al risultato ottenuto per il provino in alluminio non corroso. E' inoltre possibile vedere come i risultati per le famiglie dell'alluminio non trattato e quello trattato con *Primer* siano significativamente inferiori rispetto ai valori ottenuti per i provini trattati con nanotecnologie. Per quest'ultima famiglia la differenza tra il provino non corroso e quello corroso non assume particolare significato. Questo risultato evidenzia come a basso numero di cicli ed elevato carico il rivestimento in nanotecnologie ha rappresentato un valido aiuto per il metallo base nell'affrontare il test di fatica. Allo stesso modo è possibile effettuare un confronto in termini di durata temporale della prova eseguita su ciascun provino. Per tale ragione, si riporta la *tabella 10*.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Durata della prova [s]
MF 000	Nessuno	1125.0860
MCF 001	Nessuno	473.4380
MCF 004	Primer	927.5370
MCF 007	Nanotecnologie (corroso)	904.3590
MCS 010	Nanotecnologie (non corroso)	917.3170

**Tabella 10:** Durata delle prove meccaniche per i provini assegnati alla prima tipologia di ciclo di carico.

Dalla tabella 10 è possibile scorgere come le durate temporali maggiori siano associate ovviamente ai provini che hanno richiesto il numero maggiore di cicli per arrivare alla rottura completa. Tuttavia, a primo impatto è presente una incongruenza: il provino  $MCF \ 004$ , che ha richiesto circa lo stesso numero di cicli del provino  $MCF \ 001$  per giungere a rottura, evidenzia un tempo necessario circa doppio. Ciò si spiega con il fatto che la frequenza di applicazione del carico sia stata cambiata tra le prove: l' $MCF \ 004$ , provato per primo, è stato testato ad una frequenza pari alla metà di quella usata per i provini successivi. Questo cambiamento si è reso necessario in seguito a valutazioni sulla durata richiesta per eseguire tutte le prove e sulla disponibilià della macchina di prova. Tutti gli altri risultati sono in linea con quanto già evidenziato dai valori dei numeri di cicli necessari alla rottura per ciascun provino.

### 9.1.3 Analisi delle aree di rottura per i provini sottoposti alla prima tipologia di carico

Sulle sezioni dei singoli provini portati a rottura durante la prova di fatica, si è deciso di effettuare un'ulteriore analisi di carattere qualitativo: la valutazione dell'area visibilmente riconducibile alla rottura per fatica e di quella riconducibile alla rottura statica.



Figura 82: Sezione di rottura del provino MCS 010.

Nella *figura 82* si è riportato a titolo d'esempio la fotografia del provino *MCS 010*: in essa si riscontrano chiaramente due zone, una prossima al foro centrale, che dal lì si diparte, ed una che ha inizio nelle zone più lontane da quella centrale. Le due zone presentano anche una colorazione diversa, più chiara nel primo caso e più scura nel secondo, oltre ad un aspetto differente, più omogeneo nel primo caso, e più frastagliata nel secondo. La prima zona, quella chiara e prossima al foro, è direttamente riconducibile alla propagazione per fatica, mentre la seconda zona, quella più scura e lontana dal foro centrale, è riconducibile alla rottura statica. L'analisi qualitativa di cui si è detto si esplica nel calcolo dell'area associata a queste differenti zone della sezione di rottura. Come si può osservare, queste sono associabili in prima approssimazione a figure geometriche quali rettangoli e triangoli. Per tale ragione, con l'ausilio di un calibro per le misurazioni, sono stati ottenuti i seguenti risultati.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Area totale della sezione [mm²]	Area rottura a fatica [mm²]	Area rottura statica [mm²]
MF 000	Nessuno	31.5	7.5	24.0
MCF 001	Nessuno	31.5	6.0	25.5
MCF 004	Primer	31.5	5.0	26.5
MCF 007	Nanotecnologie (corroso)	31.5	6.0	25.5
MCS 010	Nanotecnologie (non corroso)	31.5	9.0	22.5

**Tabella 11:** Aree di rottura a fatica e statica dei provini assegnati alla prima tipologia di ciclo di carico.

Osservando la *tabella 11*, si può notare come il processo di fatica abbia un impatto maggiore sui provini in alluminio non trattato superficialmente e trattato con *Primer*, entrambi sottoposti a corrosione, infatti presentano un'area riconducibile a rottura per fatica paragonabile agli altri valori, creatasi però con la metà del numero di cicli necessari alla rottura. L'area maggiore dovuta alla fatica è associata al provino non corroso, trattato con nanotecnologie, che però vanta il secondo valore più alto per numero di cicli a rottura. Certamente costituisce un risultato importante il fatto che il provino trattato con nanotecnologie e corroso, presentando circa il doppio del numero di cicli necessari alla rottura rispetto al provino in alluminio non trattato e corroso, abbia la stessa area riconducibile a rottura per fatica di quest'ultimo.

### 9.2 Seconda tipologia di ciclo di carico

Una volta terminate le prove meccaniche con la prima tipologia di spettro di carico, che hanno avuto come soggetti un provino rappresentativo per ciascuna famiglia di rivestimento protettivo, lo studio è proseguito con la definizione di una seconda tipologia di carico, applicata nuovamente ad un gruppo di provini, anche essi rappresentativi dei singoli trattamenti superficiali. Per questa tipologia di carico si è deciso di spostarsi verso una forza massima intermedia, applicata con la stessa frequenza scelta precedentemente. Si riassumono di seguito le caratteristiche operative per queste prove meccaniche:

- Forza massima applicata pari a 9 kN.
- Forza minima applicata pari a 0 kN.
- Frequenza di applicazione del carico pari a 5 Hz.

Come già affermato sopra, sono stati sottoposti a test nuovi provini, precedentemente esposti al bagno di corrosione, ciascuno rappresentativo di una famiglia di rivestimento protettivo. Di seguito si riporta la *tabella 12* che riassume il nuovo gruppo di campioni utilizzati.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Ciclo di carico
MCF 002	Nessuno	Tipologia 2
MCF 005	Primer	Tipologia 2
MCF 008	Nanotecnologie (corroso)	Tipologia 2
MCS 011	Nanotecnologie (non corroso)	Tipologia 2

 Tabella 12:
 Provini assegnati alla seconda tipologia di ciclo di carico.

# 9.2.1 Dettagli fotografici dei provini sottoposti alla seconda tipologia di ciclo di carico

In questa sottoparagrafo vengono riportate le fotografie effettuate su ciascun provino sottoposto alla prova meccanica di fatica con la seconda tipologia di ciclo di carico. Per ognuno (*MCF 002* in figura 83, *MCF 005* in figura 84, *MCF 008* in figura 85 ed *MCS 011* in figura 86) è stata realizzata una fotografia dove sono visibili entrambi i tronconi, creatisi in seguito alla rottura del provino originario, una dove gli stessi sono fotografati dall'alto, una dove sono fotografati dall'alto con una certa inclinazione ed un'ultima foto dove è presente solo uno dei due tronconi, per meglio evidenziare la sezione di rottura.









(C)

(D)

Figura 83: Provino MCF 002: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).



(A)

(B)



**Figura 84:** Provino MCF 005: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).









**Figura 85:** Provino MCF 008: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).





(B)



**Figura 86:** Provino MCS 011: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).

# 9.2.2 Analisi del numero di cicli di rottura per la seconda tipologia di ciclo di carico

Così come eseguito per i campioni sottoposti alla prova meccanica con la prima tipologia di ciclo di carico, anche per questa famiglia di provini, si sono registrati i numeri di cicli necessari alla rottura del provino e la durata in secondi della prova, grazie all'apparato strumentale collegato alla macchina *INSTROM*, con la quale sono state eseguite le prove di trazione. Grazie ai documenti di testo, restituiti dal software che controlla istante per istante l'esecuzione della prova, si è potuto realizzare la *tabella 13*, dove vengono riassunti i risultati ottenuti.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Numero di cicli necessari alla rottura
MCF 002	Nessuno	6041.25
MCF 005	Primer	7631.00
MCF 008	Nanotecnologie (corroso)	11774.75
MCS 011	Nanotecnologie (non corroso)	16693.75

**Tabella 13:** Numero di cicli necessari alla rottura per i provini assegnati alla seconda tipologia di ciclo di carico.

Osservando la tabella 13 si possono dedurre importati considerazioni in fatto di protezione superficiale. Come ci si aspettava il provino non trattato con alcun rivestimento superficiale risulta essere quello che meno resiste alla prova meccanica, richiedendo infatti un numero di cicli per arrivare a rottura pari a 6041.25. Il risultato negativo è certamente da attribuirsi alla mancanza di una protezione, in grado di preservare il metallo base dall'attacco corrosivo. Facendo riferimento invece, al provino con trattamento superficiale *Primer* si nota già un netto miglioramento, rispetto al provino non trattato. Infatti, il numero di cicli necessari alla rottura risulta significativamente maggiore, evidenziando un miglioramento delle capacità di resistenza alla fatica, garantito dal trattamento superficiale, che ha insindacabilmente protetto il metallo base dall'attacco corrosivo. Tuttavia, il risultato migliore spetta anche in questo caso, tra le famiglie di rivestimento protettivo che hanno subito il processo di corrosione, a quella rappresentativa del rivestimento con nanotecnologie. Infatti, il provino MCF 008 ha richiesto ben 4000 cicli in più per giungere a rottura rispetto al campione trattato con *Primer* e quasi il doppio dei cicli rispetto al provino non trattato superficialmente. Il risultato positivo ha evidenziato in questo caso un'ottima capacità delle nanotecnologie di fornteggiare la corrosione, permettendo al metallo di resistere maggiormente alle sollecitazioni a fatica. Confrontando poi il provino  $MCF \ 008$  con il suo corrispettivo non sottoposto al processo di corrosione, l'MCS 011, è possibile notare come si sia ottenuto, quanto ci si aspettasse: l'MCS 011 ha resistito maggiormente alle sollecitazioni, poiché non danneggiato dalla corrosione. Allo stesso modo è possibile effettuare un confronto in termini di durata temporale della prova eseguita su ciascun provino. Per tale ragione, si riporta la tabella 14.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Durata della prova [s]
MCF 002	Nessuno	1219.1700
MCF 005	Primer	1537.0520
MCF 008	Nanotecnologie (corroso)	2365.7960
MCS 011	Nanotecnologie (non corroso)	3349.6880

**Tabella 14:** Durata delle prove meccaniche per i provini assegnati alla seconda tipologia di ciclo di carico.

Con riferimento alla *tabella 14* i risultati confermano semplicemente quanto già affermato per i valori relativi al numero di cicli necessari alla rottura dei singoli provini: il primato, tra i provini sottoposti precedentemente al processo di corrosione, spetta certamente al campione trattato con nanotecnologie. Complessivamente, il risultato migliore è certamente da attribuirsi al provino trattato con nanotecnologie e non corroso.

# 9.2.3 Analisi delle aree di rottura per i provini sottoposti alla seconda tipologia di carico

La valutazione qualitativa delle aree della sezione del provino associate rispettivamente alla rottura per fatica ed alla rottura statica è stata condotta anche sui campioni assegnati alla seconda tipologia di carico applicato.



Figura 87: Sezione di rottura del provino MCF 002.

Nella figura 87 si è riportato a titolo d'esempio la fotografia del provino MCF 002: in essa si riscontrano chiaramente due zone, una prossima al foro centrale ed una che ha inizio
nelle zone più lontane da quella centrale. Le due zone presentano anche una colorazione diversa, più chiara nel primo caso e più scura nel secondo, oltre ad un aspetto differente, più omogeneo nel primo caso, e più frastagliata nel secondo. La prima zona, quella chiara e prossima al foro, è direttamente riconducibile alla rottura per fatica, mentre la seconda zona, quella più scura e lontana dal foro centrale, è riconducibile alla rottura statica, avvenuta successivamente. L'analisi qualitativa di cui si è detto si esplica nel calcolo dell'area associata a queste differenti zone della sezione di rottura. Come si può osservare, queste sono associabili in prima approssimazione a figure geometriche quali rettangoli e triangoli. Per tale ragione, con l'ausilio di un calibro per le misurazioni, sono stati ottenuti i seguenti risultati.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Area totale della sezione [mm²]	Area rottura a fatica [mm²]	Area rottura statica [mm²]
MCF 002	Nessuno	31.5	9.0	22.5
MCF 005	Primer	31.5	9.0	22.5
MCF 008	Nanotecnologie (corroso)	31.5	7.5	24.0
MCS 011	Nanotecnologie (non corroso)	31.5	12.0	19.5

**Tabella 15:** Aree di rottura a fatica e statica dei provini assegnati alla seconda tipologia di ciclo di carico.

Osservando la *tabella 15*, si può notare come il processo di fatica abbia un impatto maggiore sui provini in alluminio non trattato superficialmente e trattato con *Primer*, entrambi sottoposti a corrosione, infatti presentano un'area riconducibile a rottura per fatica uguale, creatasi con un numero di cicli simile, ma decisamente inferiore al valore ottenuto per gli altri due provini. L'area maggiore dovuta alla fatica è associata al provino non corroso, trattato con nanotecnologie, che però vanta il valore più alto per numero di cicli a rottura. Certamente costituisce un risultato importante il fatto che il provino trattato con nanotecnologie e corroso, presentando circa il doppio del numero di cicli necessari alla rottura rispetto al provino in alluminio non trattato e corroso, abbia un'area riconducibile a rottura per fatica significativamente inferiore rispetto a quest'ultimo, evidenziando un passo di propagazione della fatica certamente inferiore ad ogni ciclo.

### 9.3 Terza tipologia di carico

La fase di studio delle caratteristiche meccaniche di resistenza alla fatica ha avuto termine con l'ultima famiglia scelta per la terza tipologia di carico. Anche in questo caso i campioni scelti sono stati rappresentativi di un rivestimento protettivo, come fatto per le altre due tipologie di carico. Si è deciso in questo caso di spostarsi ulteriormente verso un carico basso, per osservare il comportamento dei campioni ad elevato numero di cicli. Si riportano di seguito le caratteristiche operative del ciclo di carico:

- Forza massima applicata pari a 6 kN.
- Forza minima applicata pari a 0 kN.
- Frequenza di applicazione del carico pari a 5 Hz.

Come già affermato sopra, sono stati sottoposti a test nuovi provini, precedentemente esposti al bagno di corrosione, ciascuno rappresentativo di una famiglia di rivestimento protettivo. Di seguito si riporta la *tabella 16* che riassume il nuovo gruppo di campioni utilizzati.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Ciclo di carico
MCF 003	Nessuno	Tipologia 3
MCF 006	Primer	Tipologia 3
MCF 009	Nanotecnologie (corroso)	Tipologia 3
MCS 012	Nanotecnologie (non corroso)	Tipologia 3

 Tabella 16:
 Provini assegnati alla terza tipologia di ciclo di carico.

#### 9.3.1 Dettagli fotografici dei provini sottoposti alla terza tipologia di carico

In questa sezione vengono riportate alcune immagini dei provini sottoposti alla terza tipologia di carico. Per ciascuno di essi è stata realizzata una fotografia ( $MCF \ 003$  in figura 88,  $MCF \ 006$  in figura 89,  $MCF \ 009$  in figura 90 ed  $MCS \ 012$  in figura 91), dove sono visibili entrambi i tronconi, creatisi in seguito alla rottura del provino originario, una dove gli stessi sono fotografati dall'alto, una dove sono fotografati dall'alto con una certa inclinazione ed un'ultima foto dove è presente solo uno dei due tronconi, per meglio evidenziare la sezione di rottura.









**Figura 88:** Provino MCF 003: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).





(B)



**Figura 89:** Provino MCF 006: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).









(C)

(D)

**Figura 90:** Provino MCF 009: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).





(B)



(A)

(B)

**Figura 91:** Provino MCS 012: tronconi separati posti su un piano (A), tronconi visti dall'alto (B), visti dall'alto con inclinazione (C) e sezione di rottura (D).

#### 9.3.2 Analisi del numero di cicli di rottura per la terza tipologia di carico

Così come eseguito per i campioni sottoposti al test meccanico di fatica con la prima e seconda tipologia di carico, anche per questa famiglia di provini, si sono registrati i numeri di cicli necessari alla rottura del provino e la durata in secondi della prova, grazie all'apparato strumentale collegato alla macchina *INSTROM*, con la quale sono state eseguite le prove. Grazie ai documenti di testo, restituiti dal software che controlla istante per istante l'esecuzione della prova, si è potuto realizzare la seguente *tabella 17*, dove vengono riassunti i risultati ottenuti.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Numero di cicli necessari alla rottura
MCF 003	Nessuno	20791.00
MCF 006	Primer	22986.25
MCF 009	Nanotecnologie (corroso)	34329.00
MCS 012	Nanotecnologie (non corroso)	100169.50

**Tabella 17:** Numero di cicli necessari alla rottura per i provini sottoposti alla terza tipologia di ciclo di carico.

Osservando la tabella 17, è possibile fare alcune considerazioni di notevole importanza: come ci si aspettava inizialmente il risultato peggiore in termini di resistenza alla prova meccanica spetta al provino in alluminio grezzo non trattato con alcun rivestimento superficiale. Per questo provino sono stati necessari 20791 cicli di applicazione del carico per arrivare a rottura. Il valore ottenuto, più basso tra tutti quelli registrati per questa famiglia di campioni sottoposti alla terza tipologia di carico, è diretta conseguenza della mancanza di un rivestimento protettivo che impedisse al metallo base di essere oggetto dei processi corrosivi. Il risultato ottenuto per il provino con rivestimento *Primer* invece, evidenzia già un miglioramento nel comportamento del metallo a fatica: sono infatti necessari poco più di 2000 cicli aggiuntivi per giungere a rottura, sottolineando come il rivestimento superficiale abbia garantito una protezione dell'alluminio dagli agenti corrosivi. Tuttavia, il risultato migliore spetta anche in questo caso, tra le famiglie di rivestimento protettivo che hanno subito il processo di corrosione, a quella rappresentativa del rivestimento con nanotecnologie. Il provino MCF 009 ha richiesto infatti, ben 11300 cicli in più per giungere a rottura rispetto al campione trattato con *Primer* e poco meno del doppio dei cicli rispetto al provino non trattato superficialmente. I valori ottenuti, confermano quanto già verificatosi per le altre due tipologie di carico: il rivestimento protettivo con nanotecnologie sembrerebbe garantire la miglior protezione dalla corrosione, permettendo al metallo di resistere maggiormente alle sollecitazioni meccaniche a fatica. Questo risultato non ci permette di affermare che la corrosione non abbia alcun effetto sul metallo: se si confrotano i numeri di cicli registrati per l'MCF 009 e l'MCF 012, entrambi trattati con nanotecnologie, ma solo il primo sottoposto al processo di corrosione forzato, è evidente come il secondo abbia una resistenza alla sollecitazione meccanica a fatica notevolmente maggiore. L'MCF 012 ha fatto registrare infatti, un numero di cicli pari circa a 3 volte quello del suo corrispettivo corroso. Tutto ciò sottolinea come la corrosione abbia un impatto notevole e considerevole sulle proprietà meccaniche del metallo. L'analisi delle durate temporali delle singole prove per questa tipologia di carico non fa altro che confermare

i risultati ottenuti in termini di cicli, essendo esclusiva funzione della frequenza di applicazione del carico, che è stata mantenuta costante per tutti i provini. Si riporta la *tabella 18* con i valori delle durate delle singole prove.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Durata della prova [s]
MCF 003	Nessuno	4169.1320
MCF 006	Primer	4608.1640
MCF 009	Nanotecnologie (corroso)	6876.6620
MCS 012	Nanotecnologie (non corroso)	20056.0520

**Tabella 18:** Durata delle prove meccaniche per i provini associati alla terza tipologia di ciclo di carico.

# 9.3.3 Analisi delle aree di rottura per i provini sottoposti alla terza tipologia di carico

La valutazione qualitativa delle aree della sezione del provino associate rispettivamente alla rottura per fatica ed alla rottura statica è stata condotta anche sui campioni assegnati alla terza tipologia di carico.



Figura 92: Sezione di rottura del provino MCF 006.

Nella *figura 92* si è riportato a titolo d'esempio la fotografia del provino *MCF 006*: anche in questa fotografia è possibile scorgere le due zone di rottura che abbiamo già evidenziato nei casi precedenti. Le due zone distinte sono quella prossima al foro centrale e quella che ha inizio nelle zone più lontane da quella centrale. Le due zone presentano visibilmente una colorazione diversa, più chiara nel primo caso e più scura nel secondo, oltre ad un aspetto superficiale differente, più omogeneo nel primo caso, e più frastagliato nel secondo. La prima

zona, quella chiara e prossima al foro, è direttamente riconducibile alla rottura per fatica, mentre la seconda zona, quella più scura e lontana dal foro centrale, è riconducibile alla rottura statica. L'analisi qualitativa di cui si è detto si esplica nel calcolo dell'area associata a queste differenti zone della sezione di rottura. Come si può osservare, queste sono associabili in prima approssimazione a figure geometriche quali rettangoli e triangoli. Per tale ragione, con l'ausilio di un calibro per le misurazioni, sono stati ottenuti i seguenti risultati.

Identificativo del provino	Rivestimento superficiale	Area totale della sezione [mm <sup>2</sup> ]	Area rottura a fatica [mm²]	Area rottura statica [mm²]
MCF 003	Nessuno	31.5	12.75	18.75
MCF 006	Primer	31.5	9.75	21.75
MCF 009	Nanotecnologie (corroso)	31.5	13.65	17.85
MCS 012	Nanotecnologie (non corroso)	31.5	21.00	10.50

**Tabella 19:** Aree di rottura dei provini associati alla terza tipologia di ciclo di carico.

Osservando la tabella 19, si può notare come il processo di fatica abbia un impatto maggiore sul provino in alluminio non trattato superficialmente. In questo caso, infatti l'area si configura come terzo valore più alto registrato, ma associato al numero di cicli più basso, come ad identificare una certa facilità di propagazione della fatica nel metallo. Il provino trattato con *Primer* evidenzia già un certo miglioramento invece: l'area di rottura a fatica è considerevolmente inferiore a quella del provino in alluminio non trattato, ma il numero di cicli è superiore. Ciò sottolinea una difficoltà di avanzamento dei processi di fatica all'interno del metallo. Un risultato notevole proviene dai valori registrati per il provino trattato con nanotecnologie e corroso: se confrontato con i risultati degli altri due provini precedenti, si nota come l'area sia maggiore, e di molto rispetto all'MCF 006, ma è associata ad un numero di cicli estremamente più elevato. Per altro l'area associata alla fatica è molto simile per i provini MCF 003 ed MCF 009, ma il secondo vanta circa 13000 cicli in più per giungere a rottura, evidenziando una difficoltà decisamente maggiore nel secondo caso perché la fatica faccia il suo corso. Il provino trattato con nanotecnologie e non corroso ha evidentemente l'area associata alla rottura per fatica maggiore tra tutti, ma anche il numero di cicli considerevolmente più alto rispetto agli altri campioni.

## 10 Terza fase operativa: analisi mediante SEM

La terza fase operativa del processo di studio, cominciato con la realizzazione dei provini necessari e il relativo trattamento superficiale, rappresentativo di trattamenti anticorrosione differenti, ha avuto inizio, una volta terminata la fase dei test meccanici di fatica. In particolare, i provini sono stati sottoposti ad osservazione con un particolare tipo di microscopio, noto come *SEM*, che è l'acronimo di *Scanning Electron Microscope*.



Figura 93: Strumento SEM presente al Politecnico di Torino.

Questa tipologia di microscopio, di cui è presente un modello al *Politecnico di Torino* ed è riportato in figura 93, non utilizza la luce come sorgente di radiazioni che permette di osservare il campione, ma ricorre ad una sorgente elettronica, solitamente individuata in un filamento di tungsteno, il quale emette un fascio di elettroni, una volta eccitato da una corrente elettrica. Gli elettroni emessi vengono concentrati da un insieme di lenti elettromagnetiche ed infine deflessi sul campione da osservare, mediante l'utilizzo di una lente obiettivo. La lente che permette di focalizzare il fascio di elettroni sul campione non ha solo questo compito, bensì anche quello di controllare la deflessione, così da selezionare meglio l'area del campione da osservare. L'ultima lente incontrata dal fascio di elettroni permette di indirizzare quest'ultimo sul campione e, una volta avvenuta l'interazione tra gli elettroni e la superficie del campione stesso, si genera un segnale elettrico, che viene adeguatamente raccolto, amplificato e trattato, così da essere modulato in segnale televisivo. In dettaglio, gli elettroni vengono raccolti da uno speciale rilevatore e convertiti successivamente in impulsi elettrici, i quali vengono inviati in tempo reale ad uno schermo, che permette di avere in output una ricostruzione del campione analizzato. Il risultato finale è una immagine in bianco e nero ad elevatissima risoluzione e profondità di campo. Le immagini che si ottengono sono molto simili a delle fotografie vere e proprie e per tale ragione ciò che si osserva grazie a questo strumento è facilmente ed immediatamente riconducibile a ciò che è la realtà, fatta salva la capacità di chi osserva di passare facilmente dal mondo macroscopico a quello microscopico, portato alla luce dallo strumento.



**Figura 94:** Cristalli di NaCl rilevati sulla superficie di un provino metallico.

Nella figura 94 si possono scorgere i cristalli di NaCl fotografati con il SEM su uno dei campioni metallici analizzati.

### 10.1 Analisi superficiale dei campioni

Durante le fasi preliminari del progetto, pensando a cosa si sarebbe fatto con ciascun provino metallico, si era deciso di realizzare questi con la classica forma ad *osso di cane*, così come presentata dalla normativa di riferimento in materia di test di fatica, con una piccola modifica. Infatti, ciascun provino è stato pensato con una parte aggiuntiva in una delle due estremità, necessaria alla fase di immersione nel bagno corrosivo. Questa parte aggiuntiva si è rivelata essere utile anche per la fase di analisi mediante *SEM*. Terminati i test di sollecitazione meccanica a fatica, ogni provino è stato tagliato con una sega a nastro presso le officine del *Politecnico di Torino*, così da isolare l'iniziale parte aggiunta, rispetto a quanto previsto dalla normativa. Questa sezione effettivamente presentava le stesse caratteristiche superficiali della restante parte del provino, poiché ugualmente sottoposto a corrosione, ma soprattutto poteva essere posizionata all'interno della camera a vuoto del microscopio.



**Figura 95:** Posizionamento dei campioni all'interno della camera a vuoto del SEM.

Ciascun provino è stato dapprima trattato con un getto d'aria compressa, per eliminare qualsiasi impurità presente sulla superficie che potesse inficiare il funzionamento del microscopio o nel caso peggiore danneggiarlo, ed in seguito posizionato sul piatto interno del *SEM*, come si può vedere nella *figura 95*, dopo averne registrato la sua posizione precisa nel software della macchina.

# 10.1.1 Dettaglio fotografico dei campioni MF 000, MCF 002, MCF 005, MCF 008 ed MCF 012

Le analisi condotte al *SEM* sono estremamente dispendiose, sia in termini di tempo che di costi da sostenersi, per mantenere attivo lo strumento. Infatti, passando dalla dimensione macroscopica a quella microscopica non sempre risulta immediato associare ciò che si vede ad occhio nudo con la porzione del campione che si sta osservando al microscopio, soprattutto per occhi inesperti, ed il funzionamento corretto del microscopio richiede che la camera in cui sono posizionati i campioni sia mantenuta in una condizione di vuoto, il che richiede un certo consumo di azoto, oltre alla necessaria corrente elettrica. Per tali ragioni si è deciso di sottoporre allo strumento solo alcuni campioni ricavati dai provini originari ed in particolar quelli con le seguenti sigle:

- MF 000: alluminio grezzo non trattato superficialmente e non corroso.
- MCF 002: alluminio grezzo non trattato superficialmente e corroso.
- MCF 005: alluminio trattato con rivestimento Primer e corroso.
- MCF 008: alluminio trattato con nanotecnologie e corroso.
- MCS 012: alluminio trattato con nanotecnologie e non corroso.

Anche per questa tipologia di analisi la scelta migliore è risultata essere quella di osservare un campione per ciascuna tipologia di rivestimento protettivo, così come fatto per le precedenti prove. L'utilizzo del *SEM* risulta essere anche particolarmente complesso, poiché la risoluzione dell'immagine che si ottiene, e dunque la sua qualità, è il frutto diretto delle scelte dell'operatore in termini di parametri di funzionamento della macchina in sé: ingrandimento, vicinanza del piatto su cui sono presenti i campioni alla lente, energia del fascio... La combinazione di questi parametri determina il risultato.



Figura 96: Schermo output.

Una volta posizionati i campioni nel microscopio, chiusa la camera e realizzato il vuoto, il software comincia a fornire in output ciò che il fascio di elettroni emesso permette di osservare. Sullo schermo, di cui si riporta una fotografia nella *figura 96*, collegato al microscopio si distinguono chiaramente due immagini: quella di sinistra, che mostra, mediante telecamera posta all'interno della camera, il posizionamento relativo tra lente e piatto su cui sono presenti i campioni da analizzare (cerchio rosso nella *figura 96*), e quella di destra, dove vi è la ricostruzione della superficie del campione, a partire dai segnali elettrici convertiti del fascio di elettroni che lo sta investendo. Nell'immagine riportata sopra si possono distinguere ulteriori caratteristiche:

- Nel cerchio giallo sono evidenziati i parametri su cui l'operatore può intervenire per ottenere l'immagine cercata e meglio definirla.
- Nel cerchio verde sono riportate le grandezze caratteristiche selezionate che permettono di ottenere la ricostruzione della superficie del campione (vicinanza del piatto alla lente, ingrandimento, energia...).
- Nel cerchio arancione vi è una rappresentazione schematica del piatto presente all'interno della camera del microscopio, su cui vengono poggiati i campioni, che permette di selezionare l'oggetto su cui indirizzare il fascio di elettroni.

L'analisi dei campioni scelti, che ha richiesto molto tempo e differenti prove, rese possibili solo grazie all'ausilio del tecnico di laboratorio Gianpaolo Serino, ha prodotto i seguenti risultati. Si riportano di seguito le immagini registrate nell'analisi dei due provini appartenenti alla famiglia dell'alluminio grezzo non trattato superficialmente.



Figura 97: Superfici provino MF 000 (A) e provino MCF 002 (B).

Nella fiqura 97 è possibile confrontare immediatamente gli effetti della corrosione sul metallo base, l'alluminio 2024 T3, poiché nella fotografia (A) è presente il provino MF 000, dunque quello non sottoposto al processo di corrosione, mentre nella fotografia (B), troviamo quello sottoposto al processo corrosivo, l'MCF 002. Entrambe le superfici mostrano delle irregolarità dovute al processo di produzione industriale e alle successive operazioni di lavorazione del pezzo, in fase di realizzazione dei provini ad osso di cane, necessari allo svolgimento delle prove di fatica. Queste irregolarità della superficie si esplicano nella presenza di piccoli fori di profondità e diametro differenti, evidenziati all'interno dei cerchi bianchi, ma soprattutto nella presenza di graffi, più o meno marcati, individuabili dalle frecce. Le due immagini sono state ricavate con caratteristiche di funzionamento del microscopio diverse, in particolare energia del fascio e ingrandimento raggiunto. Osservando le due fotografie, risulta semplice comprendere come per l'alluminio grezzo non corroso (immagine (A)), sia stato necessario raggiungere un ingrandimento maggiore, per portare alla luce le irregolarità di cui sopra, mentre le stesse sono già ben visibili ed in numero maggiore, se ci si riferisce alla tipologia dei fori, ad un ingrandimento minore, per l'alluminio grezzo non trattato, ma sottoposto a processo di corrosione (immagine (B)). La facilità con cui si osservano i fori sulla superficie ed il maggior numero di questi, se paragonati al provino non preventivamente corroso, conducono a pensare che certamente l'ambiente corrosivo abbia un impatto notevole sulla superficie libera del metallo, se non viene opportunamente protetta, inficiando necessariamente ed inevitabilmente le proprietà meccaniche del componente. Si riporta in figura 98 la superficie del provino in alluminio protetto con trattamento *Primer*.



Figura 98: Superficie provino MCF 005 (C).

L'analisi di questo provino ha richiesto una scelta iniziale importante: si è deciso di focalizzare il fascio di elettroni in un punto particolare della superficie, cioè dove il trattamento *Primer* risultava visibilmente danneggiato e dunque dove il metallo base risultava essere esposto all'ambiente esterno. Certamente questi piccoli danni, localizzati sul provino e preceduti da ringonfiamenti del trattamento superficiale, sono già indicativi degli effetti della corrosione. Osservando la *figura 98*, dove il metallo è rimasto esposto direttamente all'azione corrosiva della soluzione scelta, si presentano esattamente le stesse irregolarità già osservate per l'alluminio grezzo non trattato e corroso. Sono numerosi i fori, dovuti certamente al processo produttivo del componente, ma anche e soprattutto al fenomeno corrosivo. Anche in questo caso essi sono già ben distinguibili a ingrandimenti relativamente contenuti. Sono presenti anche in questo provino i difetti legati ai processi di lavorazione: graffi e intagli superficiali. Si riporta di seguito in *figura 99* l'ultima famiglia presa in considerazione: trattamento superficiale con nanotecnologie.



Figura 99: Superfici provino MCF 008 (D) e provino MCF 012 (E).

Fatti salvi altri parametri necessari all'ottenimento della migliore risoluzione possibile dell'immagine, entrambe le fotografie sono state realizzate allo stesso ingrandimento. Questo permette di verificare come le tipologie di difetti, fori e intagli superficiali, siano esattamente le stesse trovate negli altri campioni analizzati, ma, prendendo in considerazione solo questi due provini della stessa famiglia di trattamento superficiale, risulta immediato un peggioramento notevole delle condizioni superficiali di quello sottoposto alla corrosione, l'MCF 008 nell'immagine (D). Il peggioramento è da verificarsi nella dimensione dei fori che lo contraddistinguono: essi sono mediamente più grandi, rispetto a quelli che si possono osservare nel campione MCF 012. Il mancato aumento del numero di fori o il limitato aumento di essi (non vi è certezza nell'affermazione), nel provino corroso rispetto a quello non corroso, aspetto osservato nella famiglia dell'alluminio grezzo, porterebbe a concludere in prima analisi che il fenomeno corrosivo abbia avuto impatto nelle porzioni della superficie che già presentavano le irregolarità, andando solo a peggiorarne la condizione esistente, intaccando meno la superficie non ancora danneggiata. In linea generale si può concludere anche qualcosa su quali siano i benefici apportati dalle differenti tipologie di trattamenti superficiali del metallo: se si osservano le figure (B),  $(C) \in (D)$ , rispettivamente appartenenti ai provini MCF 002, MCF 005 ed MCF 008, si nota una certa somiglianza tra il provino non trattato superficialmente e la superficie non più protetta dal *Primer* del provino trattato con quest'ultimo. Le due immagini infatti, mostrano una quantità ed una entità di fori, dovuti alla realizzazione della lastra di metallo ed alla corrosione, molto simile. Questo aspetto evidenzia l'utilità del trattamento *Primer*, che indiscutibilmente protegge il metallo base dall'ambiente esterno, ma, nel momento in cui il danneggiamento comporta una sua eliminazione, espone il metallo a tutti i potenziali rischi del caso. La natura dei fori presenti in superficie, che si sono creati in seguito al processo di corrosione, è facilmente associabile al fenomeno di corrosione che maggiormente colpisce questo tipo di leghe, di cui si è precedentemente parlato, il *pitting* o corrosione alveolare. Analizzando invece, la superficie del provino trattato con nanotecnologie, immagine (D), si può concludere come gli effetti della corrosione siano limitati, se confrontati con quelli che si riscontrano negli altri due casi. Ciò è con molta probabilità legato alla natura atomica del trattamento protettivo che non è limitato ad un semplice strato aggiuntivo, posto sulla superficie del metallo base, ma incide sulla dimensione nanometrica del metallo stesso. Le nanoparticelle del trattamento superficile utilizzato vanno infatti a stanziarsi negli interstizi che vi sono tra gli atomi dell'alluminio, occupando così gli iniziali spazi vuoti.

## 10.2 Analisi mediante *SEM* della sezione di rottura

L'analisi dei campioni metallici con l'ausilio del microscopio a scansione elettronica ha visto una prima parte di studio della superficie dei provini, nella fattispecie di una sezione degli stessi, precedentemente realizzata per poter soddisfare le esigenze della prova di corrosione, ed una seconda parte di studio e analisi della sezione di rottura di ciascun provino. Si è deciso di sottoporre ad analisi solo tre provini, che avevano subito il processo corrosivo e tra questi, in particolare quelli che erano stati oggetto della seconda tipologia di carico per la prova di fatica. Si parla dunque dei seguenti provini: l'MCF 002, per la famiglia dell'alluminio grezzo (figura 100 immagine (A)), l'MCF 005, per la famiglia rappresentativa del trattamento superficiale Primer (figura 100 immagine (B)) e l'MCF 008, per il trattamento superficiale con nanotecnologie (figura 100 immagine (C)).



**Figura 100:** Campioni della sezione di rottura ottenuti dai provini MCF 002 (A), MCF 005 (B) e MCF 008 (C).

Ciascun provino scelto è stato posizionato in una morsa e con una sega per materiali metallici è stata asportata la parte terminale di ciascun troncone, quella più prossima alla sezione di rottura dovuta al test di fatica. Questa operazione si è resa necessaria, poiché nella camera del microscopio non è possibile porre campioni che abbiano un'altezza superiore ai 2 cm. Ciascun campione della sezione di rottura è stato successivamente posizionato sul piatto interno del microscopio, così come viene mostrato in *figura 101*, ed è stato possibile cominciare l'analisi.



Figura 101: Posizionamento dei campioni nel SEM.

#### 10.2.1 Dettaglio fotografico dei campioni MCF 002, MCF 005 ed MCF 008

L'analisi della sezione di rottura è stata pensata nell'ottica di portare alla luce con uno strumento migliore e più affidabile la già ben visibile presenza di due zone ben distinte: quella associata alla propagazione e rottura per sollecitazione a fatica e quella associabile invece alla rottura statica.



**Figura 102:** Area di rottura statica e rottura a fatica del provino MCF 008.

Nella figura 102 riportate sopra è possibile confermare quanto già osservato ad occhio nudo. In particolare, viene riportata la stessa sezione di rottura, quella del provino MCF008, rappresentativo del trattamento superficiale con nanotecnologie: nell'immagine a sinistra c'è il risultato fornito dal microscopio, mentre in quella di destra lo stesso risultato è stato modificato, andando ad individuare due zone, simmetriche rispetto al foro centrale. La zona identificata con il numero 1 è quella associata alla rottura per fatica ed è infatti quella prossima al foro, dove ci si aspettava avesse origine il fenomeno meccanico, mentre la zona identificata con il numero 2 è quella associata alla rottura statica, dove i carichi hanno superato il limite di resistenza della sezione residua. Nella *figura 103* viene riportato l'ingrandimento della area di rottura statica e rottura a fatica del provino *MCF 008*.



**Figura 103:** Ingrandimento dell'area di rottura statica e rottura a fatica del provino MCF 008.

La zona associata alla rottura per fatica presenta già ad occhio nudo un aspetto differente, certamente più lucido, regolare ed omogeneo, dovuto alla presenza delle note *linee di spiaggia*, che caratterizzano il fenomeno della fatica, mentre la parte riconducibile alla rottura fragile è caratterizzata da un aspetto più frastagliato e disomogeneo. Tutto ciò è confermato da quanto è stato possibile osservare al *SEM*. Un'ulteriore conferma del fatto che i provini siano andati incontro ad un processo di fatica e siano giunti a rottura definitiva, risiede nella possibilità di trovare nei campioni analizzati ciò che meglio contraddistingue il fenomeno meccanico, cioè le *bande di scorrimento* o *linee di spiaggia*, che sono messe in evidenza in *figura 104* per i provini  $MCF \ 002$  nell'immagine (A),  $MCF \ 005$  nell'immagine (B) ed  $MCF \ 002$ ,  $MCF \ 005$  ed  $MCF \ 008$  si è andati alla ricerca proprio di queste strutture, ottenendo i seguenti risultati.



**Figura 104:** Bande di scorrimento nei provini MCF 002 (A), MCF 005 (B) ed MCF 008 (C).

Il fenomeno meccanico di cedimento per fatica, come già detto nei capitoli precedenti, ha origine dalla superficie del componente interessato e nella gran parte dei casi da una irregolarità o da un difetto di questa, cosa che provoca una concentrazione delle sollecitazioni. L'applicazione ciclica del carico comporta una deformazione plastica del materiale, attivando il moto delle dislocazioni, che tendono ad accumularsi a bordo grano o sulla superficie stessa del pezzo. La deformazione plastica si localizza lungo piani che condividono l'orientamento cristallografico, dando vita alle cosiddette bande di scorrimento ed alla formazione di un piccolo scalino, definito *intrusione*, cioè un micro intaglio superficiale, oppure una *estrusione*, cioè una micro sporgenza della superficie. Ad ogni ciclo di applicazione del carico la cricca che in genere si propaga in modo transgranulare, tende ad avanzare nel materiale di una certa quantità, definita passo, lasciando dietro sé tracce visibili, chiamate striature. Il processo che vede l'avanzamento e l'arresto della cricca ad ogni ciclo dà origine alle linee di spiaggia, che sono caratteristiche della zona di propagazione della fatica e che infatti, riscontriamo in tutti e tre i provini osservati al SEM. Una ulteriore osservazione può essere fatta sulla direzione che le linee di spiaggia sembrano seguire nel loro avanzamento. Si osservi a tal proposito la figura 105.



**Figura 105:** Direzioni individuate dalle linee di spiaggia nei provini MCF 002 (A), MCF 005 (B) ed MCF 008 (C).

Nella figura 105 è possibile scorgere l'orientamento delle bande di scorrimento individuate in ciascun provino: immagine (A) per il provino MCF 002, immagine (B) per il provino

 $MCF\ 005$  e immagine (C) per il provino  $MCF\ 008$ . Le linee di spiaggia nei differenti provini sembrano seguire tendenzialmente tutte la stessa direzione, all'interno dello stesso provino, e questa direzione generalmente, in un componente sollecitato uniassialmente, come quelli presentati in questo studio, è perpendicolare alla direzione di applicazione del carico. Quanto trovato nelle analisi condotte al *Politecnico di Torino* conferma ciò che ci si aspettava dopo aver condotto una ricerca approfondita in letteratura. L'articolo scientifico *Fatigue crack characterisation in 2024-T351 aluminium alloy through SEM observation combined with the CJP model* degli autori *J.M. Robles, J.M. Vasco-Olmo, A.S. Cruces, F.A. Diaz, M.N. James* e *P. Lopez-Crespo* che ha avuto come fine ultimo quello di valutare le caratterisitche associate alla crescita di una cricca nella lega metallica considerata, espone delle fotografie, ottenute con il *SEM*, che vengono qui riportate:



**Figura 106:** Immagini al SEM della propagazione del fenomeno di fatica nell'alluminio 2024 T351.

Le fotografie, riportate in *figura 106*, evidenziano esattamente quanto riscontrato dalle analisi condotte al microscopio per gli scopi dello studio qui presentato: esattamente come nei campioni in alluminio trattati con diverse tipologie di rivestimento protettivo, si osservano dei vuoti nella superficie del metallo e le classiche *linee di spiaggia*, indicative dell'avvenuto fenomeno di fatica, che sottolineano la direzione di propagazione dello stesso.

# 11 Analisi dei risultati

Le tre fasi operative, in cui è stato suddiviso tutto il processo di studio dei singoli provini, hanno costituito di fatto una lunga operazione di raccolta dei dati necessari per rispondere alla domanda madre che ci si è posti inizialmente e cioè quale fosse il rivestimento protettivo migliore per le componenti metalliche del velivolo *DARDO*, sia in termini estetici, con minore importanza, sia in termini funzionali. In particolare, per quest'ultimo aspetto si è deciso di investigare la resistenza ai carichi di fatica dell'alluminio 2024 T3, lo stesso utilizzato attualmente sul velivolo, dopo averlo sottoposto ad un periodo di corrosione forzata, per simulare l'ambiente operativo del mezzo. In questa sezione riporteremo i dati già presentati nei singoli paragrafi precedenti, ma spostando l'attenzione sul confronto tra le famiglie rappresentative dei rivestimenti protettivi scelti, *Primer* e nanotecnologie, paragonate sempre con i risultati ottenuti per l'alluminio senza alcun rivestimento superficiale e per l'alluminio trattato con nanotecnologie, ma non corroso.

## 11.1 Aspetto superficiale

Il primo risultato importante che può essere utilizzato in fase decisionale per operare una scelta tra i rivestimenti protettivi è sicuramente l'aspetto estetico, mostrato dai singoli provini, una volta sottoposti a bagno corrosivo. I provini infatti, appartenenti alle tre famiglie di rivestimento protettivo, sono stati estratti dal bagno di corrosione, terminato il periodo dedicato ad esso, asciugati, avendo cura di non intaccare i residui di sale sulla superficie di ciascun provino, ed osservati per rilevarne le differenze.



**Figura 107:** Le tre famiglie di provini prima del bagno corrosivo: alluminio grezzo senza trattamento (A), alluminio con rivestimento Primer (B)e alluminio con rivestimento in nanotecnologie (C).



**Figura 108:** Le tre famiglie di provini estratte dal bagno di corrosione: alluminio grezzo senza trattamento (A), alluminio con rivestimento Primer (B) e alluminio con rivestimento in nanotecnologie (C).

Osservando la figura 107 e la figura 108, riportate sopra, dove è possibile scorgere nelle immagini  $(A) \in (D)$  la famiglia costituita dai provini in alluminio grezzo senza alcun rivestimento superficiale, nelle immagini  $(B) \in (E)$  quella costituita dai provini rivestiti con trattamento Primer, e nelle immagini (C) e (F) quella costituita invece dai provini trattati con nanotecnologie, sono evidenti alcune importanti differenze nell'aspetto con cui si sono presentati in seguito al bagno di corrosione. Infatti, tutti i nove provini utilizzati per questa fase hanno variato significativamente il loro aspetto, con una intensità più o meno marcata e che certamente verrà rilevata in seguito. E' da notarsi come l'alluminio grezzo (fiqura 107 immagine (A), figura 108 immagine (D)) e quello trattato con nanotecnologie (figura 107 immagine (C), fiqura 108 immagine (F)) presentino apprezzabili somiglianze: tutti i campioni di queste famiglie hanno perso la loro originaria lucentezza e opacità alla luce, presentando una colorazione più scura, e hanno acquisito una superfcie decisamente meno liscia e scorrevole al tatto. Sono considerevoli e rilevanti le incrostazioni di cloruro di sodio sulla superficie del metallo, rilevabili come tracce di colore bianco. In relazione a quest'ultimo aspetto si potrebbe affermare con una certa cautela che la quantità di sale depositatasi sull'alluminio grezzo senza alcun trattamento protettivo superficiale sia leggeremente superiore, perlomeno a prima vista, rispetto a quello che si può osservare sulla superficie dei provini trattati con nanotecnologie. Il rivestimento protettivo che certamente garantisce risultati migliori dal punto di vista estetico è il Primer (figura 107 immagine (B), figura 108 immagine (E)). Questo ha fatto sì che non ci siano stati cambiamenti notevoli nell'aspetto dei provini, tra la condizione pre bagno corrosivo e post bagno corrosivo. L'unica differenza apprezzabile nell'aspetto dei campioni, rappresentativi di questo rivestimento protettivo, è la presenza di bolle, dovute al rigonfiamento dello strato protettivo stesso, delocalizzate in modo casuale sulla superficie dei provini. Questi rigonfiamenti sono da attribuirsi all'interazione tra la natura chimica del Primer applicato o la più probabile infiltrazione di soluzione salina negli spazi creatisi tra il rivestimento protettivo e la superficie libera del metallo base, dovuti probabilmente ad

una non perfetta applicazione della vernice sui provini utilizzati. Una volta puliti e liberati dalla gran parte delle incrostazioni di sale, formatesi sulla superficie, i provini, osservati al *SEM*, hanno mostrato tutti, anche quelli rivestiti con trattamento *Primer*, dove questo si è sollevato dalla superficie del metallo, le classiche strutture tipiche della *corrosione alveolare*. E' da sottolineare come questa fase di analisi, diversamente da quanto previsto inizialmente, non ha visto la valutazione delle variazioni in massa dei singoli provini per due aspetti chiave del processo operativo che ha caratterizzato lo studio: la pulizia dei singoli provini in seguito al bagno corrosivo dai residui di sale è avvenuta manualmente da parte di un operatore con un semplice panno, non garantendo la perfetta applicazione del processo di pulizia a tutti i campioni, e non vi era disponibilità nell'immediato di una bilancia con una sensibilità tale da poter apprezzare eventuali differenze.

### 11.2 Numero cicli di rottura

Dopo la fase di corrosione dei provini metallici, questi sono stati sottoposti ad un test di fatica per valutare le proprietà meccaniche ed in particolare per valutare quanto il processo corrosivo avesse avuto un impatto sulla durabilità del componente e quanto ciascun rivestimento protettivo fosse stato in grado di preservare il metallo base in questo senso. Per il test di fatica, come già detto nel capitolo precedente dedicato, si è deciso di operare con tre intensità di carico massimo applicato differenti, così da avere una visione d'insieme più ampia in termini di comportamento del metallo. Di seguito si riassumono le tre tipologie di carico utilizzate con i provini assegnati a ciascuna:

- Tipologia di carico 1 (Forza massima applicata = 11000 N): MF 000, MCF 001, MCF 004, MCF 007 e MCS 010.
- Tipologia di carico 2 (Forza massima applicata = 9000 N): MCF 002, MCF 005, MCF 008 e MCS 011.
- Tipologia di carico 3 (Forza massima applicata = 6000 N): *MCF 003, MCF 006, MCF 009* e *MCF 012*.

Al termine di ciascuna prova il numero di cicli che ha portato a rottura il singolo provino coinvolto è stato registrato ed, una volta completate tutte le prove, è stato estratto un primo grafico, che viene di seguito riportato.



**Figura 109:** Confronto dei numeri di cicli necessari alla rottura per famiglia di provini associati alle diverse tipologie di ciclo di carico.

Il grafico riportato in figura 109 raccoglie per ciascuna batteria, corrispondente ad una tipologia di carico massimo applicato specifico, tutti i risultati ottenuti per i provini sottoposti a quel carico di sollecitazione: al colore giallo corrispondono tutti i provini sottoposti alla forza massima di 11000 N, al colore verde quelli soggetti alla forza di 9000 N e il colore blu identifica i provini sottoposti alla forza di 6000 N. Osservando solo i risultati registrati per la prima tipologia di carico, si riscontrano due aspetti fondamentali: il processo di corrosione forzato ha avuto sicuramente un impatto negativo sulle prestazioni meccaniche del metallo ed il risultato più incoraggiante, in termini di rivestimento protettivo, proviene dal trattamento con le nanotecnologie. Infatti, confrontando il numero di cicli necessari alla rottura per il provino MF 000, realizzato in alluminio non trattato superficialmente e non sottoposto a corrosione, con quelli associati alle altre tipologie di provini sottoposti allo stesso carico, si può concludere come esso abbia resistito di più alla sollecitazione meccanica, sopportando addirittura circa 1100 cicli in più rispetto al provino MCF 007, trattato con nanotecnologie, ma corroso. Tra i cinque provini utilizzati per la prima tipologia di carico, i comportamenti più simili, seppur esista una differenza, probabilmente attribuibile ad una base statistica, sono quelli dei provini in alluminio grezzo non trattato, MF 000, e trattato con nanotecnologie, MCS 010, entrambi non corrosi. Considerando solamente quelli sottoposti al processo corrosivo, dunque MCF 001, MCF 004 e MCF 007, il numero di cicli maggiore necessari alla rottura è stato registrato per quest'ultimo, che ha sopportato circa 2000 cicli in più rispetto agli altri due provini, sottoposti allo stesso carico, registrando nel dettaglio un incremento del numero di cicli pari al 48% rispetto all'alluminio grezzo corroso e pari al 44% rispetto al alluminio con rivestimento Primer. Per i campioni metallici, sottoposti alla seconda tipologia di carico, quella con forza massima applicata pari a 9000 N, il risultato ricalca quanto ottenuto per il carico precedente. Osservando solamente i provini sottoposti anche al processo corrosivo, l'MCF 002, l'MCF 005 e l'MCF 008, il primato positivo spetta anche in questo caso al trattamento con le nanotecnologie, che assicura circa 5700 cicli in più, pari al 48% anche in questo caso, rispetto al provino in alluminio grezzo, l'MCF 002, e circa 4100 cicli in più, pari al 35%, rispetto al provino trattato con *Primer*, l'*MCF 005*. Anche in questa famiglia di provini, l'incidenza negativa del processo corrosivo è sottolineata dal risultato ottenuto

per il provino trattato con nanotecnologie non sottoposto a corrosione, l'MCS 011, che ha registrato il numero di cicli maggiore nella seconda tipologia di carico, sopportandone circa 5000 in più rispetto al suo corrispettivo corroso. I provini associati all'ultimo carico scelto, quello con forza massima applicata pari a 6000 N, hanno confermato quanto già osservato per le precedenti tipologie di carico. Tra i campioni sottoposti a corrosione, il primato positivo spetta al trattamento con nanotecnologie, che ha permesso al provino corrispondente, l'MCF 009 di raggiungere circa 13000 cicli, pari al 39% in più rispetto al provino in allumino grezzo, l'MCF 003, e circa 11000 cicli in più, pari al 33%, rispetto al provino trattato con Primer, l'MCF 006. Anche per quest'ultimo caso l'influenza negativa della corrosione sulle proprietà meccaniche del metallo è evidenziata dal notevole risultato ottenuto per il provino non corroso trattato con nanotecnologie: esso ha registrato poco meno di 70000 cicli in più rispetto al suo corrispettivo corroso. Globalmente, analizzando le percentuali riportate sopra per i provini sottoposti a corrosione, che esprimono le differenze in termini di numeri di cicli sopportati, si può concludere in prima approssimazione che il beneficio apportato dal trattamento con nanotecnologie, seppur rimanendo considerevole, vada via via diminuendo con l'aumentare del numero di cicli e dunque a sollecitazioni inferiori. Infatti, confrontando quanto ottenuto nella prima tipologia di carico e quanto ottenuto nell'ultima, la maggiorazione del numero di cicli sopportati dal campione con trattamento in nanotecnologie passa dal 48% al 39%, rispetto all'alluminio grezzo non trattato, e dal 44% al 33%, rispetto all'alluminio trattato con Primer. La stessa cosa non può essere detta per il trattamento Primer, se confrontato con il provino in alluminio grezzo senza alcun trattamento superficiale: rispetto all'alluminio non trattato, quello con rivestimento Primer garantisce una maggiorazione del numero di cicli del 6.62% nella prima tipologia di carico, del 20.83% nella seconda tipologia di carico e del 9.55% nella terza. Quanto osservato evidenzia certamente un miglioramento delle proprietà meccaniche del metallo, rispetto a quanto si verifichi nel caso senza trattamento, ma non è possibile confermare un particolare andamento, in quanto dapprima si apprezza un aumento consistente del numero di cicli, passando dalla prima tipologia di carico alla seconda e poi un incremento più contenuto, passando dalla seconda tipologia di carico alla terza. Altrettanto interessante risulta essere quanto si osserva, se si confrontano i risultati ottenuti nelle diverse tipologie di carico per i soli provini trattati con nanotecnologie. Per ogni carico, infatti il provino non corroso evidenzia ovviamente risultati migliori, ma sempre più incoraggianti via via che diminuisce il carico e ci si sposta verso un alto numero di cicli. Nel primo carico il provino trattato con nanotecnologie e non corroso riporta un incremento del numero di cicli, rispetto a quello sopportato dal provino trattato in ugual modo e non corroso, pari solamente all'1.46%, mentre nella seconda tipologia di carico si sale ad un incremento del 42%, raggiungendo il significativo risultato del 192% per la terza tipologia di carico.

#### 11.2.1 Definizione del $K_t$ teorico e confronto con quello sperimentale

I risultati dei test di fatica, condotti sui singoli provini, identificativi di ciascuna famiglia di rivestimento protettivo, hanno confermato come il processo di corrosione, intaccando più o meno significativamente la struttura del metallo, abbia accelerato il processo di rottura del componente metallico, riducendo significativamente i tempi necessari di sollecitazione meccanica ed il numero di cicli necessari per compromettere l'integrità del provino. Nei

capitoli precedenti è stato trattato il fattore di concentrazione delle sollecitazioni teorico, noto come  $K_t$ , che si ricorda essere definito come il rapporto tra la sollecitazione di picco alla radice dell'intaglio, presente nel componente analizzato, e la sollecitazione nominale che si avrebbe se non si verificasse una concentrazione di sollecitazioni. L'intensità della concentrazione di sollecitazioni dipende dalla geometria della configurazione dell'intaglio, generalmente indicata come forma dell'intaglio. Prima che i test di corrosione in prima battuta ed i test di fatica in seconda battuta cominciassero, certamente ci si aspettava un decadimento delle proprietà meccaniche a fatica dei singoli componenti, come conseguenza negativa e naturale del processo di corrosione stesso. Una volta raccolti i risultati dalle prove di fatica, questo aspetto è stato semplicemente confermato dalle prove sperimentali. E' nata così l'idea di legare il processo corrosivo, e più in particolare gli effetti da esso scaturiti, ad un incremento del fattore di concentrazione delle sollecitazioni  $K_t$ , già artificialmente ritoccato, mediante la realizzazione di un foro nella sezione centrale del provino sottoposta alla prova di fatica. Dal punto di vista teorico si sa che un incremento del fattore di concentrazione *delle sollecitazioni* comporta necessariamente una diminuzione della capacità del materiale di resistere ad una sollecitazione meccanica ciclica e, dunque, ad una diminuzione del numero di cicli necessari per giungere alla rottura definitiva del pezzo. Il primo passo necessario è stato ricercare e trovare una relazione matematica che esprimesse il legame tra il carico applicato al componente, il fattore di concentrazione delle sollecitazioni ed il numero di cicli previsti per la rottura. A tal proposito è stato trovato in letteratura un articolo specifico, A general model for stress-life fatique prediction dell'autore Kassim S.Al-Rubaie, nel quale venivano riportati i risultati ottenuti dalle prove di fatica condotte anche esse su provini metallici, realizzati in alluminio 2024-T3. Lo studio condotto in questo articolo, ha visto anche la realizzazione delle curve S-N, facendo ricorso ad una particolare funzione matematica, che viene qui riportata:

$$log~N = A - B~log \left(K_t^E~S {\left(2 - \frac{2~S_m}{S}\right)}^C - D\right)$$

Nella relazione riportata, sono numerosi i parametri introdotti, che sono stati definiti a livello sperimentale, grazie all'elevato numero di provini testati, e le variabili da introdurre, per cui vengono meglio definiti di seguito:

- N = numero di cicli necessari alla rottura.
- A =parametro stimato pari a 12.81011.
- B =parametro stimato pari a 3.35997.
- $K_t = fattore \ di \ concentrazione \ delle \ sollecitazioni.$
- E =parametro stimato pari a 0.75416.
- S =sforzo ciclico massimo applicato al provino.
- $S_m =$ sforzo ciclico medio.

- C = parametro stimato pari a 0.67782.
- D =parametro stimao pari a 158.9626.

Si è deciso di utilizzare la relazione trovata allo scopo sopraesposto, poichè i test di fatica condotti sui provini in alluminio, di cui si tratta nell'articolo, sono stati molto simili a quelli condotti per l'analisi qui riportata e perché il materiale scelto nello studio preso a riferimento coincide con quello qui utilizzato (alluminio 2024-T3), rendendo ancor più valida l'opzione di mantenere gli stessi parametri ricavati sperimentalmente, elencati sopra. Per ricavare il *fattore di concentrazione delle sollecitazioni* si è proceduto ottenendo la formula inversa necessaria, che si riporta di seguito:

$$K_t = \sqrt[E]{\frac{10^{\frac{A - \log_{10} N}{B}} + D}{S}}$$

Osservando la relazione è facile notare come vi siano alcune semplificazioni, rispetto a quanto ci si sarebbe aspettati dalla formula originaria e questo è dovuto alla caratteristica comune a tutte le tipologie di ciclo di carico utilizzate per le prove di fatica. Infatti, poichè la sollecitazione minima è stata posta essere uguale a zero, si è verificato quanto segue:

$$2S_m = S$$

dunque:

$$S(2 - \frac{2S_m}{S})^c = S$$

Una volta ottenuta la formula inversa per ricavare il fattore di concentrazione delle sollecitazioni  $K_t$ , per ogni famiglia di rivestimento protettivo sono stati presi i risultati delle prove di fatica associati al provino utilizzato per la prima tipologia di carico. Con tali valori, sostiuiti al posto giusto nella formula inversa, si è ricavato il  $K_t$  teorico associato al provino. Trovato il fattore di concentrazione di sollecitazione per ogni famiglia di rivestimento protettivo, utilizzando la relazione originaria, in grado di fornire il numero di cicli necessari alla rottura del componente in funzione del carico applicato, si sono tracciate le seguenti curve con l'ausilio del software MATLAB.



**Figura 110:** Curve teoriche S-N ottenute con il  $K_t$  ricavato dai risultati sperimentali della prima tipologia di ciclo di carico.

Nel grafico di figura 110 sono riportate le curve ottenute con il  $K_t$  ricavato dai risultati sperimentali del primo ciclo di carico e allo stesso tempo i risultati sperimentali ottenuti dai provini scelti per le altre tipologie di carico. Dividendo i tre carichi massimi, caratteristici delle tre tipolgie di prova a fatica (11000 N, 9000 N e 6000 N) per l'area della sezione del provino soggetta al carico stesso, pari a 31.5  $mm^2$ , si ricava lo sforzo massimo per ogni tipologia di carico:

- Tipologia di ciclo di carico 1: 11000 N  $\longrightarrow$  349.206 MPa.
- Tipologia di ciclo dicarico 2: 9000 N $\longrightarrow$  285.714 MPa.
- Tipologia di ciclo di carico 3: 6000 N  $\longrightarrow$  190.476 MPa.

Si osserva come ovviamente i punti che esprimono il numero di cicli di carico necessari alla rottura dei provini utilizzati per la prima tipologia di carico si trovino perfettamente sulle curve rappresentate, che sono quattro, pur riuscendo a distinguerne con precisione solo tre, poiché la curve associate all'alluminio trattato con nanotecnologie, corroso e non corroso, tendono a sovrapporsi avendo fattori di intensificazione delle sollecitazioni molto simili, rispettivamente  $K_t = 2.4735$  e  $K_t = 2.4626$ . Altro aspetto di facile e immediata comprensione risiede nella posizione relativa delle curve: tutte quelle associate ai provini sottoposti a corrosione si posizionano al di sotto di quella associata al provino non corroso, evidenziando ancora una volta come la corrosione abbia un impatto negativo sulla vita a fatica del metallo. Analizzando la seconda famiglia di risultati, quella associata alla seconda tipologia di carico, è evidente come le curve sottostimino la vita a fatica dei componenti, sollecitati con tale carico. Tutti i provini, con valori più o meno marcati, evidenziano un numero di cicli maggiore di quello previsto dalla curva teorica corrispondente. In particolare, i casi più eclatanti, in termini di discostamento, sono da individuarsi nei provini trattati con Primer e con nanotecnologie non corroso, mentre quelli che maggiormente si avvicinano alla previsione sono l'alluminio grezzo non trattato e l'alluminio trattato con nanotecnologie, ma sottoposto a corrosione. Diversamente da quanto osservato per la seconda tipologia di carico, per la terza tipologia le curve teoriche sovrastimano la vita a fatica dei provini ed in alcuni casi anche significativamente. Il risultato più lontano dalla previsione è certamente da ricercarsi nell'alluminio trattato con nanotecnologie e corroso, mentre per l'alluminio grezzo e l'alluminio trattato con Primer i risultati sono vicini alle rispettive previsioni, seppur non perfettamente aderenti. Il caso che meglio rispetta quanto previsto dalla curva teorica è senza dubbio quello dell'alluminio con nanotecnologie non corroso. Con uno sguardo generale a quanto rappresentato dal grafico riportato in figura 110, tenendo a mente che bisognerebbe avere una base statistica, data da un numero di provini analizzati decisamente superiore a quello presentato in questo studio, si può affermare in prima approssimazione che la relazione matematica trovata e dunque la rappresentazione grafica riportata, rispecchia abbastanza verosimilmente quanto provato dai risultati sperimentali. Per meglio apprezzare quanto le singole curve teoriche, tracciate avendo come base per il calcolo del fattore di concentrazione delle sollecitazioni i risultati sperimentali ottenuti dalle prove di fatica condotte con la prima tipolgia di carico, si è deciso di isolare i quattro casi, dedicando ad ognuno un grafico. Di seguito vengono riportati gli stessi.



**Figura 111:** Curve teoriche S-N ottenute con il  $K_t$  della prima tipologia di ciclo di carico dell'alluminio grezzo e dell'alluminio trattato con Primer.

Nei due grafici in *figura 111* sono state isolate le curve teoriche ottenute per i provini in alluminio grezzo non trattato e per i provini in alluminio trattati con *Primer*, rispettivamente a sinistra e a destra. Entrambe le curve hanno origine dal punto più estremo che identifica

con le sue coordinate la sollecitazione massima applicata al provino, quella corrispondente alla forza massima della prima tipologia di carico, e il numero minimo di cicli sopportato. Per il secondo punto, rappresentato sul grafico e identificativo della seconda tipologia di carico utilizzata per le prove di fatica, la curva teorica prevede con una certa accuratezza quanto indicato dal risultato sperimentale nel caso dell'alluminio grezzo, mentre si discosta leggermente nel caso dell'alluminio trattato con *Primer*: infatti, in entrambi i casi la curva sottostima la durata, in termini di numero di cicli, del provino. Il risultato più significativo risiede certamente nella posizione del terzo punto sul grafico, che identifica invece i risultati sperimentali ottenuti per la terza tipologia di carico, quella con forza applicata al provino minima. Entrambe le curve sovrastimano in modo significativo il numero di cicli necessari alla rottura del provino. Si riportano nella *tabella 20* le variazioni dei valori del  $K_t$ , rispetto a quanto previsto dalle singole curve.

Sigla provino	Trattamento superficiale	Tipologia di carico associata	K <sub>t</sub> calcolato	Variazione $\mathbf{k}_t$ rispetto al valore della curva teorica
MCF 001	Nessuno	Carico 1 = 11000 N	3.0347	//
MCF 002	Nessuno	Carico 2 = 9000 N	2.9475	- 2.87 %
MCF 003	Nessuno	Carico 3 = 6000 N	3.5559	+ 17.17 %
MCF 004	Primer	Carico 1 = 11000 N	2.9697	//
MCF 005	Primer	Carico 2 = 9000 N	2.7513	- 7.35 %
MCF 006	Primer	Carico 3 = 6000 N	3.4619	+ 16.57 %

**Tabella 20:** Variazioni effettive del  $K_t$  rispetto a quanto previsto dalla curva teorica per l'alluminio grezzo e quello trattato con Primer.

Osservando le variazioni percentuali per i provini rappresentativi della famiglia senza alcun rivestimento protettivo, viene confermato quanto già detto: il risultato sperimentale della prova di fatica condotta con il carico massimo pari a 9000 N, evidenzia un'apparente diminuzione del fattore di concentrazione delle sollecitazioni, seppur contenuto, mentre per il carico della terza tipologia vi è un incremento notevole, pari al 17.17%. Lo stesso andamento si verifica per i provini trattati con *Primer*, anche se in questo caso, la variazione in negativo del  $K_t$ , calcolato per il provino utilizzato nella seconda tipologia di carico, è decisamente più marcata, rispetto a quanto osservato per il caso dell'alluminio grezzo. Si riportano ora i grafici in *figura 112* delle singole curve ottenute per i casi dell'alluminio trattato con nanotecnologie e sottoposto a corrosione e quello trattato allo stesso modo, ma non sottoposto a corrosione.



**Figura 112:** Curve teoriche S-N dell'alluminio trattato con nanotecnologie corroso e non corroso.

Anche in questi due casi, come già osservato in precedenza, le due curve hanno origine dal punto nel piano che identifica il numero di cicli e lo sforzo massimo applicato, caratteristico del primo provino utilizzato per quella data famiglia di rivestimento, sottoposto al primo ciclo di carico. Il secondo punto rappresenta il risultato sperimentale registrato per la seconda tipologia di carico ed evidenzia una certa aderenza della curva teorica al dato stesso, per quanto riguarda il caso del provino trattato con nanotecnologie e sottoposto a corrosione, mentre vi è una certa discordanza per il caso del campione trattato allo stesso modo, ma non sottoposto al processo corrosivo. La situazione appena esposta subisce invece un ribaltamento per l'ultima tipologia di carico applicata: la curva non rispecchia perfettamente il risultato sperimentale avuto per il caso del provino sottoposto a corrosione, mentre per il caso del campione non corroso la curva passa, con un certo grado di accuratezza, dal punto che identifica il risultato sperimentale ad esso associato. Si può affermare con le dovute cautele del caso che la curva dell'alluminio trattato con nanotecnologie e sottoposto a corrosione in un primo momento sottostimi lievemente la vita a fatica del componente, per poi sovrastiamarla con un certo errore, mentre la curva associata al caso dei provini trattati allo stesso modo, ma non corrosi, inizialmente sottostimi con un marcato errore il numero di cicli necessari alla rottura del componente, per poi sottostimare lo stesso valore con un errore decisamente più lieve. Si riporta di seguito la tabella 21 che riassume le variazioni percentuali dei singoli  $K_t$ , rispetto a quello teorico iniziale.

Sigla provino	Trattamento superficiale	Tipologia di carico associata	Kt calcolato	Variazione $\mathbf{k}_t$ rispetto al valore della curva teorica
MCF 007	Nanotecnologie corroso	Carico 1 = 11000 N	2.4735	//
MCF 008	Nanotecnologie corroso	Carico 2 = 9000 N	2.4289	- 1.80 %
MCF 009	Nanotecnologie corroso	Carico 3 = 6000 N	3.1187	+ 26.08 %
MCS 010	Nanotecnologie non corroso	Carico 1 = 11000 N	2.4626	//
MCS 011	Nanotecnologie non corroso	Carico 2 = 9000 N	2.2043	- 10.49 %
MCS 012	Nanotecnologie non corroso	Carico 3 = 6000 N	2.4114	- 2.08 %

**Tabella 21:** Variazioni effettive del  $K_t$  rispetto a quanto previsto dalla curva teorica per l'alluminio trattato con nanotecnologie corroso e non corroso.

Quanto detto trova conferma nei valori dei fattori di concentrazione delle sollecitazioni, calcolati per ciascun dato sperimentale. Si osserva infatti che, rispetto al valore teorico iniziale, ottenuto dal risultato sperimentale del provino scelto per la prima tipologia di carico, per il secondo caso dell'alluminio trattato con nanotecnologie e corroso vi è una diminuzione del fattore pari solo all'1.80%, infatti la curva è molto vicina al punto, mentre per il terzo caso il  $K_t$  subisce un notevole incremento, pari al 26.08%, confermando il fatto che la curva sia ben distante dal punto nel grafico. La curva che rappresenta il comportamento a fatica della famiglia di provini trattati con nanotecnologie, ma non corrosi, tende a sottostimare sempre il numero di cicli necessari alla rottura del provino. Infatti, per la seconda tipologia di carico la variazione del fattore di concentrazione delle sollecitazioni è pari a -10.49% e nel terzo è pari a -2.08%. Tuttavia, seppur i dati confermino per tutti i casi una non perfetta aderenza della curva matematica ai dati ottenuti sperimentalmente, si può comunque concludere che il modello abbia un grado di validità buono, poiché il numero di provini utilizzati per questo studio è certamente limitato, rispetto a quanto sarebbe stato necessario, e non permette di fare una valutazione statistica dei risultati. Si è visto come l'equazione che mette in relazione il numero di cicli necessari alla rottura con il fattore di concentrazione delle sollecitazioni del modello matematico trattato sopra abbia un buon grado di aderenza ai risultati sperimentali. E' possibile comunque, partendo dagli stessi risultati delle prove meccaniche di fatica, tracciare altre tre curve rappresentative. Si riporta di seguito quanto verrà spiegato a breve.



**Figura 113:** Curve di regressione lineare ottenute dai risultati sperimentali delle prove meccaniche di fatica.

Nella *figura 113* sono state tracciate le curve di regressione lineare a partire dai risultati sperimentali, registrati durante le prove meccaniche di fatica. Osservando il grafico in *figura 113*, sembrerebbe che manchino i punti identificativi dei dati sperimentali relativi al caso del trattamento *Primer* e del trattamento con nanotecnologie dei provini non corrosi sottoposti alla prima tipologia di carico. Si riporta per tanto un ingrandimento della sezione superiore del grafico.



**Figura 114:** Ingrandimento della sezione superiore del grafico con le curve di regressione lineare.

In figura 114 è possibile vedere come i dati sperimentali per la prima tipologia di ciclo di carico siano tutti presenti, ma risulta difficile distinguerli a causa della vicinanza dei valori che essi rappresentano. Certamente è da sottolineare come le rette in figura 113 siano frutto di una scarsità di dati dai quali hanno origine: ogni retta è stata tracciata sulla base di soli tre punti nel piano, che in alcuni casi evidenziano una dispersione significativa, come per i provini trattati con nanotecnologie non corrosi. Delle tre rette infatti, è possibile definire il coefficiente di correlazione R, noto come coefficiente di correlazione di Pearson, che dà espressione della relazione di linearità tra due variabili e, secondo l'equazione di Cauchy-Schwarz, è costituito da un valore che appartiene all'intervallo [-1,+1]. In particolare, tanto più il coefficiente si avvicina al valore estremo dell'intervallo, tanto più la correlazione è perfetta. Il segno "-" indica una correlazione negativa, mentre il segno "+", identifica una correlazione positiva. Per la retta associata al trattamento con nanotecnologie dei provini non corrosi si ha il coefficiente più lontano in modulo dal valore 1: vale infatti  $R^2 = 0.9174$ , evidenziando una maggiore dispersione dei risultati. Per le rette associate all'alluminio grezzo, al trattamento Primer e al trattamento con nanotecnologie dei provini corrosi, si hanno rispettivamente  $R^2 = 0.9538, R^2 = 0.9731 \text{ e } R^2 = 0.9708$ . Le tre rette si distinguono eveidentemente per la loro pendenza caratteristica: quelle con pendenza minore sono certamente quelle associate al trattamento con nanotecnologie, e di queste il primato spetta ai provini non corrosi, mentre

quelle con pendenza maggiore sono quelle associate al trattamento Primer e all'alluminio grezzo senza trattamento. Di queste ultime due il valore massimo di pendenza spetta all'alluminio grezzo, seppur le due rette siano quasi parallele. E' facile comprendere come la pendenza delle rette sia direttamente legata all'influenza della corrosione sulla durata a fatica dei singoli componenti: tanto più è consistente l'angolo formato dalla retta con l'asse delle ascisse, e quindi minore la pendenza, tanto meno la corrosione ha influenzato il comportamento meccanico del metallo. Tutto ciò è osservabile, se si prendessero a riferimento due valori di stress applicati, prima su una retta e poi su un'altra, e si guardassero i valori del numero di cicli ad essi associati. Uno stesso intervallo di stress, compreso tra i due valori scelti, sarebbe legato ad un intervallo, e quindi incremento, del numero di cicli diverso sulle due rette: minore è la pendenza, maggiore è l'incremento del numero di cicli, passando da un valore di stress applicato all'altro, rimanendo sulla stessa retta. La pendenza minore, riscontrabile sul grafico, è quella associata al trattamento con nanotecnologie dei provini non corrosi, sui quali è già stato messo precedentemente in luce come la corrosione abbia avuto l'impatto meno significativo, soprattutto se confrontata con la retta dell'alluminio grezzo, che presenta la pendenza maggiore in assoluto, associata invece all'impatto più consistente della corrosione sul comportamento del metallo. Un valore prossimo a quello dell'alluminio grezzo in termini di pendenza è associato al trattamento Primer e questo evidenzia un impatto della corrosione simile. Tuttavia, a rigore la pendenza per il caso del trattamento Primer è leggermente inferiore a quella dell'alluminio grezzo, identificando una suscettibilità alla corrosione leggermente meno importante, come osservato già in precedenza. Infine, un valore intermedio di pendenza tra quelli commentati precedentemente è associato al caso dei provini trattati con nanotecnologie, ma sottoposti a corrosione: il valore è certamente più vicino a quello delle rette dell'alluminio grezzo e del trattamento con *Primer*, poiché appartenente al gruppo delle famiglie di trattamenti protettivi testati prima a corrosione, rispetto a quanto non sia, se confrontato con quello della retta associata al trattamento con nanotecnologie dei provini non corrosi. Tuttavia, osservando le rette associate alle sole famiglie dei trattamenti testati a corrosione, si può dedurre anche con questa tipologia di analisi che l'applicazione delle nanotecnologie garantisce i migliori risultati, infatti la retta ha la pendenza minima.

# 11.2.2 Definizione del $K_t$ con la *relazione di Heywood* e confronto con quello sperimentale

In fase preliminare è stato possibile definire il *fattore di intensificazione degli sforzi* di ciascun provino, mediante una semplice relazione, nota come *equazione di Heywood*:

$$K_t = 2 + (1 - d/W)^3$$

dove il termine d rappresenta il diametro del foro centrale, che nel caso dei provini analizzati per questo studio è pari a 2 mm, e il termine W corrisponde alla dimensione della sezione trasversale del provino nella zona, in cui è prevista la rottura dello stesso, che nel caso in esame vale 12.5 mm. Sostitutendo i dati appena riassunti nella *relazione di Heywood* si
ottiene un  $K_t = 2.5927$ . L'equazione riassume il comportamento della curva, rappresentata nel manuale *Stress Concentration Factors* di *John Wiley and Sons*, basata a sua volta sui calcoli effettuati da *Howland*.



**Figura 115:** Curva rappresentativa del  $K_t$  per un componente con foro centrale.

Se nel grafico di figura 115 si legge il valore del fattore di concentrazione delle sollecitazioni in corrispondenza del rapporto sull'asse x, che esprime il caso in esame per i provini qui utilizzati, si ottiene un  $K_t = 2.6$  circa. Il risultato non deve stupire, poiché, come affermato sopra, la relazione di Heywood, esprime l'andamento della curva, per cui i risultati sono estremamente simili. E' possibile dunque riportare quanto ottenuto con la teoria di Heywood nel grafico di figura 110 in cui vi sono le altre curve S-N, ottenute dai risultati sperimentali per i provini utilizzati per la prima tipologia di carico.



**Figura 116:** Curve teoriche S-N, ottenute con i  $K_t$  ricavati dai dati sperimentali della prima tipologia di ciclo di carico, a confronto con la curva S-N, ottenuta con il  $K_t$  ricavato dall'equazione di Heywood.

Osservando il grafico in figura 116, si nota la presenza di una curva in più, con colorazione verde corrispondente ad un  $K_t$  di 2.5927, rispetto a quelle presenti nello stesso grafico della sezione precedente. Questa curva ovviamente non ha origine da alcun dato sperimentale, poichè è stata ottenuta con la stessa relazione matematica delle altre, che esprime il numero di cicli in funzione del fattore di intensificazione delle sollecitazioni, ma ha come  $K_t$  quello ottenuto dalla relazione di Heywood. Analizzando quanto riportato, si scorge come la curva non passi per nessun punto rappresentato sul piano, che evidenzia un particolare risultato sperimentale delle prove di fatica, e questo sottolinea come il risultato puramente teorico, ricavato dall'equazione di Heywood, non tenga conto di altri fattori che possono influenzare il valore del  $K_t$  del singolo componente, se non quello strettamente legato alla sua geometria. Effettivamente, nell'equazione sono presenti esclusivamente parametri dimensionali riconducibili alla geometria del pezzo. La nuova curva non è poi così lontana da quelle che si sono ricavate per i provini trattati con nanotecnologie e questo potrebbe evidenziare un miglioramento del comportamento del metallo a fatica, quando trattato con nanotecnologie: entrambe le curve dei provini trattati con queste ultime infatti, presentano un  $K_t$  minore, seppur i campioni siano stati sottoposti a corrosione. Il restante trattamento protettivo, quello con *Primer* invece, ha una curva che si staglia al di sotto di quella teorica, ottenuta con

l'*equazione di Heywood*, e questo può significare un peggioramento della capacità di resistere a fatica, una volta sottoposto a corrosione. La stessa osservazione può essere fatta sulla curva rappresentativa dell'alluminio privo di trattamento protettivo.

#### 11.2.3 Definizione del $K_t$ con modello FEM e confronto con quello sperimentale

Nella fase preliminare di realizzazione dei singoli provini in alluminio, l'esigenza di ridurre i costi operativi, legati all'utilizzo delle apparecchiature messe a disposizione dal *Politecnico di Torino*, e di limitare la durata delle prove meccaniche aveva portato alla decisione di introdurre artificialmente un *fattore di intensificazione degli sforzi* diverso da uno, attraverso la realizzazione di un foro centrale nella sezione di ciascun campione, dove ci si aspettava esso si sarebbe rotto. La scelta era ricaduta su un foro con diametro pari a 2 mm. L'analisi condotta con il software *PATRAN/NASTRAN* sul modello *FEM* nell'ottica di definire l'intensità delle sollecitazioni meccaniche nei pressi del foro ha portato in evidenza un *fattore di concentrazione degli sforzi* per il foro di 2 mm pari a 2.27. Per gli altri due casi studiati, il modello con foro centrale pari a 4 mm di diametro e 6 mm, si sono ottenuti rispettivamente un  $K_t = 2.54$  ed un  $K_t = 3.10$ . I risultati ottenuti dal modello *FEM* sono stati utilizzati per ricavare le curve teoriche *S-N*, sostituendo ciascun *fattore di intensificazione degli sforzi* nella formula già presentata precedentemente, potendo così osservare alcuni importanti aspetti nel seguente grafico (*figura 117*).



**Figura 117:** Curve teoriche S-N, ottenute con i  $K_t$  ricavati dai dati sperimentali della prima tipologia di ciclo di carico e dall'equazione di Heywood, a confronto con le curve S-N, ottenute con i  $K_t$ , ricavati dai modelli FEM.

Nel grafico di fiqura 117 si ritrovano tutte le curve precedentemente tracciate, ma sono state aggiunte proprio quelle corrispondenti ai tre valori di  $K_t$ , ottenuti per i tre modelli *FEM*, in cui la sola differenza risiedeva nella dimensione del foro centrale realizzato. Risulta banale osservare che, tra quelle tre aggiunte in questo grafico, la curva più vicina all'intersezione degli assi corrisponde al fattore di intensificazione degli sforzi più elevato, comportando un minor numero di cicli a parità di sollecitazione meccanica, dunque al  $K_t$  pari a 3.10, ottenuto per il foro con diametro di 6 mm. Osservando la posizione del primo gruppo di punti, quello in alto a sinistra nel grafico, che identifica il set di provini scelti per la prima tipologia di ciclo di carico, si nota facilmente come questi non risiedano su alcuna curva definita con i tre valori di  $K_t$  ricavati dai modelli *FEM*. Infatti, tutti i risultati sperimentali delle prove meccaniche con ciclo di carico avente forza massima pari a 11000 N, si trovano al di sotto della curva realizzata con  $K_t = 2.27$ , cioè quella corrispondente alla geometria di provino scelta, quella con diametro del foro centrale di 2 mm. Questo particolare posizionamento dei risultati evidenzia come la corrosione abbia notevolmente influito sulla resistenza meccanica dei componenti, limitando il numero di cicli necessari alla rottura, previsto con la sola considerazione della geometria del provino. La limitazione di cui detto è particolarmente importante per i casi dell'alluminio grezzo e trattato con rivestimento Primer: per questi provini infatti, i risultati sperimentali si avvicinano molto alla curva del  $K_t = 3.10$ , associata ad un provino con foro di diametro pari a 6 mm, quasi a sottolineare un aumento del 36.56% del fattore di intensificazione degli sforzi, dovuto proprio al processo corrosivo forzato. Anche per i risultati delle prove meccaniche di fatica con la seconda e terza tipologia di carico la curva tracciata avendo come  $K_t$  quello definito con la modellazione FEM non predice con accuratezza il comportamento dei campioni, se non in un caso. Infatti, l'aspetto interessante da rilevare, è che la curva con  $K_t = 2.27$ , associata al foro di diametro pari a 2 mm, si avvicina molto più al risultato sperimentale del provino trattato con nanotecnologie non corroso di quanto faccia la curva teorica associata a questa famiglia di campioni, ottenuta con il numero di cicli registrato per il primo provino della stessa famiglia. Il terzo valore sperimentale, rappresentato dall'ultimo pallino rosso in basso a destra nel grafico, si avvicina nuovamente alla curva teorica definita per la sua famiglia, quasi ad evidenziare come la corrosione abbia comportato un aumento del fattore di intensificazione degli sforzi dal valore di  $K_t = 2.27$  al valore di  $K_t = 2.4735$ . Anche la curva associata al foro di diametro pari a 6 mm vanta una caratteristica simile: essa predice molto meglio il numero di cicli a rottura per il provino trattato con nanotecnologie sottoposto a corrosione e utilizzato per la terza tipologia di ciclo di carico, di quanto faccia la curva teorica rappresentativa di questa famiglia di campioni analizzati. L'ultimo punto blu in basso al centro del grafico infatti, si trova quasi sulla curva che ha come  $K_t$  quello del modello FEM del provino con foro pari a 6 mm. Questo evidenzia come il processo corrosivo comporti un incremento notevole del fattore di intensificazione degli sforzi per i provini trattati con nanotecnologie e corrosi e sottoposti a basse sollecitazioni, facendolo passare da un valore prossimo a 2.4626 a quello di 3.10.

### 11.3 Aree di rottura a fatica e di rottura statica

Nel capitolo dedicato si è detto come sia stata eseguita un'analisi rapida e qualitativa su tutti i provini che sono stati sottoposti al test meccanico di fatica. Questo tipo di analisi ha previsto l'osservazione della sezione di rottura di ciascun provino nell'ottica di identificare l'area della stessa associabile alla rottura per fatica e quella associabile alla rottura statica, subentrata una volta che la sezione residua del campione non è stata più in grado di sopportare la sollecitazione meccanica applicata. Quanto fatto è stato definito precedentemente come analisi qualitativa, poiché per condurla sono stati utilizzati una semplice lente di ingrandimento ed un calibro. Le sezioni associate al processo di fatica presentavano forme riconducibili a triangoli e rettangoli, dunque, per tale ragione, è stato semplice, considerando tutte le approssimazioni del caso, calcolare le aree di cui sopra con le note formule geometriche. Di seguito si riporta un grafico che riassume ed evidenzia quanto trovato.



**Figura 118:** Confronto delle aree di rottura a fatica e statica per ciascun provino, raggruppato con quelli associati alla stessa tipologia di ciclo di carico.

Nel grafico di fiqura 118 è possibile osservare per ciascun provino sottoposto a test meccanico e successivamente all'osservazione della sezione di rottura, l'entità dell'area associata alla rottura per fatica e quella associata alla rottura statica. La prima osservazione importante, che di fatto non fa altro che confermare quanto ci si aspetterebbe da un punto di vista teorico e quanto già detto nell'analisi del numero di cicli di rottura registrato per ciascun provino, è che l'area della sezione di rottura riconducibile al fenomeno di fatica è tanto più rilevante quanto il provino considerato è sottoposto ad una sollecitazione inferiore: un carico meccanico più basso si traduce in un numero di cicli più elevato, dunque ad un'area di rottura per fatica maggiore. Infatti, le colonne di colorazione gialla, che identificano quest'area, hanno un andamento generalmente crescente per ogni gruppo sottoposto ad un carico specifico, rispetto al gruppo precedente, che è stato sottoposto ad un carico maggiore. Ovviamente, tanto più è importante in termini dimensionali l'area per fatica, tanto meno lo sarà quella associata alla rottura statica: è ben visibile come, se da una parte le colonne gialle tendono a crescere, dall'altra quelle blu tendono a diminuire. Il grafico evidenzia anche quanto già osservato precedentemente: in ogni gruppo di provini scelti per una tipologia di carico, quello che meglio resiste alla sollecitazione meccanica è sempre quello rappresentativo del rivestimento protettivo in nanotecnologie. Si possono evidenziare altri aspetti, se si isolano le famiglie di rivestimento protettivo differenti, come viene fatto nel grafico seguente.



**Figura 119:** Confronto delle aree di rottura a fatica e statica per ciascun provino, raggruppato con quelli appartenenti alla stessa tipologia di rivestimento protettivo.

Nel grafico di figura 119 sono state isolate le tre famiglie di rivestimento protettivo, tenendo sempre a mente che vi sono due gruppi in più: rispettivamente quello costituito dal solo provino  $MF \ 000$ , realizzato in alluminio grezzo non trattato superficialmente e non sottoposto a corrosione, e quello costituito dai provini con rivestimento in nanotecnologie non sottoposti a corrosione,  $MCS \ 010$ ,  $MCS \ 011$  ed  $MCS \ 012$ . L'andamento crescente delle aree associate ai singoli provini di ogni famiglia, sottoposti a carichi sempre più bassi, è qui meglio evidenziato, cosiccome quello discendente delle aree associate alla rottura statica.

## 12 Conclusioni

Lo scopo dell'analisi condotta, attraverso le prove di corrosione e quelle meccaniche di fatica. è stato fin da subito quello di dimostrare quanto un processo di corrosione potesse intaccare il metallo utilizato sul velivolo DARDO, sia da un punto di vista estetico che da un punto di vista delle proprietà meccaniche, e soprattutto ricercare la soluzione migliore in termini di protezione dello stesso dalle conseguenze inevitabili del fenomeno naturale considerato. Quanto ci si aspettava, poiché sotto gli occhi di tutti e comprovato da anni di vita operativa del velivolo, è stato confermato ampiamente dai risultati sperimentali: la corrosione comporta degli effetti negativi sia sulla superficie dei componenti realizzati in alluminio che sulle caratteristiche meccaniche del metallo. Entrambi i rivestimenti protettivi non hanno fatto sì che il componente rimanesse nelle sue condizioni originarie che lo caratterizzavano prima del bagno corrosivo, dopo essere stato sottoposto ad esso: i provini trattati con Primer hanno mostrato dei rigonfiamenti della vernice apposta ed in alcuni punti questa non era addirittura più presente, mentre i campioni trattati con nanotecnologie presentavano un aspetto decisamente meno lucente e meno scorrevole al tatto, molto simile all'aspetto mostrato dai provini non trattati in alcun modo. Tutti i provini sottoposti a corrosione hanno mostrato in maniera più o meno marcata i segni del *Pitting* superficiale: essi sono risultati tuttavia, più consistenti in dimensioni e numero nel caso dell'alluminio grezzo e del trattamento *Primer*, dove questo si è sollevato dalla superficie metallica. La *corrosione alveolare* si è verificata anche nel caso dell'alluminio trattato con nanotecnologie, ma con caratteristiche a prima vista decisamente più limitate rispetto a quanto verificatosi negli altri due casi. L'impatto negativo sulle proprietà meccaniche è stato ampiamente dimostrato dalla vita a fatica dei componenti, in particolar modo se si confrontano i risultati ottenuti per tutti i campioni sottoposti alla prima tipologia di carico, che evidenziano come il provino in alluminio grezzo non trattato e non sottoposto a corrosione, l'MF 000, abbia fatto registrare il numero di cicli maggiore rispetto agli altri. Tuttavia, gli stessi risultati ottenuti nelle prove meccaniche hanno dimostrato come per ogni tipologia di carico, tra i provini sottoposti al processo di corrosione forzato, quelli trattati superficialmente in precedenza con nanotecnologie si sono comportati decisamente meglio, assicurando un incremento notevole del numero di cicli necessari alla rottura a parità di carico di sollecitazione considerato. L'incremento è sempre stato superiore al 30%: per la prima tipologia di carico infatti, si è registrato un incremento del numero di cicli pari al 48% rispetto all'alluminio non trattato e pari al 44% rispetto a quello con trattamento Primer, per la seconda tipologia di carico vi è stato un incremento rispettivamente del 48% e del 35%. mentre per l'ultima tipologia di carico gli incrementi sono stati del 39% rispetto all'alluminio non trattato e del 33% rispetto a quello con trattamento Primer. Non è stato possibile dare una spiegazione dettagliata del perché si verifichi questo incremento, ma si può provare ad individuare una motivazione valida: le nanoparticelle tendono per loro natura dimensionale ad occupare gli spazi lasciati vuoti presenti tra gli atomi del metallo base, l'alluminio, e questo potrebbe comportare una necessaria quanto costante variazione della direzione di propagazione della cricca all'interno del materiale, richiedendo maggiore tempo e maggiore energia, perché il fenomeno si sviluppi e raggiunga il suo risultato finale. Gli aspetti considerati in questo studio sono stati due: quello estetico e quello meccanico. Certamente, se si volesse operare una scelta sulla gerarchia tra i due, non vi sarebbe alcun dubbio sul concedere

il primo posto per importanza alla possibilità di mantenere quanto più possibile inalterate le proprietà meccaniche. Da questo punto di vista le analisi hanno decretato un possibile vincitore: il rivestimento con nanotecnologie risulta essere quello più adatto, poiché garantisce una vita a fatica del componente più lunga, se confrontato con l'attuale rivestimento utilizzato sul velivolo *DARDO*, costituito dal *Primer*. A rigore è necessario però sottolineare ancora una volta il limite intrinseco di questa affermazione: la risposta finale alla domanda originaria, quale potesse essere la soluzione migliore per proteggere il metallo con cui vengono realizzati i componenti del velivolo, è legata al numero di provini analizzati durante tutto lo studio condotto, che certamente è limitato e sufficiente solo a dare una risposta iniziale e parziale all'importante quesito. Rispondere con più accuratezza alla domanda richiederebbe una base statistica, data dalla possibilità di testare un numero di campioni metallici ben più considerevole e magari, per non operare una scelta sulla gerarchia degli aspetti coinvolti, estetico e funzionale, considerare anche l'ipotesi di applicare sullo stesso provino il trattamento con vernice *Primer* e quello con nanotecnologie, andando a coniugare i benefici degli stessi e creando così una nuova famiglia di rivestimento protettivo.

# 13 Bibliografia

- Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Sistemi di gestione per la qualità e Requisiti per le organizzazioni dell'aeronautica, dello spazio e della difesa, UNI EN ISO 9100:2018, 19 Luglio 2018.

- Jaap Schijve, Fatigue of Structures and Materials, Luwer Academic Publishers, Marzo 2001.

- Heywood, R.B., *Designing against fatigue*. Chapman and Hall, Londra 1962.

- E. McCafferty, Introduction to Corrosion Science. Springer, 2010.

- G.H. Koch, M.P.H. Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani, J.H. Payer, *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States*. Mater. Perform., 42 (Supplement), 3, Luglio 2002.

- L.H. Bennet, J. Kruger, R.I. Parker, E. Passiglia, C. Reimann, A.W. Ruff, H. Yakowitz, E.B. Berman, *Economic Effect of Metallic Corrosion in the United States*. National Bureau of Standards Special Publication 511, Washington, DC, 1978.

- HILTI Corporation, Manuale sulla corrosione, Ottobre 2015.

- Roberge P.R., Handbook of Corrosion Engineering. McGrawHill, 2012.

- Kaesche H., Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems. Springer, 2003.

- Fontana M., *Corrosion Engineering*, 3rd edition, McGraw Hill International Edition, New York, 1987.

- C.C. Dell'Aquila, P., *Le nanotecnologie per il rafforzamento della difesa*. Tesi individuale, Centro alti studi per la difesa, Istituto superiore di stato maggiore interforze, 2022.

- T.V De Cicco, S., Nanotecnologie: una tecnologia innovativa che potrbbe stravolgere le applicazioni in ambito militare. Punto di situazione, sviluppi e possibili applicazioni. Tesi individuale, Istituto di studi militari marittimi, 2021.

- National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report: In-flight loss of propeller blade, forced landing, and collision with terrain, Atlantic Southeast Airlines, Inc., Flight 529, Embraer EMB-120RT, N256AS, Carrollton, Georgia, August 21, 1995, NTSB/AAR-96/06, 26 Novembre 1996.

- Jinu M., Josny J., Soney C.G., *Potential applications of nanotechnology in transportation:* A review, Journal of King Saud University - Science 31 (2019) 596-594, 2018.

- Khanna A.S., *Nanotechnology in High Performance Paint Coatings*, Asian J.Exp.Sci., Vol.21, No.2, 2008; 25-32, 2008.

- Asmatalu R., Claus R.O., Mecham J.B., Corcoran S.G., *Nanotechnology associated coatings* for aircrafts, Material Science, Vol.43, No.3, 2007.

- Elisabetta Borsella, *NANOSCIENZE E NANOTECNOLOGIE, Dalla ricerca alle applicazioni*, Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, 2008.

- Atzori B., Meneghetti G., Rossi B., *Resistenza a fatica di strutture in leghe di alluminio: normative a confronto e verifica sperimentale*, B.Atzori et alii, Frattura ed Integrità Strutturale, 9 (2009) 33-45, 2009.

- International Organization for Standardization, Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation, EN ISO 9223:2012, 01 Febbraio 2012.

- American Society for Testing and Materials, *Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*, ASTM G31-21, Febbraio 2021.

- American Society for Testing and Materials, *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, ASTM E466-21, Luglio 2021.

- American Society for Testing and Materials, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8/E8M-21, Febbraio 2021.

- Al-Rubaie K.S., *A general model for stress-life fatigue prediction*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2008.

- Robles J.M., Vasco-Olmo J.M., Cruces A.S., Diaz F.A., James M.N., Lopez-Crespo P., *Fati-gue crack characterisation in 2024-T351 aluminium alloy through SEM observation combined with the CJP model*, International Journal of Fatigue 166 (2023) 107279, 2022.

- Haipeng S., Changchun L., Hao Z., Sean B.L., A DIC-Based Study on Fatigue Damage Evolution in Pre-Corroded Aluminum Alloy 2024-T4, Materials, 2018.

- Van der Walde K., Hillberry B.M., *Initiation and shape development of corrosion-nucleated fatigue cracking*, International Journal of fatigue 29 (2007) 1269-1281, 2006.

- Garcia E., Stewart C.M, Sress Corrosion Cracking in Generic Aluminium Foil under 3.5% NaCl Solution, Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2016.

# 14 Ringraziamenti

Giunti al termine di questo elaborato, non posso che concludere il tutto, esprimendo i miei più sinceri ringraziamenti ed il mio più profondo affetto per chi ha contribuito più o meno significativamente alle attività che hanno costituito questo lungo percorso di studio. Ringrazio dunque la mia famiglia, in particolar modo la figura di mia madre che mi ha permesso fin da subito e con continuità di poter avere una formazione d'eccellenza, la mia ragazza che ha saputo comprendere i momenti di difficoltà e accompagnarmi durante gli stessi, gli altri affetti a me più cari ed i miei amici, che hanno saputo supportarmi e sopportarmi durante tutto il viaggio. Non posso non ringraziare anche coloro che hanno contribuito attivamente alla realizzazione di questo elaborato finale, con le proprie idee, i loro suggerimenti e la loro fatica fisica e mentale. Ringrazio sinceramente, profondamente e calorosamente il professor Enrico Cestino, i consulenti dell'azienda CFM Air, gli ingegneri Vito Sapienza e Lorenzo Chesta, i rappresentanti dell'azienda Marco Martilla, Valentina Martilla e Marco Miccichè, l'azienda 4 Ward360 Nanotechnology, nella figura di Sabrina Zuccalà, i tecnici di laboratorio del Politecnico di Torino, Gianpaolo Serino e l'ingegnere Massimiliano Mattone, il Test Pilot della National Test Pilot School (NTPS) Andrea Pingitore e i miei due amici e collaboratori, Andrea Felis e Francesco Galvano, senza i quali nulla sarebbe stato realizzato e non avrei continuato ad apprendere anche nel raggiungimento di questo ultimo traguardo accademico.