



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
DELL'INNOVAZIONE DEL PRODOTTO

TESI DI LAUREA

*Leghe di Alluminio AA6061 per impieghi aeronautici:
caratterizzazione e qualifica per l'accreditamento Nadcap*

Relatore: Prof. Franco Bonollo
Tutor Aziendale: Matteo Longin

Laureando: Riccardo Zanolli
Matricola: 1203502

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

SOMMARIO	5
LISTA DELLE FIGURE	7
LISTA DELLE TABELLE	9
INTRODUZIONE	11
CAPITOLO 1	13
1.1 SIDERFORGEROSSO GROUP S.P.A.	13
1.1.1 CENNI STORICI	13
1.2 LABORATORIO FORGEROSSO RESEARCH	16
1.2.1 LA NORMATIVA UNI CEI EN ISO/IEC 17025	18
1.2.2 CALCOLO DELL'INCERTEZZA DI MISURA	34
1.2.3 VANTAGGI DELL'ACCREDITAMENTO	36
1.3 IL SETTORE AEROSPAZIALE	38
1.3.1 NORMATIVE	39
1.3.2 MATERIALI NEL SETTORE AEROSPAZIALE	42
CAPITOLO 2	47
2.1 L'ALLUMINIO E LE SUE LEGHE	47
2.1.1 PROPRIETÀ DELL'ALLUMINIO	49
2.1.2 EFFETTO DEGLI ELEMENTI LEGANTI NELLE LEGHE DI ALLUMINIO	50
2.1.3 LEGHE DA FONDERIA E LEGHE DA DEFORMAZIONE PLASTICA	52
2.1.4 CLASSIFICAZIONE DELLE LEGHE DI ALLUMINIO	55
2.1.5 TRATTAMENTI TERMICI	58
2.2 LA LEGA DI ALLUMINIO 6061	63
2.2.1 CAMPI DI IMPIEGO	66
CAPITOLO 3	69
3.1 CASE STUDY – ANELLO FORGIATO AA6061	69
3.1.1 PROCEDURA SPERIMENTALE	71

3.2 QUALIFICA DEL MATERIALE – REQUISITI NADCAP	73
3.2.1 INTERNAL ROUND ROBIN – IRR	78
3.3 QUALIFICA DEL MATERIALE – AA6061	83
3.3.1 QUALIFICA PROVA DI TRAZIONE	84
3.3.2 QUALIFICA PROVA DI DUREZZA	87
3.3.3 QUALIFICA DEGLI OPERATORI	89
3.3.4 ANALISI CHIMICA	91
3.3.5 ANALISI MACROGRAFICA	92
3.3.6 ANALISI MICROGRAFICA	93
3.4 TRATTAMENTI TERMICI	98
3.4.1 SOLUBILIZZAZIONE – 4SI_8H	99
3.4.2 INVECCHIAMENTO	102
3.5 PROPRIETÀ MECCANICHE – CONFRONTO	103
3.5.1 PROVA DI TRAZIONE	103
3.5.2 PROVA DI DUREZZA	107
3.5.3 CONFRONTO MICROGRAFIE	110
CONCLUSIONI	113
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	115
RINGRAZIAMENTI	119

Sommario

Con la seguente tesi si vuole seguire ed spiegare l'iter normativo che deve intraprendere l'azienda *Siderforgerossi Group S.p.a.* al fine di conseguire l'accreditamento *Nadcap* utile per entrare in modo competitivo nel settore di mercato aerospaziale.

Il processo, nel caso specifico di *Siderforgerossi Group S.p.a.*, non parte dal principio ma va ad aggiungersi agli accreditamenti ottenuti negli anni: ISO 9001, UNI EN 9100, UNI CEI EN ISO/IEC 17025 di cui già gode l'azienda e il suo laboratorio interno, il *Laboratorio Forgerossi Research* già laboratorio di prova *Accredia* n° 1422 dal 2013. Il modo migliore per comprendere questo processo di ulteriore accreditamento è necessario seguire le direttive stilate nel documento AC7101/1 REV.G in cui si definiscono i limiti e i criteri da rispettare in previsione di un Audit da parte dell'ente *PRI (Performance Review Institute)*. Trattandosi di un laboratorio di prova molti passaggi della checklist riguardano analisi pratiche, si decide dunque di accompagnare il laboratorio nell'inserimento di un nuovo materiale introdotto in azienda tipicamente per il mercato aerospaziale: una lega della serie AA6061.

Il materiale consente di qualificare operatori e macchinari in prove che con i più noti acciai non erano impiegate. Si procede alla qualifica del materiale come *IRR (Internal Round Robin)*, non essendo precedentemente verificato viene classificato come *unverified material* ed è necessario comprenderne il grado di omogeneità, calcolare la ripetibilità e l'incertezza nel momento in cui viene utilizzato per la qualifica degli operatori.

Contestualmente, sempre nel rispetto delle stringenti normative richieste dal settore aerospaziale, si procede ad un'analisi sperimentale che consiste nella variazione di alcuni parametri di processo nei trattamenti termici della lega a partire da alcune considerazioni ricavate dalla letteratura.

Per l'analisi delle effettive modifiche si procede con i mezzi a disposizione del *Laboratorio Forgerossi Research* alle prove di trazione, durezza, analisi macrografica e analisi micrografica.

I risultati ottenuti, assieme all'adeguamento del percorso normativo *Nadcap* consentono di proseguire l'iter che porterà l'azienda ad entrare al meglio tra i fornitori certificati del settore di mercato aerospaziale.

Lista delle Figure

Figura 1 - Forgerossi S.p.A.	13
Figura 2 - Metallurgica Siderforge S.r.l.	14
Figura 3 – Siderforgerossi Group S.p.A.	16
Figura 4 - Laboratorio Forgerossi Research.....	17
Figura 5 - Accredia, Ente italiano di accreditamento	26
Figura 6 - Certificato Accredia Lab. 1422	27
Figura 7 - Prove Accreditate Sede A Categoria 0 – pag 1/3	29
Figura 8 - Prove Accreditate Sede A Categoria 0 – pag 2/3	30
Figura 9 - Prove Accreditate Sede A Categoria 0 – pag 3/3	31
Figura 10 - Prove Accreditate Sede A Categoria III.....	32
Figura 11 - PRI – Performance Review Institute	40
Figura 12 – Nadcap (National Aerospace and Defence Contractos Accreditation Program).....	41
Figura 13 - Materiali che compongono un velivolo	42
Figura 14 - Il processo Bayer	48
Figura 15 - Diagramma Al-Si.....	50
Figura 16 - Sollecitazioni delle varie parti di un velivolo.....	54
Figura 17 - Designazione delle leghe di alluminio.....	55
Figura 18 - Formazione di liquido lungo i bordi grano dovuto a overheating	59
Figura 19 - Resistenza a trazione in funzione della velocità di raffreddamento	60
Figura 20 - Rappresentazione di un precipitato incoerente (a) e coerente (b)	62
Figura 21 - Trattamento termico T6	64
Figura 22 - Materiali all'interno di un motore aeronautico	66
Figura 23 - Anello forgiato sacrificale in alluminio della serie AA6061	69
Figura 24 - Specifiche dimensionali (quote non indicate)	70
Figura 25 - Pezzo nel laminatoio.....	70
Figura 26 - Marcatura per ricavare i campioni per la prova di trazione	84
Figura 27 - Diagramma di trazione dei 12 provini ricavati dai pezzi A e B per il programma IRR.....	85
Figura 28 - Prove di durezza Brinell HBW2,5/62,5	87
Figura 29 - Macrografia	92

Figura 30 - Micrografia 100x M1 superficie	93
Figura 31 - Micrografia 100x M1 a T/2.....	93
Figura 32 - Micrografia 100x M2 superficie	94
Figura 33 - Micrografia 100x M2 a T/2.....	95
Figura 34 - Micrografia 100x M3 superficie	95
Figura 35 - Micrografia 100x M3 a T/2.....	96
Figura 36 - Micrografia 1000x.....	97
Figura 37 - Diagramma originale dell'Invecchiamento artificiale alla temperatura di 175 ± 3°C con permanenza di 8 ore	98
Figura 38 - Diagramma originale del Trattamento termico di solubilizzazione a 535 ± 5°C con permanenza di 3 ore	98
Figura 39 - Diagramma di solubilità Al-Mg ₂ Si.....	99
Figura 40 - Termocoppia da inserire nel pezzo campione forato in lega Al6061....	101
Figura 41 - Inserimento pezzo in forno per solubilizzazione	101
Figura 42 - Pezzi inseriti in forno per l'invecchiamento.....	102
Figura 43 - Diagramma trazione con confronto di provini del pezzo A e 3i_4h.....	105
Figura 44 - Diagramma trazione con confronto di provini del pezzo A e 4si_8h....	106
Figura 45 - Curva tipica della variazione delle proprietà con l'invecchiamento	107
Figura 46 - Micrografia 2i_2h, grain size number 3,5.....	110
Figura 47 - Micrografia 3i_4h, grain size number 3	111
Figura 48 - Micrografia 4si_8h, grain size number 3.....	111

Lista delle Tabelle

Tabella 1 - Designazione degli stati di fornitura delle leghe di alluminio.....	56
Tabella 2 - Valori della resistenza a trazione e snervamento in funzione della T di solubilizzazione	59
Tabella 3 - Forcelle analisi chimica serie AA6061	63
Tabella 4 - Frequenza PT (Proficiency Test)	75
Tabella 5 - Frequenza IRR	76
Tabella 6 - Frequenza minima per la verifica delle apparecchiature di laboratorio...	82
Tabella 7 - Risultati della prova di trazione dei 12 provini ricavati dai pezzi A e B per il programma IRR	86
Tabella 8 - Risultati della prova di durezza per il programma IRR	88
Tabella 9 - Valori della variabile di Student, particolare della tabella originale.....	89
Tabella 10 – Operatore qualificato con una prova	89
Tabella 11 - Qualifica dell'operatore con tre prove.....	90
Tabella 12 - Analisi chimica dell'acciaieria	91
Tabella 13 - Risultati prove di trazione dei provini ricavati da A e 2i_2h.....	104
Tabella 14 - Risultati prove di trazione dei provini ricavati da A e 3i_4h.....	104
Tabella 15 - Risultati prove di trazione dei provini ricavati da A e 4si_8h	106
Tabella 16 - Risultati prova di durezza HBW 2,5/62,5, confronto dei campioni A, 2i_2h e 3i_4h.....	108
Tabella 17 - Risultati prova di durezza HBW 2,5/62,5, confronto dei campioni A, 4si_8h.....	109

Introduzione

Un'azienda dinamica deve essere sempre pronta a soddisfare le ultime esigenze del mercato globalizzato. Già a partire dagli anni '70 l'allora *Forgerossi S.p.A* ha deciso di investire nel controllo qualità con un laboratorio di prova interno all'azienda.

Negli anni questo investimento ha portato i suoi frutti consentendo a *Siderforgerossi Group S.p.A.* di espandere il proprio business a livello mondiale.

Il solo controllo dei parametri, ridondante e fine a se stesso spesso non è sufficiente e negli anni questo è diventato ancor più chiaro. Ogni cliente richiedeva le proprie specifiche, il che comportava lavoro in più per il laboratorio e per il cliente stesso che era costretto a spendere molte energie nella verifica presenziata della qualità e dei dati dichiarati dal fornitore.

La svolta avvenne nel momento in cui il mercato iniziò ad adeguarsi a standard comuni e le aziende di fornitori di conseguenza. Dalla ISO 9001 che regola i sistemi per la gestione della qualità fino alle normative specifiche di settore come ad esempio la UNI EN 9100 che si focalizza sul settore aerospaziale.

Siderforgerossi Group S.p.A. ha sempre agito con atteggiamento propositivo arrivando nel 2013 ad accreditare il proprio laboratorio interno, il *Laboratorio Forgerossi Research*, secondo le direttive dell'ente di accreditamento italiano *Accredia* e della normativa UNI EN CEI ISO/IEC 17025 che definisce i requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura.

Le ultime prospettive di mercato per l'azienda hanno aperto le porte del settore aerospaziale, il settore più difficile in merito alla precisione delle specifiche nella produzione e nei trattamenti. Risulta necessario dunque compiere un ulteriore passo nella direzione del miglioramento dei processi di qualità per entrare da protagonisti nel fiorente settore aerospaziale. L'azienda e conseguentemente il *Laboratorio Forgerossi Research* devono conseguire l'accREDITAMENTO secondo le direttive *Nadcap* (*National Aerospace and Defence Contractos Accreditation Program*).

In questa tesi si seguirà parte dell'iter di preparazione all'Audit da parte dell'ente *PRI* (*Performance Review Institute*) accompagnati dalla qualifica di operatori e macchinari con l'utilizzo di un materiale non verificato introdotto in azienda di recente per gli impieghi aerospaziali: la lega di alluminio della serie AA6061.

Capitolo 1

1.1 Siderforgerossi Group S.p.a.

1.1.1 Cenni storici

Per conoscere le radici del gruppo *Siderforgerossi S.p.A.* si deve risalire agli inizi del 1900. La più longeva delle due aziende che la andranno a costituire, la *Forgerossi*, nasce e si sviluppa nella parte settentrionale della provincia di Vicenza, nella vallata dell'Astico, più precisamente lungo gli argini del torrente Posina nel comune di Arsiero. Secondo documenti storici della famiglia Rossi, essi godevano del diritto di utilizzare la forza motrice generata dal torrente Posina per la movimentazione di un maglio ad altalena consentendo ai tre soci Coriano Rossi, Angelo Rossi e Giuseppe Rossi di intraprendere la lavorazione del ferro a partire dal 1908. L'economia locale ha reso necessario l'utilizzo del maglio per la produzione di strumenti di lavoro. Agli artigiani del ferro erano richiesti in particolare: zappe, forche, falci per l'agricoltura, asce, roncole per le attività boschive, scalpelli, martelli, picconi, per l'attività mineraria.

Negli anni '30 il maglio Rossi inizia a lavorare anche per conto di Ernesto Gresele, fondatore delle *Acciaierie Valbruna* che fornirà la materia prima.

Nel 1935 Coriano Rossi diventa l'unico proprietario insieme ai figli Nello, Pietro e Olindo che gli subentreranno a partire dal 1950.

L'alluvione del 1966 distrugge il canale d'acqua impedendo al maglio di funzionare e i fratelli Rossi sono obbligati a separarsi. Pietro e Olindo si spostano sull'altro lato del fiume Posina nel comune di Arsiero e fondano *Forgerossi S.p.A.*



Figura 1 - Forgerossi S.p.A.

Negli anni '70, dopo una vita dedicata al lavoro, il Sig. Pietro Rossi lascia le sue azioni e la gestione dell'azienda al figlio Giorgio che negli anni precedenti era stato capace di affermare il suo ruolo rappresentativo all'interno di *Forgerossi S.p.A.*

Negli anni '80 l'azienda cresce a livello internazionale e investe in macchinari più potenti e sofisticati aumentando negli anni la capacità produttiva e il numero di dipendenti.

Grazie alle diverse qualifiche e *know how* ottenuti nel tempo *Forgerossi S.p.A.* sviluppa le sue attività anche nei settori *Oil & Gas*, chimico, petrolchimico, produzione di energia e nucleare.

Forgerossi S.p.A. produce flange e forgiati a stampo aperto di dimensioni medio-pesanti, che possono essere forniti sia grezzi che completamente lavorati. Nel tempo diventa leader specializzata nella produzione di anelli senza saldatura laminati a caldo, processo tecnologico specifico che ancora oggi dà all'azienda il suo vero valore aggiunto nell'ambito dell'industria della lavorazione meccanica e produzione di semilavorati in materiale metallico.

Nel 1981 viene fondata la *Metallurgica Siderforge S.r.l.* che utilizza una pressa per forgiatura libera per la produzione di pezzi per il mercato *Oil & Gas*.



Figura 2 - Metallurgica Siderforge S.r.l.

Nel 1991 *Siderforge S.r.l.* acquisisce un impianto di produzione già esistente e lo arricchisce con l'installazione di due mulini ad anello, presse per forgiatura e magli che consentono all'azienda di entrare nel mercato a livello internazionale.

Nei primi anni 2000 *Siderforge S.r.l.* sposta la produzione di componenti ottenuti per forgiatura in stampi chiusi nell'area del Canavese (TO) migliorandone la qualità con l'utilizzo di nuovi magli e presse.

Negli anni successivi *Siderforge S.r.l.* sviluppa il processo di forgiatura con stampi chiusi con magli da 50.000 Kg/m fino a 63.000 Kg/m ed è in grado di produrre grandi

serie di prodotti grazie all'implementazione di un sistema automatizzato e la possibilità di offrire una vasta gamma di finiture.

Nel 2013 *Siderforge S.r.l.* acquisisce un impianto di produzione in India con l'obiettivo di espandersi in territorio asiatico sviluppando la forgiatura a matrice chiusa.

Nel 2014, in seguito ad un accordo tra i vertici delle due rispettive realtà, Luciano Giacomelli presidente di *Forgerossi S.p.A.* e Giampietro Canale presidente di *Metallurgica Siderforge S.r.l.*, si dà inizio ad un processo di fusione delle due realtà aziendali al fine di rivolgersi al futuro con uno spirito di sana collaborazione anziché con una sfavorevole concorrenza.

Così i vertici delle due imprese in un comunicato congiunto:

«Al fine di metterci in condizione di affrontare con sempre maggiore efficacia e professionalità le sfide che ci attendono ed essere così in grado di offrire una gamma sempre più vasta di prodotti complementari tra loro, abbiamo scelto la strada dell'aggregazione. Che abbiamo ritenuto la più consona e concreta, attuale e necessaria, per poter rispondere adeguatamente alle esigenze del mercato. Come imprenditori sappiamo bene che non bisogna stare fermi sui mercati, ma reattivi e vivi. Vogliamo essere parte attiva di questo mondo manifatturiero che deve continuare a produrre nuove esperienze positive, che generino a loro volta sempre nuove emozioni e spinte imprenditoriali verso il futuro».

Un progetto che incontra la grande soddisfazione anche da parte dell'allora presidente di *Confindustria Vicenza*, Giuseppe Zigliotto [1]:

«Questo accordo rappresenta una logica nuova e intelligente per affrontare il mercato con maggiore forza. Così il territorio smette di farsi del male accantonando egoismi e rivalità in un momento in cui è strategico e necessario unire le proprie forze per rispondere alle nuove esigenze dell'economia. Mi auguro questa intesa possa aprire la via per ulteriori aggregazioni magari in altri settori. Penso, per esempio, alla concia piuttosto che al comparto orafa»

Nasce così a partire dal primo Gennaio del 2014, dalla fusione di *Forgerossi S.p.A.* e *Metallurgica Siderforge S.r.l* la newco *Siderforgerossi Group S.p.A.*



Figura 3 – *Siderforgerossi Group S.p.A.*

Il gruppo oggi impiega complessivamente circa 600 dipendenti in Italia in 7 stabilimenti, cinque in Veneto, Arsiero (2), Velo d’Astico (2) e Cogollo del Cengio (1) e due in Piemonte a Busano Canavese (2). L’azienda è ad oggi in salute ed ha raggiunto l’obiettivo che si era prefissata al momento della fusione portando il fatturato oltre i 200 milioni di EUR e in crescita anno dopo anno.

Recentemente l’acquisizione di un’impresa con esperienza trentennale a Mysore in India ha permesso al gruppo di espandere ulteriormente la gamma dei propri prodotti guadagnandosi riconoscimento a livello globale in vari settori [2].

1.2 Laboratorio Forgerossi Research

Per garantire la qualità dei propri prodotti e potersi affacciare a mercati internazionali e settori molto esigenti, *Siderforgerossi Group S.p.A.* si appoggia a valide realtà esterne di prova e verifica delle proprietà meccaniche, chimiche e di processo.

L’azienda ha impostato un sistema di qualità certificato da DNV Business Assurance in conformità ai requisiti degli standard ISO 9001:2015, AS/EN/JISQ 9100:2018, ISO/TS 29001:2010, ISO 14001:2004, ISO 45001:2018, ISO 50001:2018, e certificazioni di prodotto rilasciate dai principali organismi internazionali [3].

Un laboratorio interno all’azienda nasce inizialmente nel 1977 all’interno di *Forgerossi S.p.A.* in seguito alla necessità di collaudare e verificare la qualità dei prodotti metallurgici perseguendo una politica di continuo miglioramento.

Dal 1992 il laboratorio faceva parte di una organizzazione che operava in accordo alla norma UNI EN ISO 9001 e negli anni successivi ha ottenuto anche le certificazioni per i sistemi ISO/TS 29001, UNI EN ISO 14001, ISO 45001, EN 9100.

Nel 2012 l'azienda, spinta dalle crescenti esigenze del mercato globalizzato, decide di Accreditare il laboratorio esistente in accordo alla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 e ai requisiti dell'ente di accreditamento *Accredia*.

Pertanto nel 2012 nasce ad Arsiero il *Laboratorio Forgerossi Research*, una realtà che consiste in un laboratorio indipendente interno, tecnologico e all'avanguardia. Nel 2017 la sede del con sede del *Laboratorio Forgerossi Research* è stata spostata in via dell'Artigianato a Velo d'Astico (VI).



Figura 4 - Laboratorio Forgerossi Research

Attualmente il laboratorio lavora come parte integrante del gruppo ed effettua esclusivamente prove per la verifica della conformità dei prodotti fabbricati dall'azienda stessa. Uno degli obiettivi futuri per la crescita del laboratorio è quello di utilizzare le competenze ottenute negli anni di esperienza e il valore aggiunto del riconoscimento come laboratorio *Accredia* per aprire le porte anche a clienti esterni offrendo prove di alto livello che rispettano gli standard internazionali e danno garanzia del dato certificato.

Nel 2017 l'azienda decide di estendere l'accreditamento anche al laboratorio interno presente nella sede *Siderforgerossi Group S.p.A.* di Busano (TO). A fine 2018 si raggiunge l'obiettivo di accreditare anche questo laboratorio interno come sede B del *Laboratorio Forgerossi Research*.

Il laboratorio esegue:

- prove distruttive
- prove di corrosione
- esami metallografici
- prove chimiche
- prove non distruttive

Oltre a prove particolari su richiesta specifica del cliente finale di *Siderforgerossi Group S.p.A.*

Il Laboratorio ha redatto un manuale della qualità interno [4] con lo scopo di definire i criteri di gestione delle prove e delle tarature interne e assicurare la competenza tecnica del personale dell'esecuzione delle stesse in conformità alle norme nazionali ed internazionali e alle specifiche richieste dai clienti dell'azienda *Siderforgerossi Group S.p.a.*

Alcune attività di analisi svolte all'interno del laboratorio non sono ancora coperte da accreditamento ma rispettano le modalità gestionali ed operative e il personale ha le competenze necessarie per permettere un futuro accreditamento.

Le prove accreditate in categoria 0 e III (prove non distruttive) effettuate nel *Laboratorio Forgerossi Research* sono inserite nella lista consultabile nel sito *Accredia* [5].

1.2.1 La normativa UNI CEI EN ISO/IEC 17025

La normativa UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018 specifica i requisiti generali per la competenza dei laboratori ad effettuare prove e/o tarature [6].

La parte strutturale della norma si sviluppa in particolare nelle cinque macro sezioni centrali (Para. 4 – Para. 8):

- Paragrafo 4 – REQUISITI GENERALI:
 - Imparzialità: Le attività del laboratorio devono essere effettuate in modo imparziale, strutturate e gestite in modo da salvaguardare l'imparzialità senza permettere pressioni commerciali, finanziarie o di altra natura. Il laboratorio deve identificare su base continuativa i rischi che derivano dalle attività, dalle relazioni esterne o dalle relazioni con il personale. Se viene identificato un rischio per l'imparzialità il laboratorio deve essere in grado di dimostrare come elimina o minimizza tale rischio.
 - Riservatezza: Il laboratorio deve essere responsabile, per mezzo di impegni legalmente vincolanti, della gestione di tutte le informazioni ottenute o generate nel corso dell'effettuazione delle attività. La comunicazione delle

informazioni legate alle prove tra cliente e laboratorio deve rimanere riservata salvo diverse indicazioni o richieste di legge.

○ Paragrafo 5 - REQUISITI STRUTTURALI:

Il Laboratorio deve essere un soggetto giuridico, o una parte definita di esso, che sia legalmente responsabile delle proprie attività. Il Laboratorio deve identificare la direzione che ha responsabilità complessiva, l'eventuale organizzazione di appartenenza, i rapporti tra la direzione, le attività tecniche e i servizi di supporto. Va documentato che le attività siano eseguite in conformità al documento in esame, alle richieste dei clienti, delle autorità in ambito legislativo e delle organizzazioni che rilasciano riconoscimenti. Il personale, indipendentemente da altre responsabilità, ha l'autorità e le risorse necessarie per eseguire i propri compiti di mantenimento, gestione e miglioramento del sistema. La direzione si assicura che abbiano luogo comunicazioni sull'efficacia del sistema e sull'importanza della soddisfazione del cliente e che sia mantenuta l'integrità del sistema nel momento in cui vengono pianificate delle modifiche.

○ Paragrafo 6 – REQUISITI RELATIVI ALLE RISORSE:

- Generalità: Il laboratorio deve predisporre del personale, delle strutture, delle dotazioni, dei sistemi e dei servizi di supporto necessari ad eseguire le proprie attività.
- Personale: Tutto il personale di laboratorio può influenzare le attività quindi deve agire con imparzialità, essere competente e operare in conformità al sistema di gestione del laboratorio. Le competenze del personale sono documentate, monitorate, sono definite nei requisiti minimi e sono regolarmente mantenute. All'interno del laboratorio sono autorizzate alcune persone specifiche per le attività di sviluppo, modifica, verifica e validazione dei metodi, analisi dei risultati e dichiarazioni di conformità e non conformità e ad attuare le conseguenti azioni correttive.
- Strutture e condizioni ambientali: Devono essere idonee per le attività di laboratorio e non devono influire negativamente sulla validità dei risultati. I requisiti relativi alle strutture e alle condizioni ambientali necessarie per l'esecuzione delle attività di laboratorio devono essere documentati. Il

laboratorio deve monitorare, tenere sotto controllo e registrare le condizioni ambientali in conformità a specifiche, metodi o procedure pertinenti o quando queste influiscono sulla validità dei risultati. Devono essere attuate, monitorate periodicamente riesaminate misure finalizzate a mantenere sotto controllo le strutture.

- **Dotazioni:** Il laboratorio deve disporre delle dotazioni necessarie per eseguire correttamente le attività di laboratorio. Deve essere fatta una procedura per la manipolazione, il trasporto, la conservazione, l'utilizzo e la manutenzione programmata delle dotazioni al fine di assicurarne il corretto funzionamento e prevenirne la contaminazione o il deterioramento. Le apparecchiature devono consentire di ottenere l'accuratezza e l'incertezza di misura richieste per fornire risultati validi. Il laboratorio deve redigere un programma delle tarature per garantire la qualità dei risultati e la riferibilità metrologica. Tutte le dotazioni che richiedono taratura hanno un periodo definito di validità, devono essere etichettate, codificate o altrimenti identificate in modo da permettere all'utilizzatore di riconoscerne lo stato di taratura o il periodo di validità. Le dotazioni che hanno subito sovraccarico o manovra errata, che forniscono risultati dubbi o al di fuori dei requisiti specificati devono essere posti fuori servizio e il laboratorio deve attivare la procedura di gestione delle attività non conformi. Devono essere conservate registrazioni per le dotazioni indicanti: identificazione dell'apparecchiatura, il nome del produttore, la verifica di conformità, la collocazione attuale, le date di taratura, gli intervalli di accettazione, la documentazione delle nozioni di riferimento, il programma di manutenzione, i dettagli relativi a malfunzionamenti o modifiche.
- **Riferibilità metrologica:** Il laboratorio deve stabilire la riferibilità metrologica dei propri risultati di misura per mezzo di una documentata ed ininterrotta catena di tarature, ciascuna delle quali contribuisce all'incertezza di misura, che li pone in relazione ad un appropriato riferimento. Il laboratorio deve assicurarsi che i risultati di misura siano riferibili al Sistema Internazionale di Unità (SI).
- **Prodotti e servizi forniti dall'esterno:** Il laboratorio deve assicurare che vengano utilizzati solo prodotti e servizi idonei quando questi possono

influire sulle attività. Il laboratorio deve predisporre di una procedura e conservare registrazioni relativamente all'approvazione, la selezione, il monitoraggio dei prodotti e prestazioni forniti dall'esterno. I prodotti possono comprendere, per esempio, campioni di riferimento e apparecchiature, materiali di consumo, ecc. I servizi possono comprendere, ad esempio, la taratura, il campionamento, le prove, la manutenzione, le prove valutative interlaboratorio, gli audit, ecc.

○ Paragrafo 7 – REQUISITI DI PROCESSO:

- Riesame delle richieste, delle offerte e dei contratti: Il laboratorio deve disporre una procedura in modo da comprendere se ci sono le possibilità di eseguire una prova e adempiere alle richieste del cliente eventualmente comunicando eventuali discostamenti dal metodo standard.
- Selezione, verifica e validazione dei metodi: Il laboratorio deve utilizzare metodi e procedure appropriati per tutte le attività di laboratorio, per la valutazione dell'incertezza, per le tecniche statistiche e l'analisi dei dati. Quando il cliente non specifica il metodo da utilizzare il laboratorio deve sceglierne uno appropriato e informare il cliente circa il metodo scelto. Il laboratorio deve verificare di essere in grado di eseguire correttamente i metodi scelti prima di metterli in opera, assicurando di poter conseguire le prestazioni richieste. Quando è necessario lo sviluppo di un metodo, questa attività deve essere pianificata e deve essere assegnata a personale competente dotato di risorse adeguate. Qualunque scostamento dai metodi relativi alle attività di laboratorio deve intervenire solo se è stato documentato, tecnicamente giustificato, autorizzato e accettato dal cliente. Il laboratorio deve validare tutti i metodi non normati sviluppati e i metodi normalizzati utilizzati al di fuori del relativo campo di applicazione previsto. La validazione può comprendere la procedura di campionamento, manipolazione e trasporto degli oggetti da sottoporre a prova o taratura. Il laboratorio deve conservare le seguenti registrazioni relative alla validazione: procedura di validazione utilizzata, specifiche dei requisiti, la determinazione delle caratteristiche prestazionali del metodo, i risultati ottenuti, dichiarazione della validità del metodo che dettagli l'idoneità all'utilizzo previsto.

- **Campionamento:** Il laboratorio, quando effettua il campionamento di sostanze, materiali o prodotti destinati alle prove o alle tarature, deve disporre di un piano e di un metodo di campionamento. Il metodo di campionamento deve considerare i fattori da tenere sotto controllo per assicurare la validità dei successivi risultati di prova o taratura. Il piano e il metodo di campionamento devono essere disponibili nel luogo dove viene eseguito il campionamento stesso. Il campionamento deve descrivere: la modalità di selezione, il piano di campionamento, la preparazione e il trattamento del campione.
- **Manipolazione degli oggetti da sottoporre a prova o taratura:** Il laboratorio deve disporre di una procedura per il trasporto, la ricezione, la manipolazione, la protezione, l'immagazzinamento, la conservazione e l'eliminazione o restituzione degli oggetti da sottoporre a prova o taratura. Il laboratorio deve disporre di un sistema per l'identificazione univoca degli oggetti da sottoporre prova o taratura.
- **Registrazioni tecniche:** Il laboratorio deve assicurare che le registrazioni tecniche relative ad ogni attività di laboratorio contengano i risultati, i rapporti e le informazioni sufficienti a facilitare l'identificazione dei fattori che influiscono sul risultato. Le correzioni apportate alle registrazioni devono poter essere ricollegate alle versioni precedenti e devono essere conservati i file e i dati originali sia quelli modificati.
- **Valutazione dell'incertezza di misura:** I laboratori devono identificare i contributi significativi all'incertezza di misura. Un laboratorio che esegue prove deve valutare l'incertezza di misura facendo una stima, quando non vi sono valutazioni rigorose, basandosi sull'esperienza pratica e sulla conoscenza dei principi teorici.
- **Assicurazione della validità dei risultati:** Il laboratorio deve disporre di una procedura per monitorare la validità dei risultati. I dati risultanti devono essere registrati in modo tale che le tendenze siano rilevabili per applicare ove possibile tecniche statistiche di riesamina. Quando è possibile il laboratorio deve confrontare le proprie prestazioni con altri laboratori.
- **Presentazione dei risultati:** I risultati devono essere forniti in modo univoco, accurato, chiaro e oggettivo generalmente mediante un rapporto e

devono comprendere tutte le informazioni che sono state concordate con il cliente e necessarie per l'interpretazione dei risultati.

- Reclami: Il laboratorio deve disporre di un processo documentato per ricevere, valutare e prendere decisioni sui reclami. Una volta ricevuto un reclamo, il laboratorio deve confermare se il reclamo si riferisce alle attività di laboratorio per le quali esso è responsabile e, in caso affermativo, deve sottoporlo a trattamento.
- Attività non conformi: Il laboratorio deve disporre di una procedura che deve essere attuata qualora un qualsiasi aspetto delle proprie attività di laboratorio o i risultati non siano conformi alle proprie procedure o ai requisiti concordati con il cliente. Quando la valutazione mette in luce che le attività non conformi potrebbero ripetersi, oppure vi sono dubbi sulla conformità delle attività operative del laboratorio al proprio sistema di gestione, il laboratorio deve attuare azioni correttive.
- Controllo dei dati e gestione delle informazioni: Il laboratorio deve disporre di tutti i dati e informazioni necessari per svolgere le attività. I sistemi di gestione delle informazioni utilizzati per la raccolta, l'elaborazione, la registrazione, la presentazione, l'archiviazione o il reperimento dei dati devono essere validati dal laboratorio prima della loro introduzione al fine di garantirne la funzionalità.

○ Paragrafo 8 – REQUISITI DEL SISTEMA DI GESTIONE:

Il laboratorio deve stabilire, documentare, attuare e mantenere un sistema di gestione che sia in grado di supportare e dimostrare il regolare e coerente soddisfacimento dei requisiti del presente documento e di assicurare la qualità dei risultati di laboratorio. Il laboratorio deve attuare un sistema di gestione in conformità alle opzioni A o B:

▪ Opzione A

il sistema di gestione deve coprire almeno i seguenti aspetti:

- Documentazione del sistema di gestione
- Controllo dei documenti del sistema di gestione
- Controllo delle registrazioni
- Azioni per affrontare i rischi e le opportunità
- Miglioramento

- Azioni correttive
- Audit interni
- Riesame di direzione
- Opzione B

Un laboratorio che ha stabilito e mantiene un sistema di gestione conforme ai requisiti ISO 9001, che sia capace di supportare e dimostrare il regolare e coerente soddisfacimento dei requisiti riportati in precedenza, soddisfa almeno gli intenti dei requisiti del sistema di gestione.

Nel momento in cui un laboratorio adempie ai parametri stabiliti da questa normativa è in grado di redigere un manuale di qualità auto portante che elenchi le procedure tecniche e di sistema. Il laboratorio accreditato pianifica con regolarità e costanza Audit interni per la verifica delle procedure tecniche e procedure di sistema secondo l'analisi di non conformità (NC) e gestendo i processi con metodi di analisi del rischio (es. FMEA, KPI). Questi Audit periodici consentono al Laboratorio di mantenere monitorate le qualifiche, le tarature, la qualità dei risultati delle prove e di conseguenza programmare una efficace manutenzione.

Un aspetto caratteristico di questa normativa è legato al mantenimento del livello di qualifica del personale caratterizzato da:

- Attestati di qualifica rilasciati da terze parti con certificazione di II livello CND
- Partecipazioni e prove interlaboratorio organizzate da enti dedicati (IFEP, PTP, ASTM, Exova) eseguite nell'arco di un ciclo di accreditamento gestendo i risultati in accordo al doc. Accredia RT-24 [7].
- Esecuzione di prove (trazioni, resilienze, analisi chimiche) in doppio nello stesso lotto nelle quali l'incertezza di misura presa due volte è maggiore della ripetibilità ($2U \geq r$).
- Utilizzo di CRM (*Certified Reference Material*), provini di taratura verificati e controllati periodicamente.
- Confronto delle prove qualitative e non ripetibili (micrografie, macrografie, grani austenitici, inclusioni).

Dunque dal momento in cui un laboratorio diventa accreditato deve focalizzare maggiormente l'attenzione per quel che riguarda la gestione degli strumenti, prevedendo tarature esterne e tarature interne con campioni primari ed una scrupolosa catalogazione ed etichettatura della strumentazione con controlli periodici programmati. Altro aspetto fondamentale per un laboratorio che esegue misurazioni e test è quello della gestione dell'ambiente di lavoro, controllo e monitoraggio dei parametri di temperatura e umidità.

Il Laboratorio può accreditare prove con metodi normalizzati da norme regionali, nazionali o internazionali (UNI, EN, ISO, ASTM) ma anche metodi non normalizzati e sviluppati dal laboratorio stesso. Quest'ultima possibilità prevede che vi sia un accordo con il cliente comprendente una chiara specifica dei requisiti e dello scopo della prova, l'attività deve essere pianificata ed essere effettuata con le risorse adeguate da personale qualificato. Prima del test finale del nuovo metodo va sviluppata una procedura che garantisca la ripetibilità della prova. Infine i nuovi metodi devono essere validati attraverso un esame che evidenzii oggettivamente che i requisiti vengano soddisfatti.

L'esigenza di accreditamento deriva dalle richieste del mercato in continuo sviluppo e miglioramento. I clienti stessi richiedono direttamente con nota nelle specifiche che le prove siano eseguite presso un Laboratorio Accreditato UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018 per avere garanzia di ricevere un prodotto testato secondo standard internazionali di procedura in un sistema che gestisce e monitora continuamente la propria qualità. Questo metodo di lavoro consente all'azienda stessa tramite il proprio Laboratorio associato di migliorare continuamente il prodotto finito e parallelamente procedere con la ricerca e sviluppo di nuovi materiali. Inoltre aumenta nel tempo la competenza e l'autonomia del personale grazie all'aggiornamento continuo e alla verifica dei requisiti necessari.

Il sistema di qualità di un Laboratorio può essere accreditato dall'ente di accreditamento nazionale di riferimento per svariati settori: chimico, civile, elettrico, enologico, meccanico, microbiologico, tessile.

Un laboratorio accreditato, ovvero che rispetta determinate linee guida nella propria gestione, può effettuare una serie prove accreditate che sono sottoposte a revisione a livello tecnico anche da parte dell'ente. Non è corretto affermare che un laboratorio

accreditato fa solo prove accreditate o che ogni prova fatta in un laboratorio accreditato sia a sua volta accreditata.

Accredia è l'ente italiano di Accreditemento, unico organismo nazionale autorizzato a svolgere l'attività di accreditemento di terzi. *Accredia* è suddiviso in tre dipartimenti: Laboratori di prova, Laboratori di taratura e Organismi di certificazione, ispezione e verifica. Per accreditarsi un laboratorio deve, oltre ad operare in conformità alla norma internazionale ISO/IEC 17025, essere in linea con il documento *Accredia RT-08 "Prescrizioni per l'accreditemento dei laboratori di prova"* [8].



Figura 5 - Accredia, Ente italiano di accreditemento

Nella banca dati *Accredia* è possibile ricercare tra i laboratori di prova applicando dei filtri: nome del laboratorio, denominazione della prova, prodotto/matrice sottoposto a prova, norma/metodo di prova, settore tecnico del laboratorio, regione/provincia.

Di seguito il documento relativo all'accreditemento con data di emissione risalente al 18 Dicembre 2013 e aggiornato al 18 Febbraio 2020 con il quale si attesta la competenza del *Laboratorio Forgerossi Research* del Gruppo *Siderforgerossi Grop S.p.A* ad essere ufficialmente laboratorio di prova.

CERTIFICATO DI ACCREDITAMENTO Accreditation Certificate

ACCREDITAMENTO N.
ACCREDITATION N. **1422L REV. 06**

EMESSO DA
ISSUED BY **DIPARTIMENTO LABORATORI DI PROVA**

SI DICHIARA CHE
WE DECLARE THAT **Laboratorio Forgerossi Research**
Sede/Headquarters:
Via dell'Artigianato 18 - 36010 Velo D'Astico VI

È CONFORME AI REQUISITI
DELLA NORMA **UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018**

MEETS THE REQUIREMENTS
OF THE STANDARD **ISO/IEC 17025:2017**

QUALE **Laboratorio di Prova**
AS **Testing Laboratory**

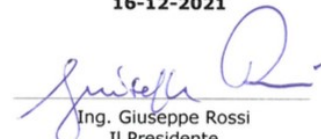
Data di 1ª emissione
1st issue date
18-12-2013

Data di modifica
Modification date
18-02-2020

Data di scadenza
Expiring date
16-12-2021


Dott.ssa Silvia Tramontin
Il Direttore di Dipartimento
The Department Director


Dott. Filippo Trifiletti
Il Direttore Generale
The General Director


Ing. Giuseppe Rossi
Il Presidente
The President

L'accreditamento attesta la competenza tecnica del Laboratorio relativamente al campo di accreditamento riportato nell'Elenco Prove allegato al presente certificato di accreditamento.
Il presente certificato non è da ritenersi valido se non accompagnato dagli Elenchi Prove, che possono variare nel tempo.
La validità dell'accreditamento può essere verificata sul sito web (www.accredia.it) o richiesta al Dipartimento di competenza.
I requisiti di sistema riportati nella norma ISO/IEC 17025 sono scritti in un linguaggio attinente alle attività di laboratorio e sono generalmente in accordo con i principi della norma ISO 9001 (si veda il comunicato congiunto ISO-ILAC-IAF dell'Aprile 2017).

*The accreditation certifies the technical competence of the laboratory limited to the scope detailed in the attached Enclosure.
The present certificate is valid only if associated to the annexed schedule, that may vary in the time.
Confirmation of the validity of accreditation can be verified on website www.accredia.it or by contacting the relevant Department.
The management system requirements in ISO/IEC 17025 are written in language relevant to laboratories operations and generally operate in accordance with the principles of ISO 9001 (refer joint ISO-ILAC-IAF Communiqué dated April 2017).*

Figura 6 - Certificato Accredia Lab. 1422

L'accreditamento ISO/IEC 17025 si differenzia dalla ISO 9001 perché fa riferimento solamente ai laboratori di taratura e prova prevedendo i requisiti necessari a garantire la competenza del personale coinvolto nell'esecuzione delle prove. I laboratori di prova che operano in conformità con questa norma rispettano anche il processo di gestione della qualità che soddisfa i principi della ISO 9001. Quindi la ISO/IEC 17025 si basa sull'impostazione generale della ISO 9001 ed implementa il controllo sulla competenza del personale per rendere più affidabile il dato analitico [9].

Il *Laboratorio Forgerossi Research* non si è limitato ad ottenere la certificazione (ISO 9001) che attesta la conformità dell'organizzazione nella gestione della qualità, bensì ha lavorato per ottenere l'Accreditamento (ISO/IEC 17025) che fornisce formalmente la competenza e capacità di compiere specifiche attività con garanzia di imparzialità, correttezza e che il personale addetto alla verifica sia culturalmente, tecnicamente e professionalmente preparato.

Di seguito in figura il documento che elenca le prove di categoria 0 accreditate nella Sede A di Velo d'Astico:

Laboratorio Forgerossi Research Via dell'Artigianato 18 36010 Velo D'Astico VI	Numero di accreditamento: 1422 L Sede A	
	Revisione: 13	Data: 07/08/2020
	pag. 2 di 4	UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018

Prova di corrosione intergranulare in acido solforico (35%) e solfato di rame/Intergranular Corrosion Test in sulfuric acid (35%) and copper sulfate	UNI EN ISO 3651-2:2000/EC1:2002 Met B	Esame visivo
Resistenza al crevice con cloruro ferrico/Ferric chloride crevice test	ASTM G48-11(2015) Met B	Gravimetria + esame visivo
Resistenza al pitting con cloruro ferrico/Ferric chloride pitting test	ASTM G48-11(2015) Met A	Gravimetria + esame visivo
Temperatura critica di pitting/Critical pitting temperature test	ASTM G48-11(2015) Met E	Gravimetria

Acciai/Steels

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Determinazione della dimensione media del grano/Determining average grain size	UNI EN ISO 643:2020	Microscopia ottica	
Prove di temprabilità mediante tempra ad un'estremità (Jominy test)/Hardenability test by the end-quench (Jominy test)	UNI EN ISO 642:2003	–	
Prove di temprabilità mediante tempra ad un'estremità (Jominy test)/Hardenability test by the end-quench (Jominy test)	ASTM A255-20	–	
Valutazione delle inclusioni non metalliche/Micrografic method examination of non metallic inclusions	UNI 3244:1980	Confronto con immagini tipo	
Valutazione delle inclusioni non metalliche/Micrografic method examination of non metallic inclusions	ASTM E45-18a - solo/only Met A e D	Confronto con immagini tipo	
Valutazione delle inclusioni non metalliche/Micrografic method examination of non metallic inclusions	DIN 50602:1985	Confronto con immagini tipo	
Valutazione delle inclusioni non metalliche/Micrografic method examination of non metallic inclusions	ISO 4967:2013 - solo/only Met A e B	Confronto con immagini tipo	

Barre d'acciaio/Steel bars, Billette /Billets, Blumi/Blooms, Fucinati/Forgings

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Esame macroscopico/Macroscopic examination	ASTM E381-20	Esame visivo	

Fucinati di acciaio austenitico/Austenitic steel forgings

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Controllo con ultrasuoni per la rilevazione di imperfezioni/Ultrasonic testing for the detection of imperfections	ASTM A745/A745M-20	Ultrasuoni	

Fucinati di acciaio ferritico o martensitico/Ferritic or martensitic steel forgings

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Controllo con ultrasuoni per la rilevazione di imperfezioni/Ultrasonic testing for the detection of imperfections	UNI EN 10228-3:2016	Ultrasuoni	

Fucinati di acciaio inossidabile austenitico ed austeno-ferritico/Austenitic and austenitic-ferritic stainless steel forgings

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Controllo con ultrasuoni per la rilevazione di imperfezioni/Ultrasonic testing for the detection of imperfections	UNI EN 10228-4:2016	Ultrasuoni	

Fucinati di acciaio/Steel forgings

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Controllo con ultrasuoni per la rilevazione di imperfezioni/Ultrasonic testing for the detection of imperfections	ASTM A388/388M-19	Ultrasuoni	

Leghe di nichel con presenza di cromo/Nickel-Rich chromium-bearing alloys, Leghe di Nichel/Nickel alloys

Denominazione della prova / Campi di prova	Metodo di prova	Tecnica di prova	O&I
Prova di corrosione intergranulare in acido solforico e solfato di ferro/Intergranular Corrosion Test in sulfuric acid and iron sulfate	ASTM G28-02(2015) Met A	Gravimetria	

Figura 8 - Prove Accreditate Sede A Categoria 0 – pag 2/3

L'addetto che esegue la prova deve essere qualificato da un ente accreditato per la certificazione del personale secondo la UNI EN ISO 9712. Il certificato SNT-TC-1A può essere rilasciato anche dal personale di III livello aziendale.

La valutazione per conseguire il patentino consiste in un esame con domande a risposta multipla e lo sviluppo di una procedura di lavoro.

In un laboratorio di questo tipo è fondamentale la costante gestione e controllo delle apparecchiature e strumentazioni di prova per garantire la qualità delle analisi e una corretta catena di riferibilità richiesta puntualmente in sede di Audit esterni da parte di ispettori o enti di accreditamento. In funzione di ciò va stilato un elenco delle apparecchiature che vanno etichettate e tarate con tempistiche stabilite dal laboratorio in funzione di prescrizioni delle norme o documenti di riferimento degli strumenti.

Per attestare la catena di riferibilità, ad ogni strumento corrisponde un certificato, con riferimento ai certificati LAT degli strumenti usati per la taratura, con data e scadenza della taratura.

L'ambiente di lavoro deve essere idoneo e tenuto sotto controllo tramite termometri ambientali, termometri con sonde a contatto (contatto su pezzi UT), luxmetri (misura dei Lux, luce visibile, per LP a contrasto colore e polveri magnetiche visibili a luce normale) e radiometri (misura dei $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, bassa luminosità, usata per verifica intensità lampada Wood) che verifichino la presenza di determinate luminosità stabilite dalle norme di prova.

1.2.2 Calcolo dell'incertezza di misura

Secondo la norma ISO/IEC 17025 per fornire una misura corretta il laboratorio deve calcolarne l'incertezza. Per incertezza di misura si intendono i relativi parametri non negativi che caratterizzano un intervallo di valori attribuiti ad un misurando. Il parametro può essere definito da uno scarto quadratico medio (u) o multipli di esso, oppure da una semi ampiezza avente una probabilità di copertura stabilita. L'incertezza di misura è una stima legata ad un risultato di prova che caratterizza l'escursione dei valori entro cui si suppone che cada il valore vero del misurando.

Si possono calcolare diverse tipologie di incertezza di misura:

- Incertezze di tipo A, derivano da una famiglia di numeri e si possono identificare in una distribuzione gaussiana
- Incertezze di tipo B, non ottenute da misurazioni ripetute ad esempio certificati di taratura, unità di formato, errore di lettura. Generalmente hanno distribuzione rettangolare
- Incertezza composta, radice quadrata della sommatoria delle varie incertezze in ingresso in quadratura
- Incertezza estesa, incertezza composta moltiplicata per un fattore di copertura K . Generalmente si usa $K=2$ per avere il 95% di affidabilità

Le incertezze di misura in ingresso a questi calcoli sono date da:

- U_{CRM} , incertezza di misura del CRM (*Certified Reference Material*) dal certificato di taratura (tipo B) che va divisa per il fattore di copertura
- $U_{X_{CRM}}$, incertezza calcolata da valori ottenuti in taratura (tipo A) con l'equazione $U_{x_{CRM}} = \sigma_n / \sqrt{n}$ con n numero di prove.
- $U_{X_{prova}}$ prova, incertezza calcolata da valori ottenuti in prova (tipo A) con l'equazione $U_{x_{prova}} = \sigma_n / \sqrt{n}$ con n numero di prove.
- U_r risoluzione dell'apparecchiatura di prova (tipo B) calcolata come $r * \frac{\sqrt{3}}{2}$ utilizzando la distribuzione rettangolare.

- U_v errore dell'apparecchiatura di prova (tipo B) calcolata come $r * \frac{\sqrt{3}}{2}$ utilizzando la distribuzione rettangolare.

L'incertezza composta risulta:

$$U = \sqrt{U_{CRM}^2 + U_{x_{CRM}}^2 + U_{x_{prova}}^2 + U_r^2 + U_v^2}$$

Il *Laboratorio Forgerossi Research* ha sviluppato negli anni molta esperienza nel calcolo dell'incertezza basandosi sui principali documenti di riferimento normativi nazionali ed internazionali:

- JCGM 100:2008 “*Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*” [11]
- DT-0002 “*Guida per la valutazione e l'espressione dell'incertezza nelle misurazioni*” [12]
- EA-4/02 “*Expression of uncertainty of measurement in calibration*” [13]
- DT-05_DT “*Introduzione ai criteri di valutazione dell'incertezza di misura nelle tarature*” [14]

1.2.3 Vantaggi dell'accreditamento

L'accreditamento è un processo trasparente ed efficiente i cui effetti positivi ricadono su tutti gli aspetti del sistema socio-economico.

- Nelle istituzioni e pubblica amministrazione risulta uno strumento di regolazione che supporta le attività degli enti competenti nel controllo degli operatori del mercato, verifica le conformità alle norme nazionali ed europee in maniera sinergica e sostitutiva rispetto alle autorità pubbliche. L'attività è svolta senza scopo di lucro, al di fuori della concorrenza, così da garantire indipendenza e imparzialità, sempre sotto la vigilanza dello Stato con cui si pone in piena collaborazione.
- Per le imprese l'accreditamento consente di porsi con maggiore incisività sul mercato poiché il possesso di una valutazione di conformità accreditata funziona come un plus competitivo, un rafforzamento della credibilità della propria offerta nei confronti del mercato. Questo percorso consente inoltre di accedere con più facilità ai mercati esteri e di settore senza dover superare volta per volta stretti controlli aggiuntivi. L'accreditamento spinge poi l'impresa ad un continuo miglioramento che crea consapevolezza e rafforza l'intera struttura in termini di impulso alla produttività e di gestione dei rischi interni ed esterni.
- Per un consumatore scegliere un prodotto accreditato significa assicurarsi che il fornitore abbia assolto una serie di obblighi e abbia messo in campo tutte le risorse per poter immettere sul mercato un bene che offre effettivamente quello che dichiara.

Questo tipo di gestione non è semplice e richiede alcuni sforzi da parte dell'ente accreditato che spesso scoraggiano nell'intraprendere questa strada. In particolare sono evidenti, soprattutto nelle fasi iniziali, i costi di gestione volti a dimostrare l'efficacia del proprio sistema: prove interlaboratorio, prove in doppio, CRM (*Certified Reference Material*), tarature e tutte le attività necessarie per garantire l'assicurazione della qualità dei risultati di prova.

Non sono trascurabili i costi per mantenere l'accreditamento: il mantenimento annuale, visite ispettive, ispettori Accredia, estensioni di prove o sedi accreditate.

Questi costi si ribaltano sul prodotto, è quindi importante istruire il cliente sul perché una prova accreditata abbia un costo maggiore e sull'importanza dell'affidabilità delle suddette prove.

All'azienda resta la decisione, su basi economiche e di qualità del prodotto, di accreditare o meno il proprio laboratorio interno, con l'alternativa di appoggiarsi a delle realtà esterne.

1.2.5 Progetti attuali e futuri

Attualmente *Siderforgerossi Group S.p.A.* è leader nella laminazione a caldo di anelli, di prodotti forgiati e stampati, con un peso prodotti che varia dai 10 kg a 30.000 kg.

L'azienda produce componenti per i settori:

- Oil & Gas
- Trasmissione
- Produzione di energia
- Meccanica generale
- Nucleare
- Movimentazione terra, Agricolo e Minerario
- Ferroviario
- Industria dei veicoli commerciali
- Navale

Operare in questi settori implica aver conseguito nel tempo una lunga serie di certificazioni, un esempio riguardo l'industria navale che richiede le approvazioni della ABS, DNV-GL, RINA, BV, LR.

Recentemente *Siderforgerossi Group S.p.A.* ha intrapreso il percorso normativo per entrare in un nuovo mercato in continua evoluzione, si tratta del settore Aerospaziale e Aeronautico.

1.3 Il settore Aerospaziale

L'industria aerospaziale si occupa della progettazione e produzione di veicoli aeromobili:

- Aeroplani
- Elicotteri
- Aeromobili a pilotaggio remoto
- Missili
- Razzi
- Stazioni spaziali con equipaggio
- Sonde spaziali robotiche
- Satelliti artificiali

Fanno parte del settore anche le attrezzature associate utili al funzionamento dei prodotti appena elencati, dunque sistemi di propulsione, sistemi di navigazione, ecc.

L'affinità tra il mondo dell'esplorazione dello spazio e quello dell'aviazione ha fatto sì che *l'Industria aeronautica* sia racchiusa nella definizione della famiglia più grande di *Industria aerospaziale* [15].

Poiché tutte queste attività sono strettamente collegate anche alla fornitura militare, si è diffusa la consuetudine di riunire le attività spaziali, aeronautiche e militari sotto alla definizione comune di *Aerospazio e difesa* come riportato dai dati forniti dalle principali associazioni internazionali e nazionali di categoria:

- *AIA, Aerospace Industries Association, USA*
- *ASD, Aerospace and Defense industries association of Europe*
- *AAID, Federazione Aziende Italiane per l'Aerospazio, la Difesa e la Sicurezza*

Spesso l'industria aerospaziale consiste in una collaborazione tra industrie pubbliche e private, in diversi paesi i governi finanziano un programma spaziale. Alcuni esempi sono gli Stati Uniti con la NASA, i paesi europei con l'Agenzia Spaziale Europea, il Canada con l'agenzia Spaziale Canadese, l'India con l'Indian Space Research Organization, il Giappone con la JAXA, la Russia con l'Agenzia Spaziale Russa, la Cina con l'Agenzia Spaziale Cinese, il Pakistan con la SUPARCO, l'Iran con

l'Agenzia Spaziale Iraniana e la Corea del Sud con l'Istituto Coreano di ricerca aerospaziale (KARI).

Oltre a questi programmi pubblici sono molte le aziende private che producono strumenti tecnici, componenti e persino interi mezzi come astronavi e satelliti. Alcune società produttrici di aeromobili sono coinvolte nei programmi spaziali sono: Boeing, Cobham, Airbus, SpaceX, Lockheed Martin, United Technologies, MacDonald Dettwiler e Northrop Grumman.

1.3.1 Normative

Per essere parte attiva del settore Aerospaziale ed operare su mercati militari e civili risulta ancor di più fondamentale sottoporre l'azienda alle normative nazionali ed internazionali di riferimento.

Nel caso specifico si fa riferimento alla AS/EN 9100 [16] che ricalca lo schema costitutivo della ISO 9001 aggiungendo alcuni requisiti specifici. La norma EN 9100 rappresenta l'approccio standardizzato per la certificazione della filiera aerospaziale ed è divenuta presto la normativa di riferimento a livello mondiale del settore grazie ai suoi vantaggi:

- Riconoscimento ufficiale da parte dell'IAQG (*International Aerospace Quality Group*)
- Misurabilità del livello di conformità alla norma, ottenuta attraverso un sistema a punteggi (*scoring*)
- Valorizzazione dell'investimento già effettuato, nel caso di organizzazioni già certificate UNI EN ISO 9001:2008

La norma è emanata sotto il controllo di IAQG ed è un *Industry Consensus Standards* inteso come programma condiviso di cooperazione mondiale con lo scopo di promuovere il continuo miglioramento delle prestazioni mantenendo efficacemente ed a costi contenuti un rigoroso sistema di gestione della qualità. Attualmente nel mercato aerospaziale le aziende più rappresentative si sono orientate verso questa norma come criterio imprescindibile a garanzia di sicurezza e qualità facendola diventare un carattere discriminante nella selezione dei fornitori. Quindi tutta la filiera di fornitura

dei grandi costruttori aerospaziali si sta adeguando alla norma EN 9100, che a livello strutturale si basa sulla ISO 9001 implementando alcuni requisiti specifici aerospaziali che soddisfano:

- Requisiti delle autorità e Normative di settore
- Gestione della configurazione
- Rigorosa gestione della documentazione e delle registrazioni
- Verifica e validazione del progetto e delle prove inerenti
- Attenzione nella selezione e valutazione dei fornitori
- Attenzione ai requisiti necessari per l'approvvigionamento
- Controllo della produzione affidata all'esterno (*outsourcing*)

Arricchire la propria azienda con la normativa EN 9100 consente l'inserimento in una lista che esula dalla ricognizione preventiva riducendo gli audit periodici da parte del cliente in quanto si è riconosciuti automaticamente dall'IAQG, facilitando la selezione tra le parti qualificate al momento dell'instaurarsi di rapporti commerciali. Nel tempo, questa valorizzazione dell'investimento già effettuato per adeguarsi alla UNI EN ISO 9001, porta l'azienda a crescere in termini di efficienza, produttività e competitività consentendo inoltre di misurare il livello di conformità alla norma attraverso un sistema a punteggio (*scoring*).

In funzione di questa necessità di omologazione del mercato aerospaziale, nel Novembre del 1989, ad una conferenza tra i rappresentanti del settore e il governo degli Stati Uniti venne incaricato l'ente di normazione *SAE International* per la creazione e lo sviluppo del *PRI (Performance Review Institute)* [17], una associazione senza scopo di lucro fondata nel 1990 ed incaricata per l'amministrazione del programma *Nadcap*.



Figura 11 - PRI – Performance Review Institute

Nadcap (National Aerospace and Defence Contractos Accreditation Program) è un programma di cooperazione delle maggiori realtà operanti nel settore aerospaziale e della difesa a livello globale. Lo scopo di questa organizzazione è di gestire un approccio comune all'accREDITamento dei processi speciali e promuovere il miglioramento continuo del settore aerospaziale mantenendo elevati i criteri di auditing in tutto il mondo. Ne consegue un approccio standardizzato al controllo della qualità ed un aumento dell'efficienza degli audit nel settore aerospaziale [18].



Figura 12 – *Nadcap (National Aerospace and Defence Contractos Accreditation Program)*

Prima dell'avvento del *Nadcap* le aziende controllavano direttamente la conformità dei requisiti di processo dei propri fornitori in modo molto simile tra di loro. Veniva dunque a crearsi una forte ridondanza degli audit con un conseguente aumento di carico di lavoro per il cliente e per il fornitore senza apportare un effettivo valore aggiunto al prodotto. Il programma, con il supporto dei *Primes* aeronautici iscritti (*Subscribers*), è in grado di:

- Fissare standard rigorosi che soddisfano le richieste di tutti gli enti coinvolti.
- Sostituire l'auditing di routine di tutti i fornitori con uno solo approvato consensualmente dagli utenti.
- Condurre audit di alto livello tecnico su processi speciali in maniera approfondita.
- Migliorare la qualità dei fornitori in tutto il settore grazie all'introduzione di requisiti rigorosi.
- Ridurre i costi promuovendo un livello di standardizzazione più spinto.
- Utilizzare valutatori tecnici esperti di processo (*Nadcap Auditors*).
- Offrire audit più frequenti per i *Primes* e meno frequenti per i fornitori.

1.3.2 Materiali nel settore aerospaziale

L'industria aeronautica richiede l'impiego di una vasta gamma di materiali [19] con proprietà particolari di resistenza abbinata al basso peso specifico. La varietà dei materiali utilizzati è in continua espansione, frutto di un mercato dinamico che spinge ed investe molto nella ricerca per ottenere prodotti di qualità estrema spesso non focalizzandosi sul risparmio economico.

I materiali adatti all'utilizzo in campo aerospaziale presentano tutti un elevato rapporto resistenza/peso (*strenght to weight ratio*) pur garantendo:

- Omogeneità, mantenendo le medesime proprietà in ogni direzione di sollecitazione
- Resistenza a corrosione
- Ininfiammabilità
- Resistenza a fatica, per garantire una durata accettabile
- Reperibilità sul mercato

I materiali che corrispondono a queste caratteristiche e che attualmente occupano il mercato dell'industria aeronautica sono le leghe di alluminio, di magnesio, di titanio, di nickel, l'acciaio, e i materiali compositi.

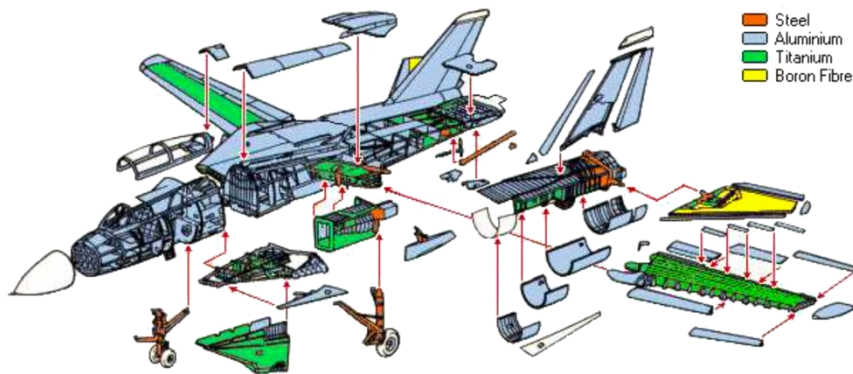


Figura 13 - Materiali che compongono un velivolo

Approfondendo il concetto del rapporto resistenza meccanica/peso si consideri che l'acciaio ha una densità di $7,75 \text{ kg/dm}^3$ ed una resistenza meccanica a trazione di circa 1100 N/mm^2 . Prendendo ad esempio le leghe di alluminio, si ha una densità di $2,7$

kg/dm³ e successivamente ad opportuni trattamenti termici una resistenza meccanica di circa 440 N/mm². I rapporti resistenza/peso sono quasi uguali poiché l'acciaio pesa il triplo delle leghe di alluminio ed ha a sua volta una resistenza tripla, tuttavia un componente sottile in acciaio, che conserva le proprietà di un componente di alluminio più spesso, presenta gli svantaggi che derivano dal lavorare con spessori ridotti con conseguenti problemi di deformazioni. L'alternativa, a parità di spessori, comporta ad avere una struttura tre volte più pesante, improponibile per l'impiego aeronautico.

Per avere un'idea della natura e della differente quantità dei materiali utilizzati prendiamo ad esempio la costituzione di un Boeing B747 che vede la presenza di: 78% leghe di alluminio, 12% acciaio, 6% leghe di titanio, 3% materiali compositi, 1% altro. Ogni impiego richiede diverse caratteristiche, espresse da diversi materiali:

- Proprietà fisiche, peso specifico, dilatazione termica, temperatura di fusione, conduttività termica ed elettrica
- Proprietà meccaniche, resistenza alle sollecitazioni di trazione, compressione, taglio, flessione e torsione
- Proprietà chimiche, resistenza alla corrosione
- Proprietà tecnologiche, fusibilità, malleabilità, duttilità, temprabilità, saldabilità, ecc.

Pur non corrispondendo pienamente alle richieste di leggerezza trova largo impiego nel mondo aeronautico l'acciaio, che viene impiegato laddove non vi sono limitazioni di spazio o specifiche richieste di tenacità o durezza. Delle molteplici categorie di acciai quelle maggiormente utilizzate in ambito aerospaziale sono i così detti *acciai speciali*, i soli ad avere un interessante rapporto resistenza/peso. Questi ultimi sono caratterizzati dalla presenza di numerosi elementi alliganti oltre al carbonio come nichel, cromo, manganese, molibdeno, ecc. Questi ultimi conferiscono all'acciaio diverse proprietà a seconda della loro presenza, ad esempio il molibdeno (Mo) conferisce resistenza all'usura, il cromo (Cr) agisce come elemento indurente e innalza il limite di elasticità, il nichel (Ni) migliora la temprabilità e influisce favorevolmente sul carico di rottura, sulla durezza e sulla resistenza a corrosione. Un gruppo di acciai largamente impiegato nel settore aeronautico è quello degli inossidabili al cromo o al nichel-cromo che prevengono la problematica molto sentita e pericolosa della corrosione. Non si considera solamente il tema strutturale, infatti in campo motoristico

sono utilizzate leghe alle quali è richiesta resistenza alle alte temperature, le principali sono a base nichel (*Inconel*), cromo, cobalto, molibdeno e titanio.

Quest'ultimo in particolare è un metallo dall'aspetto simile all'acciaio inossidabile caratterizzato da una elevata temperatura di fusione di circa 1725 °C ed un elevato rapporto resistenza meccanica/peso. A causa della difficoltà di produzione e lavorazione il suo impiego è iniziato solo a partire dagli anni '60 quando è risultato possibile raggiungere la sua temperatura di fusione. Da lì in poi sono state sviluppate e studiate delle leghe trattabili termicamente con proprietà più interessanti del materiale puro giustificandone l'impiego anche a fronte dei costi elevati. Le caratteristiche principali delle leghe di titanio sono: buona resistenza meccanica a temperature elevate, ridotto peso specifico e ottima resistenza a corrosione, proprietà che rendono la scelta di questo prodotto necessaria in situazioni di sollecitazione in ambiente corrosivo o ad elevate temperature.

Le leghe di titanio presentano inoltre alcune proprietà particolari: la superplasticità, che consente di realizzare pezzi di notevole allungamento senza difetti o inneschi di rotture alla temperatura di 850-900° C e l'attitudine alla saldatura per diffusione (*diffusion bonding*) che permette di ottenere la saldatura perfetta di due lamiere per pressione che a fine processo presentano caratteristiche identiche al materiale di partenza. Infine le leghe di titanio sono l'unica soluzione in caso di impieghi in mezzi che viaggiano a velocità supersoniche poiché ad alto Mach si raggiungono temperature elevate (fino a 600°C) a causa della rapida compressione dell'aria che lambisce l'aereo.

Il materiale impiegato industrialmente caratterizzato dal minore peso specifico è il magnesio che, legato con Al, Zn o Mn, raggiunge buone resistenze meccaniche dando vita alle leghe denominate ultraleggere. Queste leghe possiedono buone caratteristiche di colata con lo svantaggio di essere particolarmente sensibili alle ossidazioni con la conseguente necessità di atmosfera controllata di SO₂ durante i trattamenti termici. A causa di queste ultime limitazioni l'utilizzo del magnesio è limitato nel settore aeronautico commerciale e trova la massima applicazione nel settore missilistico.

Negli ultimi vent'anni un'altra tipologia di materiale ha rivoluzionato il modo di pensare e progettare le strutture in modo da ottenere rapporti di peso/resistenza prima impensabili. Si tratta dei materiali compositi [20], materiali artificiali caratterizzati da

una struttura non omogenea composta da elementi diversi insolubili e separati tra loro. Strutturalmente il materiale composito è costituito da una fase fibrosa, detta rinforzo, che resiste alle sollecitazioni e da una fase omogenea, detta matrice, che trasferisce le sollecitazioni alle fibre stesse. Il prodotto finale è un materiale solido e continuo che garantisce proprietà meccaniche elevatissime, resistenza a fatica e a corrosione a fronte di un peso specifico molto ridotto. I materiali compositi nel settore aeronautico sono utilizzati per le parti mobili dell'ala e le fusoliere. I limiti che rallentano la diffusione di questi materiali sono l'elevato costo di produzione, la scarsa resistenza ad usura superficiale e ai carichi concentrati e la difficoltà di smaltimento e riciclaggio.

Non ultimo prendiamo in esame il materiale che per di più ha risposto alle caratteristiche richieste dal mercato aerospaziale e ancora oggi, dopo continue ricerche, ha un ruolo da protagonista in questo settore. Si tratta dell'Alluminio, che nel capitolo successivo verrà trattato in modo più approfondito.

Capitolo 2

2.1 L'Alluminio e le sue leghe

Nel corso degli anni l'Alluminio e le sue leghe [21] stanno assumendo un ruolo sempre più importante in molti settori industriali. Ingegneria strutturale, automotive, aerospaziale, rami della produzione in larga scala che sono soggetti a continui cambiamenti ed hanno richieste in termini di qualità e prestazioni crescenti con il passare degli anni. L'Alluminio è un materiale che ben si presta a rispondere alle più esigenti necessità in alternativa ai materiali tradizionali con i numerosi vantaggi legati all'ampia gamma di proprietà e versatilità. La facilità di processo e lavorazione è un parametro molto considerato a livello industriale per i conseguenti risparmi in termini energetici e di tempo. Un risparmio in termini di tempo e soprattutto di energia, solamente legate alle proprietà di base del materiale di partenza, si traducono in importanti risparmi economici.

L'alluminio è uno degli elementi più diffusi nella terra dietro solo a ossigeno e silicio, tuttavia il suo impiego e sviluppo risale solo agli ultimi due secoli. L'alluminio è un metallo che ha una forte affinità con l'ossigeno e ciò fa sì che esso sia presente in natura sotto forma di ossido o silicato e mai come elemento isolato.

Solo nel 1807 venne nominato "alluminio" da Sir Humphrey Davy quell'elemento metallico costitutivo dell'allume. Nel 1825 un chimico danese, H.C. Oersted, riuscì ad isolare una discreta quantità di questo elemento tramite una riduzione di cloruro di alluminio anidro con un amalgama di sodio. Gli studi di Friedrich Wöhler negli anni successivi hanno portato i ricercatori ad interessarsi alle proprietà di questo nuovo materiale.

Nel 1850 lo scienziato francese Henri Sainte-Claire Deville migliorò il metodo di produzione di alluminio rendendolo più a buon mercato pur rimanendo ancora ad un costo elevato rispetto ai materiali tradizionali a causa della difficoltà di sintetizzazione. Contemporaneamente, nel 1886, l'americano Charles Martin Hall e il metallurgista francese Paul Lois Toussaint Héroult proposero un processo di produzione che aprì le porte alla produzione industriale di questo elemento. Il metodo prevede l'ottenimento di grandi quantità di alluminio tramite la dissoluzione dell'ossido di alluminio in un

bagno di criolite (un sale complesso di alluminio, fluoro e sodio) fusa e la successiva estrazione dell'elemento tramite processo di elettrolisi. Forte limite è un'elevata richiesta di energia che non rende ancora vantaggioso il processo.

Tre anni dopo Karl Bayer sviluppò un metodo per ottenere l'allumina (Al_2O_3) a partire dalla bauxite, minerale molto presente nella crosta terrestre con un'elevata percentuale di alluminio al suo interno.

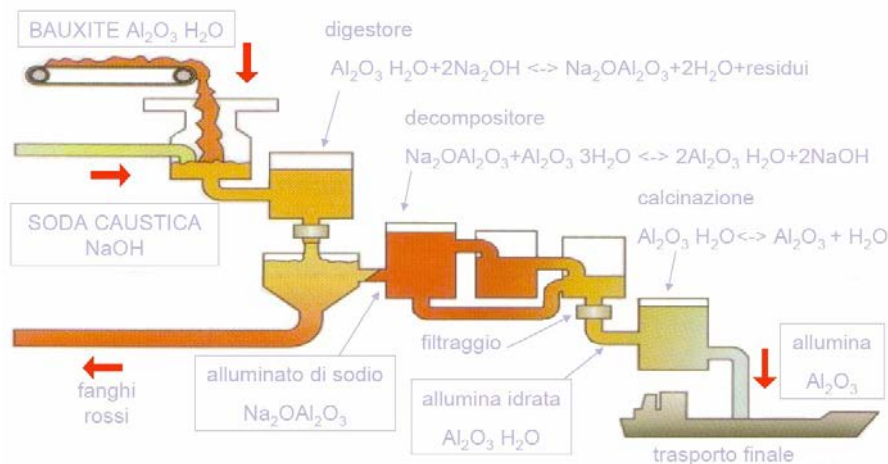


Figura 14 - Il processo Bayer

Il processo Bayer utilizzato anche oggi insieme al processo Hall-Héroult, prevede la produzione di allumina immergendo il minerale di partenza in una soluzione di idrossido di sodio (soda caustica) sotto pressione a elevate temperature in modo da ottenere alluminato di sodio. Questo composto risulta instabile, è necessario quindi far gorgogliare dell'anidride carbonica nel bagno favorendo la precipitazione di idrossido di alluminio che attraverso processi di calcinazione si trasforma in allumina. Questi processi consentirono di abbassare il prezzo dell'alluminio del 90% favorendone l'accessibilità e l'utilizzo per qualsiasi tipo di applicazione. Durante la seconda guerra mondiale, con la necessità di abbattere ulteriormente i costi di produzione del materiale, si iniziò ad utilizzare il materiale di scarto dando vita alle così dette leghe di alluminio secondarie.

2.1.1 Proprietà dell'Alluminio

Dopo le scoperte sopra elencate, dai primi anni del '900 ad oggi l'industria dell'alluminio è cresciuta in modo esponenziale. L'ampia flessibilità di proprietà dell'elemento e delle sue leghe hanno consentito l'impiego in svariati settori tra i quali spiccano l'ampio mondo automotive e quello in costante crescita legato alle applicazioni aerospaziali. L'alluminio rientra nella categoria delle leghe leggere o "*light metals*" grazie alla sua densità molto bassa di circa $2,7 \text{ g/cm}^3$, circa un terzo di quella dell'acciaio.

L'alluminio metallico puro cristallizza nel reticolo FCC non garantendo le proprietà meccaniche necessarie alle applicazioni in cui è richiesto a causa di elevata duttilità e basse tensioni di snervamento e rottura. Risulta conveniente dunque sottoporre il materiale ad alligazione e specifici trattamenti termici per ottenere leghe con proprietà adeguate pur mantenendo la leggerezza tipica e vantaggiosa propria di questo materiale. Le proprietà di leggerezza e resistenza paragonabile a quella dei più comunemente utilizzati acciai hanno consentito l'utilizzo in campo edile per la progettazione di strutture solide ma al contempo leggere ed hanno favorito il processo di ricerca continua nell'alleggerimento di mezzi stradali e aeronautici al fine di portare ad un notevole risparmio in termini di combustibile.

Altro pregio delle leghe di alluminio è la resistenza a corrosione, l'alluminio infatti tende a formare naturalmente con l'ossigeno uno strato di passivazione di allumina che impedisce la diffusione degli agenti corrosivi all'interno del pezzo. Quest'ultima proprietà è tipica dell'alluminio puro e diminuisce con l'aumentare della presenza degli elementi in lega inseriti per migliorare le proprietà meccaniche.

Le leghe di alluminio sono caratterizzate inoltre da eccellente conduttività elettrica, termica e il carattere non ferromagnetico. Da queste proprietà deriva l'impiego in cavi di trasmissione elettrica, scambiatori di calore e altre applicazioni in ambito elettronico.

Infine l'elevata riflettività e la non tossicità hanno reso l'alluminio adatto per applicazioni ottiche e per prodotti legati al mondo del packaging alimentare.

2.1.2 Effetto degli elementi leganti nelle leghe di alluminio

Le leghe di alluminio presentano in linea di massima le qualità dell'elemento da cui derivano. In termini di proprietà meccaniche invece l'aggiunta di elementi alliganti risulta essere necessaria per ottenere un incremento delle prestazioni rispetto all'alluminio puro. Ogni elemento aggiunto alla composizione chimica della lega va a determinare un effetto diverso nel comportamento complessivo del materiale:

- **Silicio:** è uno tra gli elementi più utilizzati all'interno delle leghe di alluminio. La sua presenza aumenta notevolmente la fluidità della lega favorendo la colabilità all'interno dello stampo e il miglior riempimento anche delle sezioni più sottili. Questa proprietà è dovuta al fatto che con il 13% di silicio in lega l'eutettico è spostato a temperature più basse. Come si evince dal diagramma di stato in Figura 15 il silicio presenta una solubilità nell'alluminio molto bassa, pertanto esso tende a precipitare nella sua forma pura sviluppando cristalli di durezza molto elevata che garantiscono un rafforzamento della lega e un innalzamento della resistenza ad abrasione.

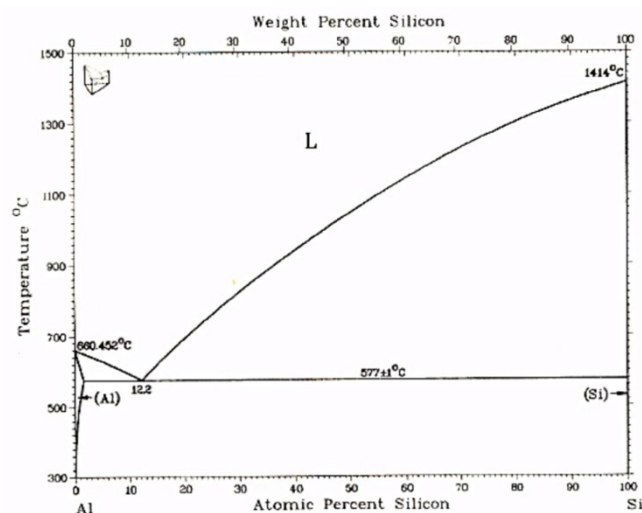


Figura 15 - Diagramma Al-Si

In particolare è stato osservato che quest'ultima aumenta fino a percentuali intorno al 10% di silicio mentre oltre tende a diminuire. Altri effetti dovuti al silicio come elemento alligante sono l'ulteriore alleggerimento fino a $2,4 \text{ g/cm}^3$ e la diminuzione del coefficiente di espansione termica.

- **Rame:** la solubilità di questo elemento è molto maggiore rispetto a quella del Silicio, esso forma la fase intermetallica Al_2Cu che incrementa la resistenza della lega ad alte temperature impedendo il fenomeno di *climb* delle dislocazioni tipico del *creep*. Aumenta inoltre la colabilità grazie alla minore affinità del rame con l'ossigeno. Difetto delle leghe di alluminio contenenti il rame è la forte diminuzione della resistenza a corrosione, specialmente in condizioni di sollecitazioni SCC (*stress corrosion cracking*).
- **Magnesio:** con la presenza del magnesio in lega si va a migliorare la caratteristica di bassa densità confermando la leggerezza tipica delle leghe di alluminio. L'aggiunta del magnesio consente di incrementare la resistenza a corrosione, già elevata, del materiale grazie alla sua affinità con l'ossigeno. In questo modo si facilita la formazione del layer passivato a protezione della superficie scoperta del pezzo. Se aggiunto insieme al silicio, il magnesio forma fasi Mg_2Si che rafforzano la lega.
- **Manganese:** l'aggiunta di questo elemento superiore allo 0,5% in peso nelle leghe di alluminio consente di aumentare la resistenza a snervamento e a trazione senza diminuire la duttilità. Migliorano inoltre resistenza a fatica a basso numero di cicli e resistenza a corrosione. Grazie alla presenza del manganese i pezzi deformati plasticamente a freddo subiscono un fortissimo rafforzamento per incrudimento.
- **Zinco:** analogamente al manganese lo zinco porta ad un rafforzamento per incrudimento successivo alla deformazione plastica a freddo. Solitamente questo elemento è aggiunto insieme al magnesio nelle leghe Al-Zn-Mg note per le caratteristiche meccaniche più elevate tra le leghe di alluminio. L'azione di zinco e magnesio consente di aumentare la resistenza e la durezza. La presenza dello zinco rende la lega meno sensibile a fenomeni di tensocorrosione successivamente a trattamenti stabilizzanti specifici. Un'altra proprietà legata alla presenza dello zinco in lega è l'autotemperabilità.

Oltre a quelli già descritti possono essere aggiunti altri elementi alle leghe di alluminio come lo stronzio, il sodio, il calcio, l'antimonio che vanno a modificare la struttura del materiale. Altro esempio il titanio, aggiunto in piccole quantità, porta ad un affinamento del grano e all'aumento della resistenza a corrosione.

Il ferro nelle leghe di alluminio forma delle fasi intermetalliche complesse che garantiscono un rafforzamento della lega, soprattutto ad alte temperature. Tuttavia questo elemento è presente come impurità indesiderata perché provoca un crollo della duttilità e un infragilimento della microstruttura.

2.1.3 Leghe da fonderia e leghe da deformazione plastica

Le leghe di alluminio si dividono, a seconda delle loro proprietà, in due sottocategorie. Sono adatte ad essere colate quando la temperatura di fusione è contenuta, ovvero inferiore ai 660°C e consentono una discreta facilità di lavorazione per deformazione quando hanno la tipica struttura FCC nota per conferire particolare duttilità. Le leghe di alluminio dunque si suddividono in leghe da fonderia e da deformazione plastica.

Le leghe da fonderia consentono di ottenere il pezzo nella forma finale, al netto di lavorazioni di finitura, attraverso processo di colata all'interno di uno stampo. Questo tipo di leghe consente di effettuare processi *near net shape* (colata in sabbia, a cera persa, in conchiglia permanente, pressocolata, ecc.) ottenendo pezzi di geometrie complesse e con ottima finitura superficiale tanto più è alta la fluidità dell'alluminio legata a sua volta alla presenza del silicio in lega. Le condizioni vantaggiose del processo di colata spesso non coprono le numerose limitazioni che fanno propendere la scelta verso altri metodi di produzione. Il processo di solidificazione non è sempre prevedibile a causa di ritiri e porosità all'interno dei getti che generano discontinuità e distorsioni compromettendo la qualità del pezzo finale. Solo attraverso un laborioso controllo dei parametri di processo si possono contenere le difettosità pur ottenendo mediamente proprietà meccaniche inferiori rispetto alle leghe da deformazione plastica.

Le leghe destinate alla deformazione plastica sono colate sotto forma di billette o lingotti, pertanto semilavorati, in seguito sottoposti a processi di forgiatura, estrusione, laminazione per ottenere lastre, figli, barre a sezioni differenti e prodotti semifiniti lavorati in stampi aperti o chiusi. A queste operazioni spesso segue un'ulteriore fase

di formatura in modo da ottenere geometrie più complesse. Le azioni di deformazione affina la grana portando ad un aumento considerevole delle proprietà meccaniche della lega. Al contrario nei processi di sola fonderia non c'è lo stesso controllo della dimensione e distribuzione del grano con risultati più grossolani e dunque meno prestanti a livello meccanico. Lo svantaggio della deformazione plastica si rileva della direzionalità della struttura che risulta orientata lungo una direzione preferenziale legata ai parametri di lavorazione; tale anisotropia a livello macroscopico porta ad avere proprietà meccaniche diverse a seconda dell'orientamento delle fibre all'interno del pezzo.

Le due diverse tipologie di leghe di alluminio possono essere confrontate anche sul lato economico, le leghe da deformazione plastica infatti sono caratterizzate da costi più elevati in funzione dei numerosi step di produzione e le lavorazioni di formatura alle quali sono sottoposte. In egual modo incrementano i costi nel momento in cui si sfrutta la superplasticità di determinate leghe frutto di composizioni chimiche ben regolate e sottoposte a trattamenti termomeccanici onerosi che consentono di ottenere grani equi-assici molto fini ($<10\ \mu\text{m}$) che consentono deformazioni del materiale fino al 1000% senza che il materiali mostri *necking* o frattura.

L'industria dell'alluminio attuale fa riferimento per il 75% alla seconda delle classi elencate, ovvero le leghe da deformazione plastica.

Nel corso del tempo le leghe di alluminio hanno sostituito in molte applicazioni i materiali tradizionali per le loro proprietà di leggerezza e facilità nella lavorazione. In particolare un settore particolarmente toccato è quello dei trasporti, via terra e via aria. Un esempio tipico è l'aereo in cui la combinazione di leggerezza e proprietà meccaniche trovano l'apice tecnologico.

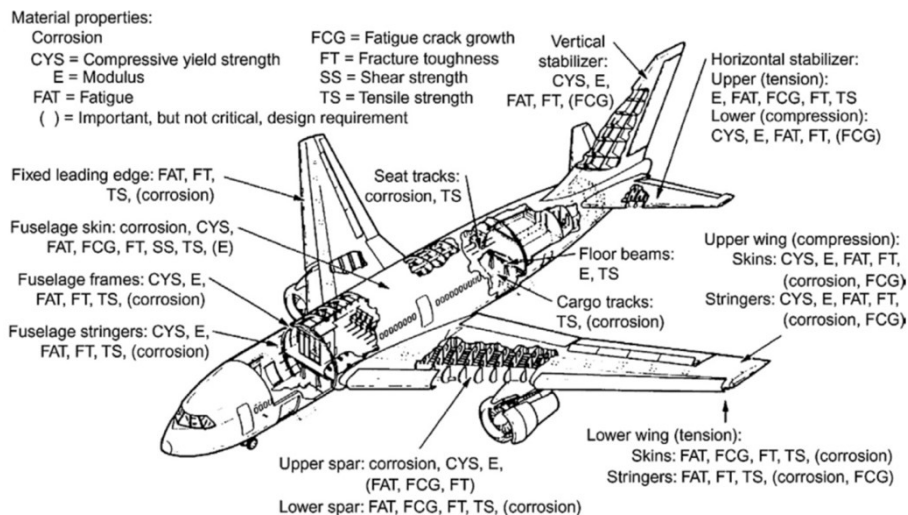


Figura 16 - Sollecitazioni delle varie parti di un velivolo

In Figura 16 si possono vedere le varie sollecitazioni alle quali è sottoposto tipicamente un velivolo. In fase di progettazione dunque vanno valutate tali sollecitazioni meccaniche, termiche, cicli a fatica e fenomeni corrosivi con la necessità fondamentale di ridurre al minimo il peso. Le condizioni di carico sono da considerarsi in tutti i frangenti del funzionamento del mezzo, un esempio sono le parti superiori delle ali, sottoposte a trazione quando l'aereo è fermo e a compressione durante il volo.

Dal secondo dopoguerra le leghe di alluminio, grazie alla loro versatilità, hanno costituito un'ottima soluzione nel campo di impiego aeronautico. Le leghe da deformazione plastica, grazie alle superiori proprietà meccaniche, sono i materiali maggiormente usati per la realizzazione delle strutture primarie dei velivoli.

2.1.4 Classificazione delle leghe di alluminio

Definite le due grandi macro categorie di leghe da fonderia e da deformazione plastica si può procedere ad una classificazione e nomenclatura più specifica che tiene in considerazione gli elementi presenti all'interno del materiale.

La distinzione e nomenclatura consiste in un numero di quattro cifre, ognuna delle quali rappresenta una caratteristica.

Considerando ad esempio le leghe da deformazione plastica il primo numero è assegnato in corrispondenza all'elemento, o elementi, maggiormente presenti dopo l'alluminio per identificarne la famiglia di riferimento. Possibili variazioni dalla lega originale sono indicate dalla seconda cifra che è 0 se il materiale non ha subito modifiche o, al contrario, un numero compreso tra 1 e 9. Le ultime due cifre identificano le leghe specifiche all'interno del gruppo indicato dal primo numero.

Per quanto riguarda l'alluminio puro le ultime due cifre indicano il grado di purezza del materiale.

Alloy	Main alloying element
1xxx	Mostly pure aluminum; no major alloying additions
2xxx	Copper
3xxx	Manganese
4xxx	Silicon
5xxx	Magnesium
6xxx	Magnesium and silicon
7xxx	Zinc
8xxx	Other elements (e.g., iron or tin)
9xxx	Unassigned

Figura 17 - Designazione delle leghe di alluminio

La designazione delle leghe da fonderia è molto simile alla precedente, la nomenclatura è fatta con un numero di tre cifre seguito da un quarto numero decimale che indica il formato con cui la lega viene fornita, se lingotto (1,2) o getto (0).

La prima cifra indica sempre il gruppo di appartenenza indicando l'elemento più presente in lega dopo l'alluminio mentre la seconda e terza, come in precedenza, identificano univocamente la lega o il grado di purezza per l'alluminio puro.

Un'ulteriore suddivisione nella classificazione delle leghe di alluminio è rappresentata dallo stato di fornitura post-trattamento termico. In ambito commerciale sono identificate con una sigla che evidenzia le ultime lavorazioni subite. *L'Aluminum Association* ha definito un sistema di designazione (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) che consiste in una lettera seguita da uno o più numeri:

Suffix letter (indicates basic treatment or condition)	First suffix digit (indicates secondary treatment)	Second suffix digit (indicates residual hardening)
F, as fabricated		
O, annealed/wrought products only	1, cold-worked only	2, 1/4 hard
H, cold-worked/work-hardened	2, cold-worked and partially annealed	4, 1/2 hard
	3, cold-worked and stabilized	6, 3/4 hard
		8, hard
		9, extra hard
W, solution heat-treated		
T, heat-treated/stable	1, partial solution plus natural aging	
	2, annealed cast products only	
	3, solution plus cold work	
	4, solution plus natural aging	
	5, artificially aged only	
	6, solution plus artificial aging	
	7, solution plus stabilizing	
	8, solution plus cold work and artificial aging	
	9, solution plus artificial, aging and cold work	

Tabella 1 - Designazione degli stati di fornitura delle leghe di alluminio

- **F** (*fabricated*) – Le proprietà della lega dipendono solamente dalle fasi di colata e processo, essa non ha subito trattamenti termici né incrudimento e si presenta come grezzo di lavorazione.
- **O** (*annealed*) – La lega ha subito un trattamento di ricottura e presenta scarse caratteristiche meccaniche a favore di una elevata duttilità e stabilità dimensionale. Questo tipo di materiali solitamente è sottoposto a lavorazione successiva di formatura quindi è una terminologia tipica di leghe da deformazione plastica.
- **H** (*strain hardened*) – La lega ha subito un rafforzamento per incrudimento. La lettera è sempre seguita da due o più cifre, la prima indica le operazioni subite a seguito dell'incrudimento (nessuna, ricottura, stabilizzazione, distensione, ecc.) mentre la seconda indica il grado di incrudimento raggiunto.

- **W** (*solution heat treated*) – Si applica a leghe che hanno subito trattamento di solubilizzazione e invecchiano a temperatura ambiente. Solitamente la lettera è seguita da dei numeri che indicano il periodo di invecchiamento naturale.
- **T** (*thermally treated*) – Questa terminologia è utilizzata per leghe che hanno subito trattamento termico completo di solubilizzazione, tempra e invecchiamento. La lettera è seguita da più cifre in cui la prima fa riferimento alle specifiche operazioni eseguite sul materiale e la seconda indica eventuali variazioni del primo trattamento che hanno alterato le proprietà della lega.

2.1.5 Trattamenti termici

Per le leghe di alluminio il trattamento termico [22] rappresenta una fase fondamentale nel processo di produzione industriale. Con appositi cicli di riscaldamento e raffreddamento è possibile variare le proprietà meccaniche, la microstruttura e gli stress residui.

I principali trattamenti eseguiti sull'alluminio sono analoghi a quelli praticati sulle altre leghe metalliche; spesso il pezzo grezzo è soggetto a ricottura e omogeneizzazione per ridurre gli effetti delle micro-segregazioni facilitando le lavorazioni successive.

Per incrementare le caratteristiche meccaniche sono necessarie altre tipologie di trattamento sia per le leghe da fonderia che per quelle da deformazione plastica che si suddividono ulteriormente in due sottocategorie, leghe che possono essere sottoposte a rafforzamento tramite trattamento termico (*heat-treatable alloys*) e leghe che non subiscono variazioni se sottoposte a riscaldamenti e raffreddamenti controllati. Queste ultime (*non-heat-treatable alloys*) possono essere rinforzate tramite deformazione plastica che genera incrudimento.

Tornando alle più interessanti leghe *heat-treatable* si spiega che il rafforzamento del materiale avviene attraverso fenomeni di precipitazione di fasi intermetalliche. Il trattamento termico dell'alluminio si basa sul concetto di solubilità di alcune fasi contenute nella matrice alluminosa, con l'innalzamento della temperatura la solubilità di queste fasi aumenta e consente successivamente, moderando la velocità di raffreddamento, di congelare la struttura con queste particelle distribuite in modo noto.

Il trattamento di indurimento prevede tre fasi:

1. **Solubilizzazione:** La lega viene portata ad una temperatura tale da permetterà la formazione di una soluzione solida. Con il crescere della temperatura infatti aumenta la solubilità degli elementi alliganti che vanno a redistribuirsi all'interno della matrice. La lega è mantenuta alla temperatura detta di "solubilizzazione" per un periodo di tempo idoneo a garantire l'ottenimento di una soluzione solida omogenea. In questa fase è opportuno un attento controllo della temperatura per non incorrere in fenomeni di *over heating* in cui si formano frazioni di

liquido a causa di innalzamenti locali di temperatura al di sopra della temperatura eutettica. Le zone più a rischio per questo fenomeno sono i bordi grano in cui si accumulano le impurità che possono determinare un abbassamento della temperatura alla quale si forma il liquido.

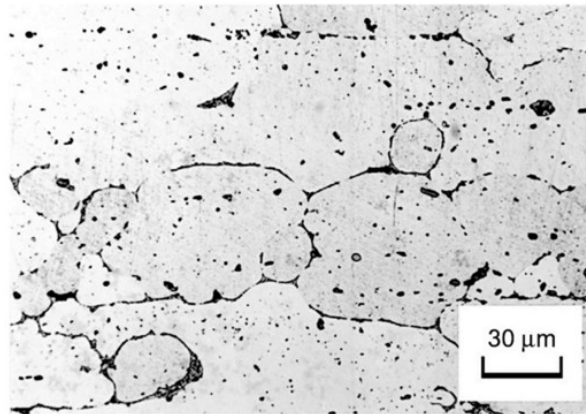


Figura 18 - Formazione di liquido lungo i bordi grano dovuto a overheating

La temperatura deve però essere mantenuta la più alta possibile per massimizzare l'effetto del trattamento, questo concetto è evidente nel momento in cui si vanno ad analizzare le proprietà in funzione della temperatura di solubilizzazione. Dalla letteratura [23] è noto che più la temperatura si avvicina all'eutettico e più crescono le prestazioni della lega.

Solution-treating temperature		Tensile strength		Yield strength	
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi
6061-T6 sheet 1.6 mm (0.064 in.) thick					
493	920	301	43.7	272	39.4
504	940	316	45.8	288	41.7
516	960	333	48.3	305	44.3
527	980	348	50.5	315	45.7
2024-T4 sheet 0.8 mm (0.032 in.) thick					
488	910	419	60.8	255	37.0
491	915	422	61.2	259	37.5
493	920	433	62.8	269	39.0
496	925	441	63.9	271	39.3

Tabella 2 - Valori della resistenza a trazione e snervamento in funzione della T di solubilizzazione

2. **Tempra:** di seguito alla solubilizzazione segue la fase più difficile da controllare del trattamento termico. Con la tempra si effettua un rapido raffreddamento del materiale dalla temperatura di solubilizzazione fino a temperatura ambiente con l'obiettivo di congelare la soluzione solida sovrassatura ottenuta dopo la prima fase del trattamento. La velocità del raffreddamento impedisce agli atomi di soluto e ai siti reticolari vacanti di migrare verso il bordo grano. Se non avvenisse questo congelamento non sarebbe garantita la formazione di precipitati e l'assenza di vacanze renderebbe più difficili i processi diffusivi a basse temperature. A basse velocità inoltre, come si vede in Figura 19, non si ottiene l'innalzamento delle proprietà meccaniche [24].

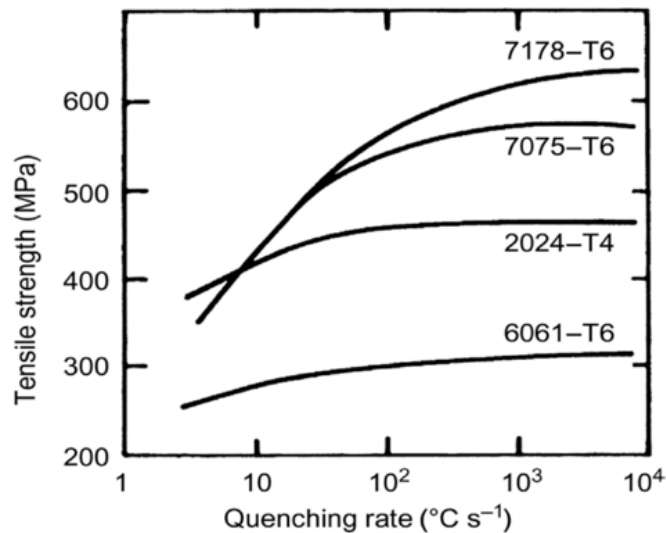


Figura 19 - Resistenza a trazione in funzione della velocità di raffreddamento

La presenza di impurità a bordo grano provoca una diminuzione della tenacità e la tendenza alla corrosione intergranulare. La velocità di raffreddamento, al contempo, non può essere troppo elevata per escludere il rischio di elevati gradienti termici che generano tensioni residue all'interno del materiale. Queste producono instabilità dimensionali che si traducono in distorsioni macroscopiche del componente, soprattutto se questo è caratterizzato da forme complesse e sezioni sottili. Ne consegue che è opportuno trovare un compromesso nella velocità di raffreddamento per scongiurare le problematiche

appena elencate. Spesso come mezzo temprante è utilizzata l'acqua ad una temperatura prossima a quella di ebollizione per le sue proprietà di elevato scambio termico. Nei casi in cui è necessario un raffreddamento più lento si possono utilizzare: olio, un bagno di sali fusi o soluzioni organiche spesso anche in forme di vapore in modo da limitare l'insorgere di tensioni residue.

3. **Invecchiamento:** Ultimo passaggio del trattamento termico, in questa fase avviene il vero e proprio rafforzamento del materiale dovuto alla precipitazione di fasi secondarie intermetalliche. Le tempistiche e le temperature dipendono dalla tipologia di lega, alcune si rafforzano in poche ore, altre necessitano di settimane o persino anni. Per accelerare il trattamento alcune leghe possono subire un trattamento a temperatura "artificiale"; questo metodo si differenzia dal così detto invecchiamento "naturale" che avviene a temperatura ambiente. Durante l'invecchiamento gli atomi di soluto presenti nella soluzione sovra satura sono soggetti a diffusioni verso zone ad alta energia all'interno del reticolo. In alcune aree si genera un accumulo di questi atomi che provoca una distorsione reticolare, queste zone sono dette di *Guinier-Preston (GP zones)*. Queste zone impediscono lo scorrimento delle dislocazioni e sono sede di accumulo degli atomi fino ad arrivare alla formazione di precipitati coerenti con il reticolo della matrice alluminosa. Analizzando ad esempio le leghe Al-Cu nel corso dell'invecchiamento si formano nelle zone di GP dei precipitati coerenti θ'' che hanno una struttura molto simile a quella della fase Al_2Cu . La distorsione reticolare all'interfaccia provoca un rallentamento delle dislocazioni che genera un primo rafforzamento del materiale. Con il procedere della diffusione i precipitati θ'' accrescono e tendono a trasformarsi nella fase di transizione θ' che provoca un ulteriore aumento delle proprietà meccaniche per via della sua natura semi-coerente. La semi-coerenza blocca con più efficacia il moto delle dislocazioni producendo il massimo rafforzamento e portando all'apice la qualità del trattamento. Al termine del processo, soprattutto nei casi

di processi rapidi condotti ad elevate temperature, è necessario fare attenzione al fenomeno del super-invecchiamento in cui si ottiene la formazione della fase di equilibrio Al_2Cu (θ) che ha interfaccia incoerente e può essere oltrepassato dalle dislocazioni; ciò comporterebbe una diminuzione delle proprietà meccaniche appena ottenute.

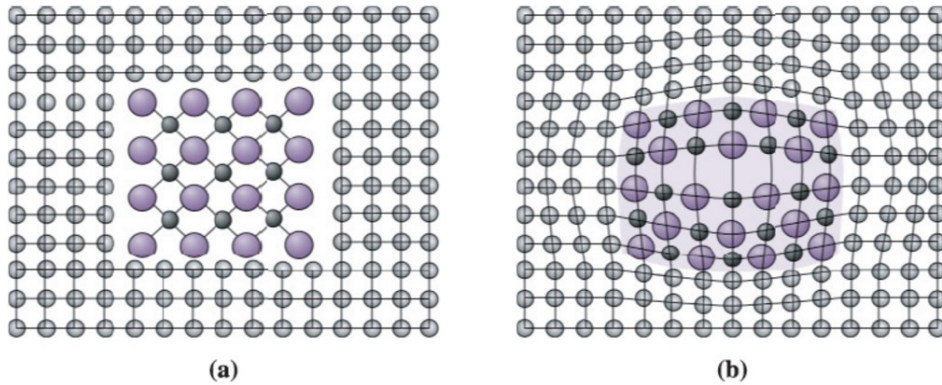


Figura 20 - Rappresentazione di un precipitato incoerente (a) e coerente (b)

Risulta dunque evidente come il rafforzamento della lega dipenda dai parametri di processo di temperatura e tempo.

2.2 La lega di Alluminio 6061

Le leghe di alluminio della serie AA6061 (designazione UNS A96061) [25] fanno parte delle leghe 6XXX quindi sono caratterizzate dalla presenza di Mg e Si come principali elementi in lega dopo l'alluminio. Questo materiale è stato sviluppato a partire dal 1935 con il nome *Alloy 61S* ed è caratterizzato da buone proprietà meccaniche e buona saldabilità.

Si definisce appartenente a questa serie un materiale che rispetta le seguenti forcelle nell'analisi chimica:

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Mn	Altri elementi	
									each	Tot.
bal.	0.8 - 1.2	0.4 - 0.8	max 0.7	0.15 - 0.4	0.04 - 0.35	max 0.025	max 0.025	max 0.15	max 0.05	max 0.15

Tabella 3 - Forcelle analisi chimica serie AA6061

Rappresenta una delle leghe di alluminio più comuni per uso generico ed è disponibile nel mercato nei seguenti stati di fornitura:

- **6061-O**

Materiale allo stato ricotto ottenuto tipicamente con un riscaldamento a 415°C per un periodo di circa 2-3 ore. La lega così trattata è caratterizzata da carico rottura non superiore a 150 MPa e uno snervamento massimo di 110 MPa. L'allungamento prima del cedimento si attesta tra il 10% e il 18%.

- **6061-T4**

Materiale fornito dopo trattamento di solubilizzazione e successivo invecchiamento naturale. La lega è caratterizzata da carico di rottura di almeno 180 MPa e carico di snervamento di almeno 110 MPa. L'allungamento tipico va dal 10% al 16%.

○ **6061-T6**

Il materiale fornito dopo tempra di tipo T6 è stato trattato termicamente con solubilizzazione e successivo invecchiamento artificiale (Figura 21) in modo da ottenere il massimo indurimento per precipitazione e di conseguenza la massima resistenza allo snervamento.

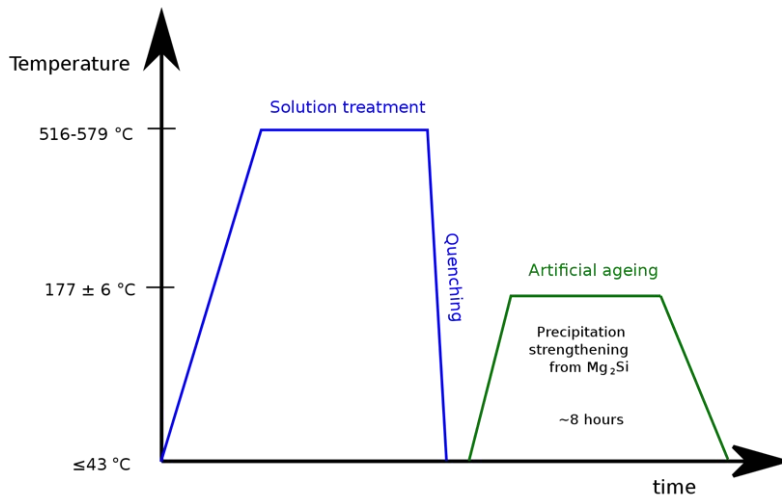


Figura 21 - Trattamento termico T6

La lega è caratterizzata da carico di rottura di almeno 260 MPa e carico di snervamento di almeno 240 MPa. Un allungamento tipico per sezioni spesse è all'incirca del 10%.

Si evidenzia una frequente variabile di questo stato di fornitura denominata 6061-T651 in cui tra il trattamento di solubilizzazione e l'invecchiamento artificiale viene effettuata una distensione.

I diversi trattamenti termici effettuati con questa lega permettono di controllare la dispersione dei precipitati Mg₂Si all'interno della matrice di alluminio. A causa della presenza di ferro, manganese e cromo spesso all'interno del materiale si formano anche altre fasi secondarie come ad esempio Fe₂Si₂Al₉, (Fe, Mn, Cr)₃SiAl₁₂.

La dimensione dei grani dipende anch'essa dai trattamenti termici ma soprattutto dalle tecniche di lavorazione. Diverse sollecitazioni durante le lavorazioni possono causare differenze nella dimensione del grano nelle sezioni trasversali del componente.

In base ai diversi impieghi, la lega di alluminio 6061 si presta a diverse lavorazioni di seguito elencate:

- **Saldatura**, il materiale in esame è altamente stabile utilizzando saldatura TIG o MIG. Tipicamente dopo il processo di saldatura le proprietà vicino alla zona termicamente alterata sono quelle del 6061-T4 con una perdita di resistenza del 40%. Il materiale infatti dopo alterazione termica invecchia naturalmente nei giorni e settimane successive e recupera parte della resistenza. Per rimediare in modo più efficace a questo problema l'intero pezzo può essere ritrattato termicamente per ripristinare le proprietà precedenti -T6.
- **Estrusione**, la lega 6061 è spesso utilizzata nella produzione di estrusi, forme strutturali lunghe a sezione sagomata costante.
- **Forgiati**, la lega 6061 è adatta alla formatura a caldo, la billetta viene riscaldata in forno e forgiata in stampi chiusi ma più frequentemente aperti per formare barre piatte o tonde, anelli, blocchi, dischi o forme speciali e personalizzate.
- **Getti**, questo tipo di lega non è tradizionalmente usata per colata a causa del basso contenuto di silicio che influisce sulla fluidità. Può essere colata utilizzando il metodo a centrifuga, ideale per componenti assialsimmetrici che superano i limiti nelle altre lavorazioni.

2.2.1 Campi di impiego

Le leghe di Alluminio AA6061 sono molto utilizzate per applicazioni strutturali grazie alle resistenze medio-alte raggiunte dopo il trattamento termico. Gli impieghi più frequenti riguardano la realizzazione di bulloni, rivetti e profili di infissi, vanno inoltre a costituire parti di strutture civili come ponti, torri, piloni e infine sono sempre di più scelte per le parti strutturali dei mezzi di trasporto, telai di camion, strutture navali, carrozze ferroviarie, applicazioni aeronautiche.

Ed è proprio in quest'ultima applicazione che si focalizza l'approfondimento esposto in questa tesi. *Siderforgerossi Group S.p.A.* sta entrando nel mercato dell'Industria aerospaziale realizzando una vasta gamma di prodotti, tra cui anelli forgiati in alluminio AA6061 per clienti che producono motori a turboventola per uso civile e militare.

Il componente preso in esame è impiegato nella parte anteriore di un motore CFM56 [26] in corrispondenza delle palette ovvero nella parte fredda del meccanismo.

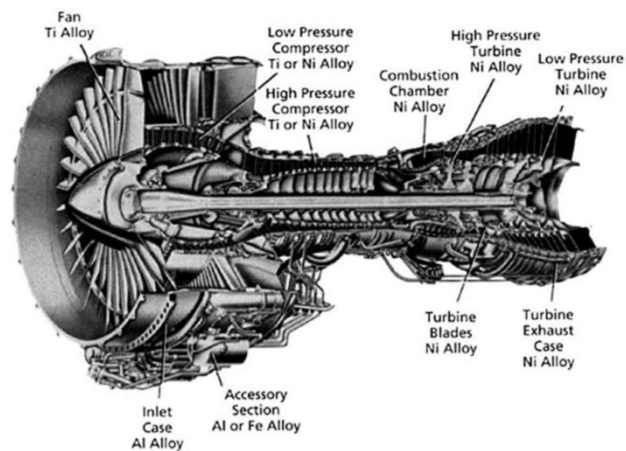


Figura 22 - Materiali all'interno di un motore aeronautico

Questo tipo di motore fa parte della serie *CFM International CFM56*, con designazione militare USAF F108, che si riferisce a motori a turboventola con alto rapporto di by-pass per uso civile e militare. I motori che rientrano in questa categoria sono dotati di ventola (*fan*) con tre o quattro stadi di compressione assiale (*booster*) montati sull'albero di bassa pressione mentre il compressore di alta pressione (*HPC*),

composto inizialmente da nove stadi, è stato migliorato nel 2007 con un re-design delle palette per ottenere lo stesso rapporto di compressione con soli sei stadi. Le palette sono montate sul disco con incastrì a coda di rondine e possono essere sostituite in poco tempo senza dover sbarcare l'interno motore. Ne risulta una gamma di propulsori caratterizzati da valori di spinta dagli 82 kN ai 151 kN.

Il primo esemplare di CFM56 fu testato al banco nel 1974 dopo tre anni di sviluppo e mediazione per trovare un'intesa commerciale per l'esportazione di informazioni e tecnologie ritenute strategiche da parte degli Stati Uniti. Fu installato e provato in volo la prima volta nel 1977 al posto di uno dei quattro motori di un McDonnell Douglas YC-15 ed ebbe la sua consacrazione in campo civile quando la Boeing decise di adottarlo per motorizzare la versione 737-300. Nel 2011 sono stati consegnati 5000 esemplari di 737 che montavano motori CFM56. Nella sua variante CFM56-5C invece è diventato il motore standard degli Airbus A340-200-300 ed Airbus A320.

Anche in campo militare, con la designazione USAF F108, questo motore ha rimpiazzato a partire dal 1980 il Pratt & Whitney JT3D sui KC-135 Stratotanker nella loro nuova variante denominata KC-135R.

Ad oggi questo prodotto è tra i più comuni motori a turboventola per l'aviazione civile mondiale con una produzione che ha ormai superato le 20.000 unità.

Capitolo 3

3.1 Case Study – Anello forgiato AA6061

Il lavoro sperimentale di questo progetto di tesi consiste nella proposta di trattamenti termici ulteriori per valutare le variazioni delle proprietà meccaniche di una lega della serie AA6061 a partire da un pezzo di partenza sacrificale già precedentemente trattato con solubilizzazione a $535 \pm 5^\circ\text{C}$ e invecchiamento per 8 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$.

L'intero processo di caratterizzazione della lega è svolto secondo le direttive *PRI-Nadcap* in modo tale da documentare dettagliatamente alcuni aspetti del percorso che il *Laboratorio Forgerossi Research* deve compiere in funzione dell'accreditamento.

Il pezzo messo a disposizione da *Siderforgerossi Group S.p.a.* è un anello sacrificale in alluminio 6061 per impieghi aeronautici.



Figura 23 - Anello forgiato sacrificale in alluminio della serie AA6061

Il componente in esame è ottenuto attraverso un processo di laminazione a caldo fino ad ottenere le specifiche dimensionali richieste in Figura 24.

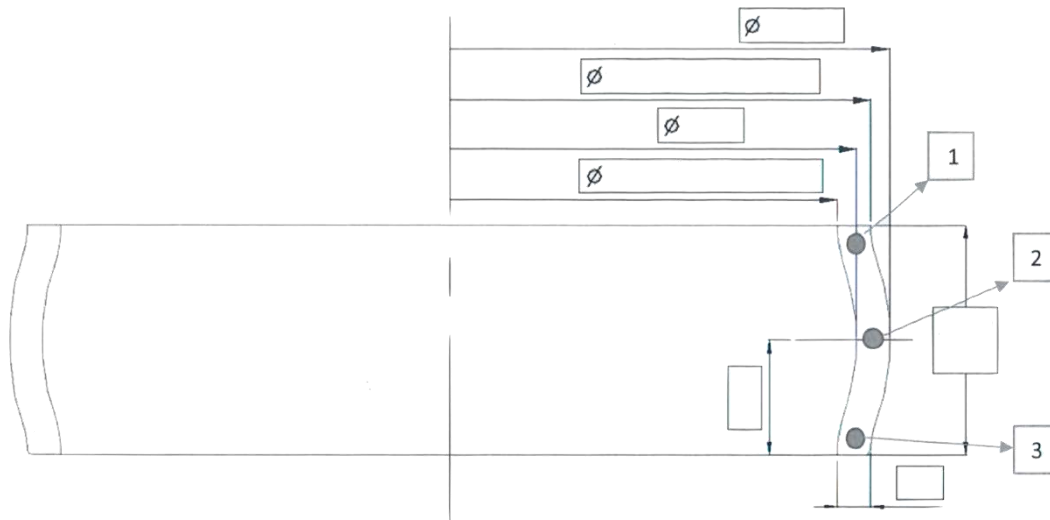


Figura 24 - Specifiche dimensionali (quote non indicate)

Nella Figura 25 è possibile vedere l'anello e le principali parti del laminatoio che danno forma al prodotto:



Figura 25 - Pezzo nel laminatoio

Potrebbe risultare utile per l'azienda ritrattare dei pezzi per migliorarne le caratteristiche meccaniche. In questa tesi vengono proposte due differenti ipotesi:

1. Ciclo di invecchiamento ulteriore di 2 ore e 4 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$ su pezzo già precedentemente solubilizzato per 3 ore a $535 \pm 5^\circ\text{C}$ e invecchiato 8 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$.
2. Nuova solubilizzazione di 3 ore a $555 \pm 5^\circ\text{C}$ e invecchiamento di 8 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$ su pezzo di partenza già trattato.

3.1.1 Procedura sperimentale

A partire da un anello precedentemente trattato e disponibile a magazzino si ricavano con una sega a nastro delle fette di dimensione tale da poter ricavare poi delle prove di trazione tangenziali alla circonferenza e un pezzo utile all'esame micrografico e di durezza.

Dall'anello sono ricavati cinque spezzoni uguali, due per caratterizzare il materiale di base per il programma *Nadcap*, due per effettuare gli invecchiamenti di 2 e 4 ore e una fetta che verrà ri-solubilizzata e invecchiata nuovamente.

I pezzi sono stati denominati con le seguenti sigle:

- **1A** → Pezzo utilizzato per la caratterizzazione del materiale e per la qualifica come IRR (*Internal Round Robin*) per l'accreditamento *Nadcap*.
- **1B** → Pezzo utilizzato per la caratterizzazione del materiale e per la qualifica come IRR (*Internal Round Robin*) per l'accreditamento *Nadcap*.
- **2i_2h** → Pezzo sottoposto ad un ulteriore ciclo di invecchiamento di 2 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$.
- **3i_4h** → Pezzo sottoposto ad un ulteriore ciclo di invecchiamento di 4 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$.
- **4si_8h** → Pezzo sottoposto a solubilizzazione alla temperatura di $555 \pm 5^\circ\text{C}$ per 3 ore e successivo invecchiamento di 8 ore a $175 \pm 3^\circ\text{C}$.

Successivamente, da ogni spezzone, vengono ricavati rispettivamente 3 provini di trazione ad osso di cane con diametro 12,5 mm e tratto utile 50 mm da testare secondo normative ASTM E8/E8M-16a e UNI EN ISO 6892-1 e una fetta che verrà utilizzata per le prove di durezza secondo normative ASTM E10-18 e UNI EN ISO 6506-1:2015 con metodo Brinell HBW2,5/62,5. La fetta per le durezze viene impiegata anche per analisi macrografica e micrografica.

Infine saranno messe a confronto le proprietà meccaniche risultanti dai diversi trattamenti con le proprietà meccaniche di partenza e verranno tratte le opportune conclusioni.

3.2 Qualifica del materiale – Requisiti Nadcap

In modo propedeutico all'accreditamento del *Laboratorio Forgerossi Research* secondo le direttive *Nadcap*, si seguono le indicazioni riportate nel documento AC7101/1 REV.G.

Il documento in esame definisce i limiti e criteri da rispettare in previsione di un Audit erogato dall'ente *PRI-Nadcap (Audit Criteria For Material Testing Laboratories – General Requirements For All Laboratories)*.

Questa versione, valida per i Laboratori di prova che intendono accreditarsi dopo il 5 Maggio 2019, è stata sviluppata dal *Nadcap Materials Testing Laboratories Task Group (MTLTG)* per la valutazione delle strutture di prova per il programma di accreditamento *Nadcap Materials Testing Laboratories*. Sebbene i criteri nella lista possano apparire ridondanti rispetto ai criteri ISO/IEC 17025 e/o 9100, il Task Group ha stabilito che gli auditor debbano valutare scrupolosamente le conformità dal punto di vista aerospaziale.

Il documento si sviluppa in 13 punti (più 6 appendici A, B, C, D, E, F) come Checklist ad uso del laboratorio e dell'auditor:

1. SCOPE
2. ACCREDITATION REQUIREMENTS
3. FACILITY (GENERAL)
4. QUALITY SYSTEM DOCUMENT (MANUAL)
5. QUALITY ASSURANCE FUNCTION (Q.A.)
6. TRAINING AND QUALIFICATION OF PERSONNEL
7. EVALUATION, APPROVAL, AND SURVEY OF
SUBCONTRACTORS
8. PROCEDURE SYSTEM
9. EQUIPMENT CALIBRATION AND MAINTENANCE
10. SPECIMEN IDENTIFICATION ND TRACKING SYSTEM
11. REPLACEMENT TESTINGND RE-TESTING
12. CERTIFICATE OF TEST/CERTIFICATE OF
CONFORMANCE/TEST REPORTS

13. PROFICIENCY TESTING AND INTERNAL ROUND ROBIN REQUIREMENT

- A. APPENDIX A – *Additional questions for captive Laboratories certified to 9100 in lieu of ISO/IEC 17025*
- B. APPENDIX B – *Proficiency Testing and Internal Round Robin frequency requirements*
- C. APPENDIX C – *Selection of a Proficiency Test (PT) provider*
- D. APPENDIX D – *Specific testing protocol for Internal Round Robins*
- E. APPENDIX E – *General testing protocol for Internal Round Robins (IRR) and Proficiency Testing (PT)*
- F. APPENDIX F – *Calibration frequency (maximum)*

Si focalizza l'attenzione sul tredicesimo punto, che prevede la partecipazione a *Proficiency Test (PT)* per verificare le misure fatte dal laboratorio e richiede che siano prodotti degli *Internal Round Robins (IRR)*.

La partecipazione ai *Proficiency Test (PT)* è documentata secondo le indicazioni riportate nell'APPENDIX C, in cui si spiega anche la loro funzione. I PT sono utilizzati per verificare le capacità del laboratorio nell'eseguire le prove secondo il protocollo comune concordato con tutti i partecipanti. Per ottenere una valutazione statistica consistente è necessario che partecipi al test un numero sufficiente di laboratori di prova. *Nadcap* specifica che è necessaria la partecipazione ai PT per tutti i metodi di prova effettuati dal laboratorio ma non per tutti i tipi di materiali testati, con l'eccezione dell'analisi chimica.

Questo processo è svolto periodicamente con frequenza stabilita dalle tabelle presenti nell'APPENDIX B, si riporta a titolo di esempio la tabella indicativa della frequenza dei PT per la prove meccaniche (AC7107/3 - *Mechanical Testing*):

CODE	TEST TYPE	Proficiency Testing Frequency
AC7101/3 – Mechanical Testing		
A	Room Temperature Tensile	Every 2 Years
B	Elevated Temperature Tensile	Every 2 Years
C	Stress Rupture	Every 2 Years ¹
XA	Creep	Every 2 Years ¹
CT	Compression Testing	Not Required
KR	Curve (Resistance to Fracture) Testing	Not Required
N	Impact Testing	Not Required
O	High Cycle Fatigue	Every 5 Years
P	Fracture Toughness	Every 5 Years
Y	Low Cycle Fatigue	Every 5 Years
XE	Crack Propagation/Crack Growth Testing	Every 5 Years
XN	Bend Testing	Not Required

Tabella 4 - Frequenza PT (Proficiency Test)

Accredia richiede che la partecipazione ai PT sia fatta per ogni sub-disciplina di prova ad ogni ciclo di accreditamento (4 anni). Per rispondere contemporaneamente alle richieste di Accredia e Nadcap il Laboratorio Forgerossi Research nell'anno 2020 si è iscritto a:

- Sede A: durezza Brinell 2,5/187,5, durezza Rockwell HRC, micrografia + resilienza + corrosione su acciai duplex (ASTM A923), analisi chimica acciaio basso legati, analisi chimica acciai inossidabili
- Sede C: corrosione intergranulare, micrografia + resilienza + corrosione su acciai duplex (ASTM A923)

Gli *Internal Round Robin* (IRR), descritti approfonditamente nell'APPENDIX D, sono necessari per verificare la catena macchina operatore prendendo così in considerazione l'impatto potenziale dell'attrezzatura e del personale nella variabilità delle misure nella medesima procedura di prova accreditata presso il laboratorio.

L'intento nella realizzazione di prove interne non è di caratterizzare l'influenza del materiale, pertanto ne va selezionato uno quanto più omogeneo possibile in modo da limitare l'impatto sull'analisi statistica.

All'interno del laboratorio viene incaricato un responsabile a coordinare il programma IRR a cui spetta il compito di stabilire il metodo di prova, distribuire il materiale, vigilare le prove e stilare un report con i dati ottenuti. Partecipano al test tutti gli operatori e macchinari di prova qualificati o in fase di qualifica.

La frequenza per lo svolgimento del programma IRR è definita come per i PT nell'APPENDIX B, si riporta a titolo di esempio la tabella AC7101/3 – *Mechanical Testing* riferita alle prove meccaniche:

CODE	TEST TYPE	Internal Round Robin Frequency for Operators	Internal Round Robin Frequency for Equipment
AC7101/3 – Mechanical Testing			
A	Room Temperature Tensile	Every 2 Years ²	Every 2 Years ²
B	Elevated Temperature Tensile	Every 2 Years	Every 2 Years
C	Stress Rupture	Every 2 Years ¹	Every 5 Years ¹²⁴
XA	Creep	Every 2 Years ²	Every 5 Years ²⁴
CT	Compression Testing	Not Required	Not Required
KR	Curve (Resistance to Fracture) Testing	Not Required	Not Required
N	Impact Testing	Not Required	Not Required
O	High Cycle Fatigue	Every 5 Years ²	Every 5 Years ²³⁴
P	Fracture Toughness	Every 5 Years ²	Every 5 Years ²³
Y	Low Cycle Fatigue	Every 5 Years ²	Every 5 Years ²³⁴
XE	Crack Propagation/Crack Growth Testing	Every 5 Years ²	Every 5 Years ²³⁴
XN	Bend Testing	Not Required	Not Required

Tabella 5 - Frequenza IRR

Nell'APPENDIX D vengono indicate, non in ordine di preferenza, le diverse opzioni per partecipare al programma IRR:

- Controllo statistico del processo senza produrre IRR (AC7101/1 REV.G APPENDIX D.1.), tipica soluzione per i *captive laboratories* con ampia produzione di test di routine in particolare per prove non distruttive (es. durezza, analisi chimica). Il programma deve essere condotto utilizzando carte di controllo e conforme a uno o più dei seguenti standard internazionali:
 - ISO 7870-1 che stabilisce le linee guida per l'utilizzo delle carte di controllo
 - ISO 11462-1 che stabilisce le linee guida per l'implementazione del controllo statistico di processo (SPC)
 - ASTM E2587 che stabilisce le linee guida per l'utilizzo di carte di controllo nell'analisi statistica del processo

- Gage R&R al posto di produrre IRR (AC7101/1 REV.G APPENDIX D.2.), robusto processo statistico adatto a grosse produzioni per stabilire ripetibilità e riproducibilità di operatori e macchinari. Questo metodo indica se la misurazione è utilizzabile o meno per l'uso specifico e indica quale parte nella misurazione contribuisce maggiormente permettendo, implementandola, di migliorare il sistema generale. Il sistema di misura infatti subisce variazioni da tre principali risorse: il materiale, l'operatore e il macchinario di prova. Il programma Gage R&R deve essere condotto in accordo con una o più delle seguenti normative:
 - ISO TR 12888, in cui vengono illustrati studi di ripetibilità e riproducibilità del misuratore
 - ISO 22514-7, che elenca i metodi statistici nella gestione dei processi, in particolare capacità e prestazioni
 - ASTM E 2782 che stabilisce i metodi per l'analisi dei sistemi di misurazione (MSA)

- IRR (AC7101/1 REV.G APPENDIX D.3.)

3.2.1 Internal Round Robin – IRR

Generare un *Internal Round Robin* (IRR) è necessario per poter effettuare delle comparazioni efficaci con i valori di un materiale di riferimento certificato. Si può scegliere tra due diversi tipi di materiale:

- *Verified material (Type I, Type II)*, ovvero materiale che è già stato valutato statisticamente ed è accompagnato da una forcella di valori o da deviazione standard nota. Alcuni esempi sono i CRM (*Certified Reference Materials*) o altri materiali con valori noti quali provini derivanti da PT o blocchi di durezza.
- *Unverified material (Type III)*, ovvero un materiale con valore medio e deviazione standard sconosciuti e che necessita di analisi preliminare per determinare la variazione dei valori per la prova in esame

Nel caso specifico si procede con la qualifica di un nuovo materiale per il programma IRR. La lega di alluminio 6061 risulta un buon candidato perché, a differenza dei diversi tipi di acciai ben più impiegati nelle prove presso il *Laboratorio Forgerossi Research*, consente di effettuare esami che interessano diversi range di risultati e diversi ordini di grandezza.

Si procede dunque con il calcolo della *reference distribution* come indicato nel paragrafo D.3.1.1.1. dell'AC7101/1 REV. G - APPENDIX D.3.

Il numero minimo di prove indicato per ottenere opportune valutazioni statistiche è dodici, con questi valori viene calcolato il valore medio (μ) e la deviazione standard (σ). Con questa deviazione standard si stabiliscono le forcelle della distribuzione di riferimento attorno al valore medio.

Nel paragrafo D.3.2. si descrive il metodo convenzionale per la qualifica dei macchinari e degli operatori. Il periodo concesso per il completamento dell'IRR va dai due ai cinque anni come descritto nella tabella di frequenza nell'APPENDIX B. In questo lasso di tempo tutti gli operatori e macchinari devono essere coinvolti.

Un test porta alla qualifica dell'operatore o del macchinario se restituisce da subito un valore compreso tra $\pm 1\sigma$ (una volta la deviazione standard). Se il valore è superiore a $\pm 2\sigma$ l'operatore non è qualificato e il laboratorio valuterà le possibili cause di errore

prima di poter ripetere il test per ottenere un risultato soddisfacente. Se il valore risulta compreso tra $\pm 2\sigma$ ma maggiore di $\pm 1\sigma$ ($\pm 2\sigma < \text{valore} < \pm 1\sigma$) è necessario effettuare altri due ulteriori test. Se tutti e tre i test rientrano nella forcilla $\pm 2\sigma$ e il valore medio assoluto della varianza Z è minore di $1,6\sigma$ l'apparecchiatura e l'operatore sono considerati qualificati.

Per ricavare il valore medio assoluto (*mean absolute value*) della varianza Z usiamo le seguenti equazioni:

$$\text{Absolute variance } (v) = \text{abs}[\text{Measured value } (M_v) - \text{Mean } (\mu)]$$

$$\text{Variance } (Z) = \frac{\text{Absolute variance } (v)}{\text{Sample standard deviation } (\sigma)}$$

$$\text{Mean Z score } (Z) = \frac{\Sigma(z_1)(z_2)(z_3)}{3}$$

I dati risultanti conformi ottenuti durante le qualifiche vengono poi combinati con la distribuzione di riferimento (*reference distribution*) per crearne una sempre più robusta nel tempo.

I risultati infine devono essere riportati in un documento datato alla fine del programma IRR con la raccomandazione di produrre comunque annualmente documenti ad interim nel caso di programmi IRR con durata superiore all'anno.

Nell'APPENDIX E vengono descritti, in sedici punti, i criteri generali dei protocolli delle le prove generali per IRR e PT:

- A. Progettazione di base - Il protocollo di test dovrebbe essere progettato in modo tale che i risultati ottenuti dal metodo scelto possano essere facilmente classificati per studiare la variabilità all'interno e tra le strutture senza l'influenza degli effetti secondari.
- B. Requisito singolo operatore o set di apparecchiature - significa che, data una particolare fase del processo di misurazione, la stessa combinazione di operatore e apparecchiatura viene utilizzata per ogni risultato del test e su ogni materiale. Pertanto, un operatore può preparare i provini, un secondo operatore

misurare le dimensioni e un terzo operatore può eseguire il test. La variabilità all'interno della struttura, denominata ripetibilità, riguarda la variabilità tra i risultati di test indipendenti ottenuti all'interno di una singola struttura nel più breve periodo di tempo pratico da un singolo operatore con uno specifico set di apparecchiature di prova utilizzando campioni di prova prelevati a caso da un'unica quantità di materiale omogeneo.

- C. Precisione dei tempi – I risultati sono ottenuti in un tempo non inferiore a quello dei test normali e non così a lungo da consentire cambiamenti significativi nel materiale di prova, attrezzatura o ambiente.
- D. La variabilità (o riproducibilità) tra strutture è calcolata confrontando i singoli risultati di prova ottenuti in diverse strutture, ciascuna delle quali ha applicato il metodo di prova ai campioni di prova prelevati a caso da una singola quantità di materiale omogeneo ottenuto o preparato per lo studio.
- E. Classificazione dei dati - Una forma di classificazione suggerita è una tabella a matrice separata per ogni proprietà testata, in cui le righe rappresentano le strutture e le colonne rappresentano i materiali.
- F. Metodo di prova - Il processo di misurazione effettivo e la descrizione scritta del processo. Deve essere scritta in un documento la procedura del metodo di prova in cui si identificano le condizioni di prova che influenzano i risultati della prova e si specifica il giusto grado di controllo della prova.
- G. Istruzione globale - Il protocollo deve fornire il nome, l'indirizzo, l'indirizzo e-mail, il numero di telefono e di fax delle persone chiave che coordinano e supervisionano i test di valutazione.
- H. Identificazione del test - Identificare chiaramente il metodo di prova, specificando qualsiasi opzione nell'apparato o procedura selezionata. Per ciascuna opzione devono essere fornite unità di prova e schede tecniche di prova.
- I. Coerenza del materiale – Il materiale utilizzato deve essere più omogeneo possibile prima della sua suddivisione in campioni di prova. La posizione di ogni campione di prova dal materiale sfuso deve essere rintracciabile tramite una designazione di una lettera o un numero indicato su ciascun campione.
- J. Procedure di calibrazione – Sono richieste prima di ogni risultato di prova e dovrebbero essere descritte in dettaglio nel metodo di prova.

- K. Analisi delle condizioni specifiche – Si caratterizzano tutte le circostanze speciali che devono essere affrontate nell'esecuzione delle condizioni di ripetibilità (ad esempio l'intervallo di tempo tra l'ottenimento dei risultati del test per lo stesso materiale).
- L. Avere cura della manipolazione e del condizionamento dei provini. Descrivere il sistema di codifica utilizzato per identificare i materiali da testare.
- M. Raccolta dei dati della struttura ospitante - Il laboratorio o il fornitore ospitante devono fornire schede tecniche per la registrazione dei dati grezzi osservati.
- N. Le schede tecniche devono essere fornite in modo che ogni laboratorio possa registrare eventuali eventi speciali che si verificano durante qualsiasi fase del test. Oltre a una sezione "commenti", possono essere poste domande pertinenti al metodo di prova per avere un'idea migliore di come è stato eseguito il test purché le informazioni non siano coperte da segreto industriale. Dovrebbe essere richiesta anche qualsiasi informazione che assicuri che il laboratorio abbia soddisfatto i requisiti specificati per il metodo di prova o che possa essere necessaria per preparare il rapporto finale.
- O. Sostituzione - Il protocollo deve contenere informazioni sulla disponibilità del materiale per i test di sostituzione. Si raccomanda che il laboratorio prepari una quantità sufficiente di ciascun materiale per fornire il 50% in più del necessario rispetto al materiale usato nel programma di test.
- P. Rapporto finale – Il laboratorio deve distribuire un rapporto finale a tutti i partecipanti contenente una descrizione o un riepilogo del metodo di prova, dei materiali e dei risultati del test riportati da tutti i partecipanti, un riepilogo delle statistiche sulle prestazioni e una descrizione delle statistiche metodo utilizzato per l'analisi dei risultati. I test sponsorizzati da strutture accreditate *Nadcap* dovrebbero indicare chiaramente quali requisiti di test *Nadcap* sono soddisfatti.

Nell'APPENDIX F viene indicata in modo schematico la frequenza minima richiesta per la taratura delle apparecchiature di un laboratorio di prova, di seguito un elenco:

CATEGORIA DI APPARECCHIATURE	FREQUENZA
Strumenti e registratori di temperatura	3 mesi
Strumenti di misurazione di temperatura e umidità del laboratorio	1 anno
Sistemi di registrazione	6 mesi
Potenzimetri di precisione	3 mesi
Micrometri e calibri	6 mesi
Comparatori ottici o video usati per la verifica dimensionale	1 anno
Oscilloscopio	1 anno

Tabella 6 - Frequenza minima per la verifica delle apparecchiature di laboratorio

3.3 Qualifica del materiale – AA6061

Si intende qualificare internamente la lega di alluminio della serie AA6061 come *unverified material* secondo le direttive dell'AC7101/1 REV.G per partecipare al programma IRR per la qualifica di operatori ed attrezzature. Durante la caratterizzazione quindi vengono effettuate prove in numero maggiore per poter calcolare con metodo indicato da *PRI-Nadcap* la ripetibilità e la deviazione standard utili a stabilire le forcelle di riferimento.

La scelta è ricaduta su questo materiale perché è al momento tra le leghe di alluminio più richieste dai clienti dell'azienda ed è caratterizzato da una buona omogeneità, caratteristica fondamentale per il programma IRR.

La caratterizzazione prevede l'esecuzione di prove di trazione. Questo tipo di materiale è relativamente nuovo per l'azienda appena introdotta nel mercato aerospaziale e ciò consente di qualificare metodi di prova non usualmente utilizzati per i più comuni acciai. Si consideri per esempio la prova di trazione, essa normalmente viene condotta in controllo di deformazione con gli acciai. Secondo quanto indicato nella *Nota 21* [27] della normativa ASTM E8/E8M-16a per le leghe di alluminio la prova deve essere condotta in regime di controllo di carico con incremento massimo di 12 MPa/s. Questa caratteristica impone che l'operatore distingua, a seconda del materiale testato, il programma da impostare in macchina affinché la prova sia condotta regolarmente secondo normativa. Per gli altri aspetti relativi alla prova si fa riferimento alla normativa specifica per la prova di trazione delle leghe leggere, ASTM B557-15 [28].

Altro esempio riguarda la prova di durezza, che viene condotta per le leghe di alluminio con metodo Brinell HBW2,5/62,5. Questo metodo è caratterizzato da un carico minore, nel nostro caso 612,9 N, con penetratore da 2,5 mm di diametro, adatto a materiali meno duri degli acciai.

Il calcolo della ripetibilità, della deviazione standard, dell'incertezza e la qualifica dell'operatore sono svolte dopo aver inserito i dati in un foglio di calcolo opportunamente studiato che verrà riportato in seguito simile per tutte le prove.

3.3.1 Qualifica prova di trazione

Contestualmente alla caratterizzazione del materiale vengono ricavati dei campioni per le prove di trazione da due fette dell'anello sacrificale. Verranno prodotti 20 provini secondo le normative ASTM E8/E8M e UNI EN ISO 6892-1 con raggio 12,5 mm e tratto utile 50 mm.

I provini realizzati serviranno per il programma IRR (12 provini) e per la qualifica degli operatori (9 provini disponibili per 2 i operatori da qualificare).

I provini utilizzati per il programma IRR vengono ricavati in direzione tangenziale a due a due nella parte superiore, centrale e inferiore della sezione per ottenere una visione di insieme delle proprietà in tutto l'anello. Prima della lavorazione meccanica si procede alla marcatura come indicato in Figura 26:

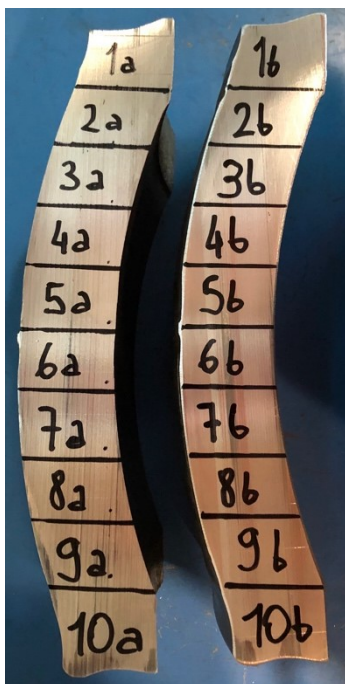


Figura 26 - Marcatura per ricavare i campioni per la prova di trazione

I provini, ottenuti attraverso tornitura, vengono misurati e verificati dall'operatore prima della prova prima con dime e poi con misure ripetute con calibro digitale.

La macchina di trazione GALDABINI QUASAR 250 viene impostata sul programma dedicato alla trazione delle provette in alluminio con sistema in controllo di carico a 11,5 MPa/s nel rispetto di quanto indicato nella *Nota 21* della ASTM E8/E8M-16a e nella ASTM B557-15.

Di seguito si riporta in Figura 27 il diagramma sforzo-deformazione complessivo delle 12 prove:

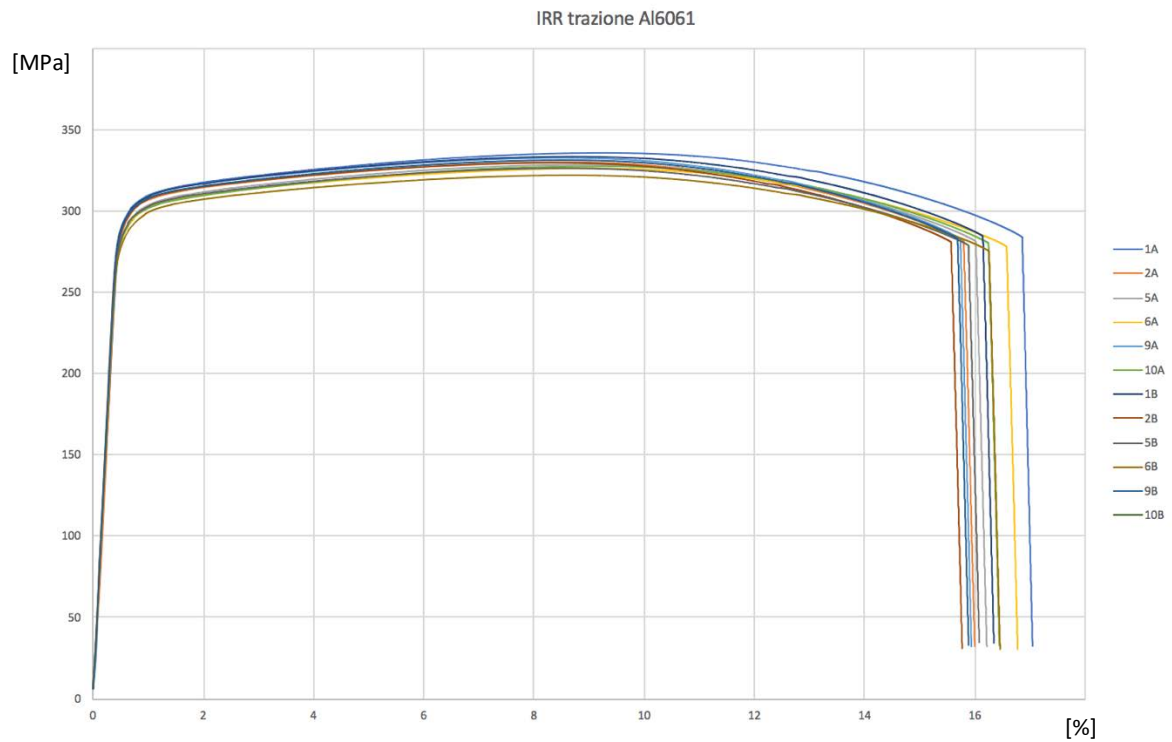


Figura 27 - Diagramma di trazione dei 12 provini ricavati dai pezzi A e B per il programma IRR

Dalle 12 prove risultano i seguenti valori finali:

NR. TEST		D.	So	Lo	YS	TS	El	RA
		mm	mm ²	mm	Mpa	Mpa	%	%
1	1A	12,50	122,72	50	299,94	335,8	18,98	43,09
2	2A	12,50	122,72	50	297,46	330,0	16	41,02
3	5A	12,50	122,72	50	292,07	328,6	18,14	41,87
4	6A	12,50	122,72	50	289,81	326,2	17,34	41,51
5	9A	12,47	122,13	50	299,93	332,7	17,28	42,69
6	10A	12,50	122,72	50	291,56	327,6	17,38	42,97
7	1B	12,50	122,72	50	297,76	333,5	17,6	41,51
8	2B	12,51	122,91	50	296,38	329,8	17,06	40,47
9	5B	12,49	122,52	50	290,83	326,4	17,4	41,41
10	6B	12,50	122,72	50	287,27	322,1	17,68	41,02
11	9B	12,49	122,52	50	297,27	331,3	16,9	40,55
12	10B	12,49	122,52	50	292,74	330,9	17,34	41,05
MEDIA					294,41	329,57	17,42	41,59
DEV.ST					4,210	3,706	0,707	0,89
2*DEV.ST					8,420	7,412	1,414	1,78
DEV.ST NORMA					6,6	2,7	1,1	0,99
RAPPORTO DEV.ST/DEV.ST NORMA					0,637	1,372	0,642	0,901
RIPETIBILITA'					13,098	11,530	2,200	2,777

Tabella 7 - Risultati della prova di trazione dei 12 provini ricavati dai pezzi A e B per il programma IRR

Ottenuti dunque i valori utili a stabilire le forcelle si procede alla qualifica dell'operatore che effettua 1 test. Come descritto nella procedura IRR, se questo test rientra nella forcella $\pm 1\sigma$ l'operatore è immediatamente qualificato. In caso contrario, se i valori ricadono al di fuori della forcella $\pm 2\sigma$, l'operatore non è qualificato. Il caso intermedio vede valori compresi tra $\pm 1\sigma$ e $\pm 2\sigma$ ed è necessario quindi eseguire altre due prove. La qualifica viene raggiunta nel momento in cui $Z < 1,6\sigma$, in caso contrario l'operatore non è qualificato.

3.3.2 Qualifica prova di durezza

Viene lucidata la superficie laterale di una fetta per eseguire le prove di durezza. La prova è condotta con metodo Brinell HBW2,5/62,5 ($d = 2,5$ mm e carico 612,9 N) secondo normative ASTM E10-18 e UNI EN ISO 6506-1:2015. Il Laboratorio utilizza il macchinario automatico AFFRI L250 in grado di effettuare diverse modalità di prova con diversi penetratori (Brinell, Vickers, Rockwell) a diversi carichi.

Come si può vedere in Figura 28 sono state evidenziate diverse zone del provino lungo la direzione longitudinale interessando parte interna (Δ), centrale (\circ) ed esterna (\square) per ottenere una base statistica più ampia che tenesse conto degli eventuali problemi di disomogeneità del materiale tra superficie e centro.



Figura 28 - Prove di durezza Brinell HBW2,5/62,5

Secondo la prassi del laboratorio si ottiene un risultato valido con la media di tre rilevazioni. Per il programma IRR, che richiede un minimo di dodici prove, vengono quindi effettuate 36 rilevazioni a tre a tre alternate nei punti esterni, centrali ed interni. Le tre misure sono fatte in zona ravvicinata alla marchiatura con estrema attenzione dell'operatore nel rispettare la normativa che impone di effettuare misurazioni a distanza di almeno tre volte il diametro dall'impronta precedente per evitare di contaminare i dati con deformazioni e incrudimenti del materiale circostante.

Dalla prova risultano i seguenti risultati schematizzati nella Tabella 8:

	HB1	HB2	HB3	HB media
1a	114,9	111,6	116,4	114,3
2b	109,3	113,1	114,2	112,2
3c	112,9	112,9	114,4	113,4
4a	113,9	117,1	116,8	115,9
5b	117,4	116,9	112,5	115,6
6c	113,2	115,6	112,9	113,9
7a	116,5	114,6	113,7	114,9
8b	114,8	115,2	115,4	115,1
9c	113	114,7	114,1	113,9
10a	116,6	116,9	112	115,2
11b	115,5	113	114,9	114,5
12c	115,3	114,8	113,8	114,6
MEDIA				114,47
DEV. ST.				1,02
2*DEV. ST.				2,05
DEV. ST. NORMA				0,910
RAPPORTO DEV.ST/DEV.ST NORMA				1,125
RRIPETIBILITA'				3,2

Tabella 8 - Risultati della prova di durezza per il programma IRR

La ripetibilità r è calcolata secondo il metodo descritto nel documento ACCREDIA DT-0002/6 REV.0 – Guida al calcolo della ripetibilità di un metodo di prova ed alla sua verifica nel tempo.

L'equazione per ricavare la ripetibilità r è la seguente:

$$r = \sqrt{2} * s * t_p$$

In cui s è lo scarto tipo ricavato dai dati e t_p è la variabile di Student il cui valore è ottenuto da tabella a seconda del livello di probabilità e dei gradi di libertà ν dati dal numero di prove (12) meno uno:

$$\nu = n - 1 = 11$$

v	$p = \alpha / 2$			$p = 1 - \alpha / 2$			$p = 1 - \alpha$		
	$t_{p=0,005}$	$t_{p=0,025}$	$t_{p=0,050}$	$t_{p=0,950}$	$t_{p=0,975}$	$t_{p=0,995}$	$t_{p=0,900}$	$t_{p=0,950}$	$t_{p=0,990}$
10	-3,17	-2,23	-1,81	+1,81	+2,23	+3,17	1,81	2,23	3,17
11	-3,11	-2,20	-1,80	+1,80	+2,20	+3,11	1,80	2,20	3,11
12	-3,05	-2,18	-1,78	+1,78	+2,18	+3,05	1,78	2,18	3,05

Tabella 9 - Valori della variabile di Student, particolare della tabella originale

3.3.3 Qualifica degli operatori

Successivamente si procede alla qualifica degli operatori che svolgono da un minimo di una ad un massimo di tre prove a testa.

Il foglio di calcolo è impostato per evidenziare le caselle con colori verde, rosso e giallo per situazioni rispettivamente conformi, non conformi e con necessità di effettuare altre due prove.

Si riporta a titolo di esempio la qualifica dell'operatore 1:

NR. TEST		D.	So	Lo	YS	TS	El	RA
		mm	mm ²	mm	MPa	MPa	%	%
1	3B	12,52	122,72	50	297,04	332,2	16,78	41,45

Criterio per prova 1



Operatore qualificato



Esegui altre 2 prove



NON qualificato. Aprire NC

Esito con 1 prova	2,622	2,625	0,645	0,147	criterio: <1 s
-------------------	-------	-------	-------	-------	----------------

Tabella 10 – Operatore qualificato con una prova

L'operatore svolge una sola prova che viene confrontata con i valori medi ottenuti con la qualifica del materiale come IRR. Nelle caselle verdi vi sono i valori assoluti della differenza tra il valore medio e valore della prova eseguita dall'operatore. Il foglio di calcolo è appositamente studiato per fornire feedback condizionali in merito al valore risultante. La casella si colora di verde nel momento in cui il valore è minore di una volta la deviazione standard ($\pm 1\sigma$) calcolata con le dodici prove, l'operatore risulta

subito qualificato. Nel caso in cui uno dei quattro valori fosse maggiore della deviazione standard calcolata si aprono due possibilità; valori superiori a due volte la deviazione standard ($\pm 2\sigma$) implicano che l'operatore non può essere qualificato, casella rossa, va aperta una procedura di non conformità (NC) e ricercata la causa dell'errore prima di poter ripetere la prova.

Il caso intermedio, casella gialla, avviene quando il valore ricade tra una e due volte la deviazione standard calcolata. La procedura *Nadcap* in questo caso chiede di fare ulteriori due (2) prove:

NR. TEST		D.	So	Lo	YS	TS	El	RA
		mm	mm ²	mm	Mpa	Mpa	%	%
1	3B	12,52	122,72	50	297,04	332,2	16,78	42,5
2	2A	12,5	122,72	50	297,46	330	16,8	41,02
3	5A	12,5	122,72	50	292,07	328,6	18,14	41,87

Criterio per prova 1  Qualificato  Eseguire altre 2 prove  NON qualificato

Esito con 1 prova		2,622	2,625	0,645	0,903	criterio: <1 s
Criterio per 3 prove: tutte le prove 1, 2, 3 e Z medio verdi: operatore qualificato; un solo valore rosso: operatore NON qualificato. Aprire non conformità (NC)						
Esito con 3 prove						
Esito prova 1		2,6	2,6	0,6	0,9	criterio: <2 s
Esito prova 2		3,0	0,4	0,6	0,6	criterio: <2 s
Esito prova 3		2,3	1,0	0,7	0,3	criterio: <2 s
Valore di 1,6*s		6,74	5,93	1,13	1,43	
Esito Z medio		0,63	0,36	0,94	0,65	criterio: <1,6*s

Tabella 11 - Qualifica dell'operatore con tre prove

3.3.4 Analisi chimica

Come illustrato nel capitolo precedente le leghe di alluminio della serie AA6061 sono caratterizzate da precise forcelle di composizione chimica.

L'azienda *Siderforgerossi Group S.p.a.* conserva in un database tutte le schede tecniche delle acciaierie fornitrici del materiale da lavorare.

Nel caso specifico del pezzo in esame si risale facilmente al certificato fornito al momento dell'acquisto. I dati relativi alla composizione chimica sono quelli più importanti poiché dalla presenza degli elementi in lega dipenderanno le proprietà finali del pezzo lavorato e trattato termicamente.

Secondo quanto riportato nel certificato di acciaieria la composizione chimica del pezzo in esame è:

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
97,44	0,60	0,32	0,28	0,05	1,00	0,161	0,01	0,07
V	Ti	Pb	Sn	Na	B	Zr	Ca	Be
0,013	0,033	0,0026	0,001	0,0003	0,002	0,002	0,07	0,00004

Tabella 12 - Analisi chimica dell'acciaieria

Per il Laboratorio è consuetudine verificare la veridicità dei valori dichiarati dal fornitore con ulteriori controprove utilizzando il quantometro SPECTROMAXx.

3.3.5 Analisi macrografica

Spesso, su richiesta del cliente, viene fatta un'analisi macrografica per verificare visivamente la disposizione delle fibre, la dimensione del grano e la presenza di difetti grossolani, inclusioni o cricche. Secondo la procedura redatta dal laboratorio l'esame viene svolto secondo normative UNI 3138:1984, ASTM E381-17, ASTM E340-15, ASTM E407-07e1.

Nel caso dell'anello forgiato in esame viene effettuato un attacco con soda caustica nella superficie della fetta accuratamente levigata con diversi passaggi di carte abrasive.

Il risultato è il seguente:



Figura 29 - Macrografia

La disposizione delle fibre, come spesso accade con le leghe di alluminio, è poco visibile ma si può apprezzare comunque senza particolari pretese. Nel caso in cui sia specificatamente richiesto dal cliente le fibre vengono evidenziate con delle linee. Una caratteristica importante che è possibile vedere è la dimensione del grano, in questo caso si rileva una distribuzione uniforme, indice di un corretto rapporto di riduzione durante la lavorazione in forgia a partire dal grezzo. Una distribuzione uniforme della dimensione del grano implicherà una certa omogeneità nelle proprietà meccaniche nelle diverse zone del pezzo.

3.3.6 Analisi micrografica

Dal pezzo allo stato originale vengono ricavati tre provini nelle parti superiore (M1), media (M2) e inferiore (M3) che consentono di analizzare la struttura in prossimità della superficie e al centro (T/2). Si può notare che la differenza nella dimensione del grano tra la parte interna, grano più grosso, ed esterna, grano più fine, è simile in tutte e tre le posizioni. Quindi per le analisi successive riguardanti i pezzi trattati termicamente verrà presa in esame una sola posizione.

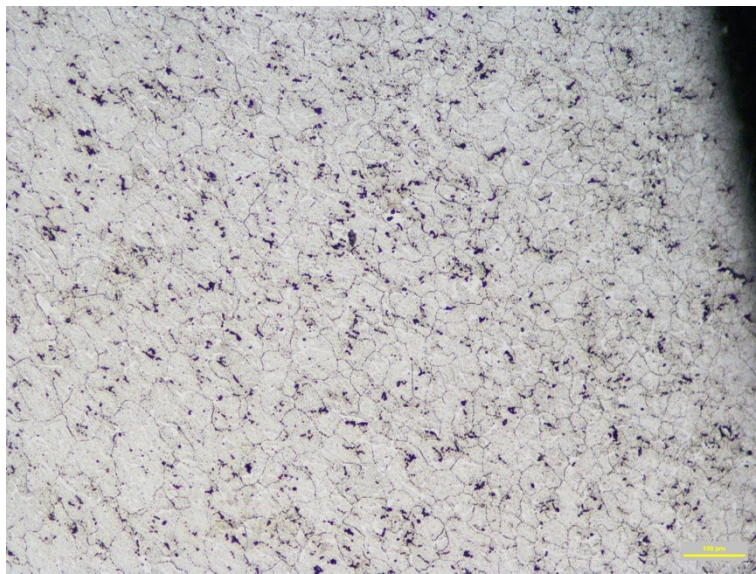


Figura 30 - Micrografia 100x M1 superficie

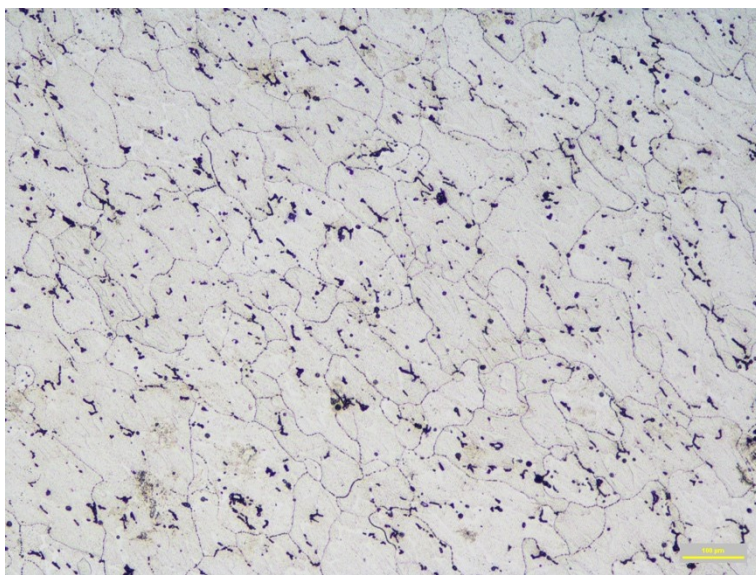


Figura 31 - Micrografia 100x M1 a T/2

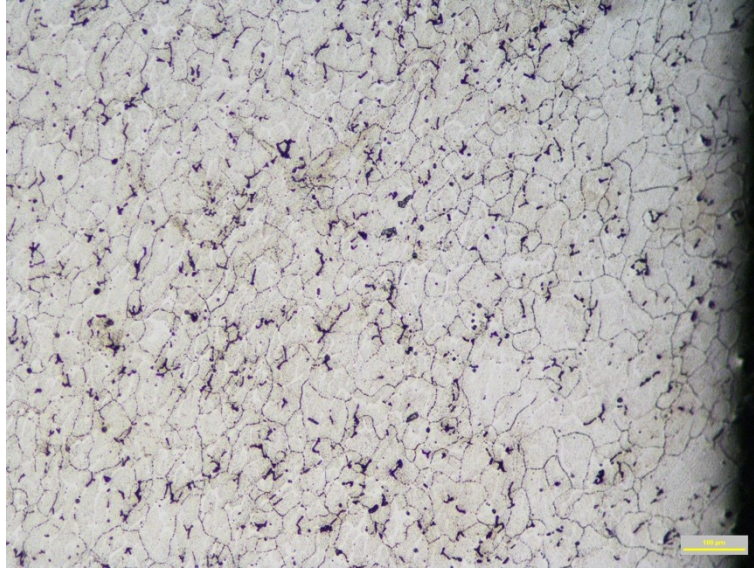


Figura 32 - Micrografia 100x M2 superficie

Nella Figura 33 sono indicati con delle frecce i precipitati della fase secondaria β presenti a bordo grano. Questa fase secondaria β è costituita da precipitati di Mg_2Si che sono composti caratterizzati da una conformazione cubica a facce centrate. Come già esposto nei capitoli precedenti questa fase si forma in seguito al trattamento termico di invecchiamento e si posiziona a bordo grano rendendo ancor più difficile il movimento delle dislocazioni ancorandole e incrementando la durezza del materiale e le proprietà meccanica in genere.

Da una valutazione preliminare dei provini è stato possibile apprezzare la distribuzione omogenea e la morfologia dei precipitati per la maggioranza di Mg_2Si . Nelle Figure proposte, successive all'attacco chimico, queste fasi secondarie sono state corrose e, come accade per il bordo grano, si possono rilevare come macchie nere probabilmente riconducibili a buchi. In questo caso l'attribuzione della composizione chimica del precipitato preesistente non è puntuale, nell'ultima immagine di questo paragrafo (Figura 36) si riporta un ingrandimento a 1000x in cui sono indicati i composti più frequenti.

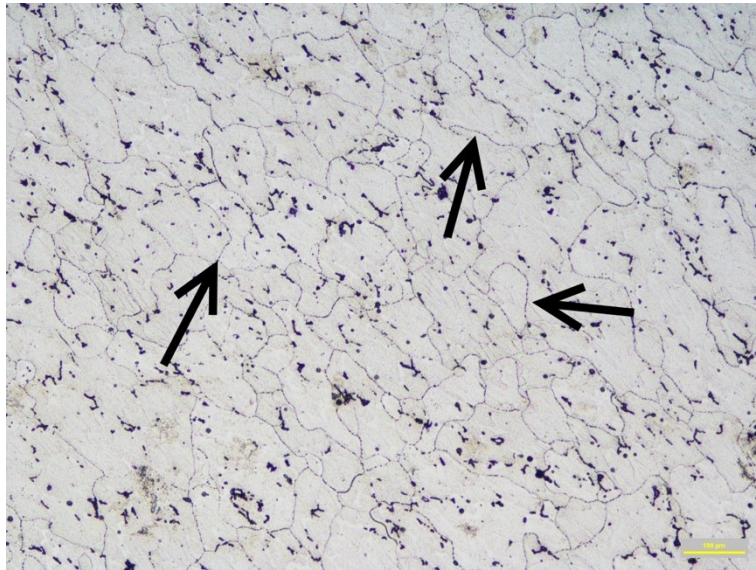


Figura 33 - Micrografia 100x M2 a T/2

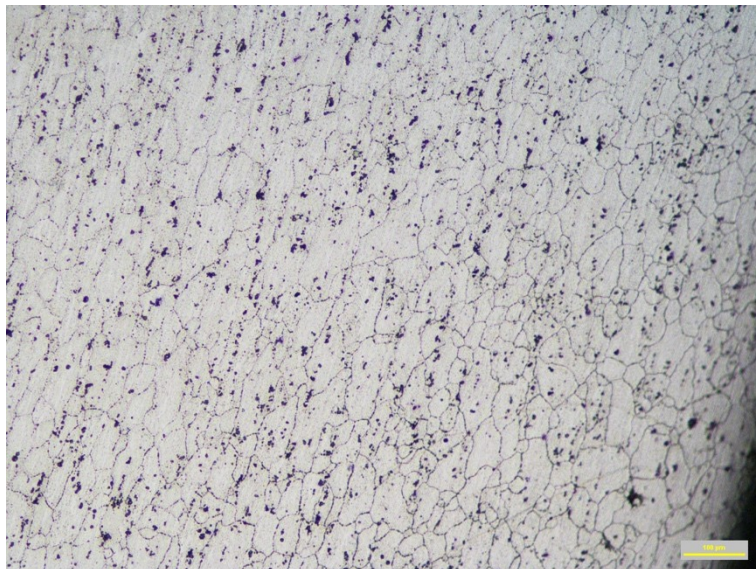


Figura 34 - Micrografia 100x M3 superficie

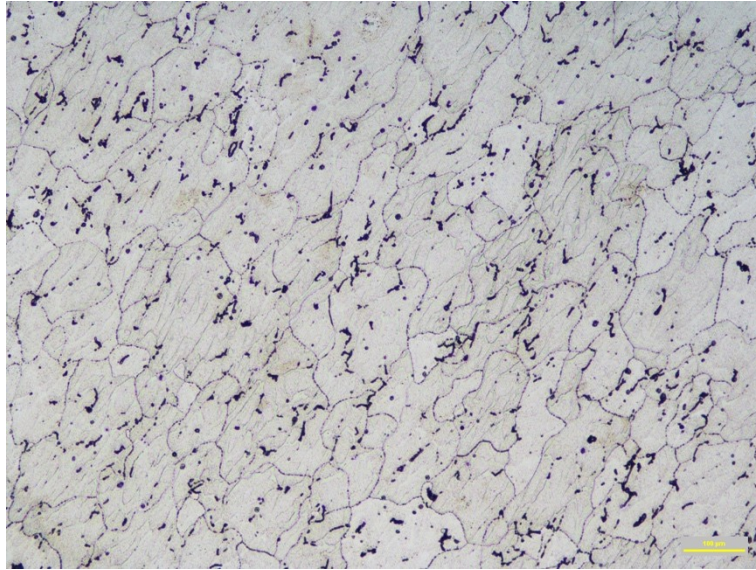


Figura 35 - Micrografia 100x M3 a T/2

La fase secondaria β di Mg_2Si può presentarsi anche come particelle disperse nella matrice (vedi particella azzurra in Figura 36 con ingrandimento 1000x) oppure aggregarsi in conformazioni di tipo “*Chinese Script*” o scrittura cinese [29]. Quest’ultimo tipo di morfologia, se molto fitta, risulta infragile a causa delle geometrie spigolose ed è preferibile cercare di modificarla con degli opportuni accorgimenti [30], come ad esempio provocando il fenomeno della coalescenza, per spezzare la continuità della fase.

Come evidenziato in Figura 36 è spesso presente come impurità la fase chiamata α -AlFeSi dovuta alla presenza in concentrazione discreta di ferro, il quale ha grande solubilità nell’alluminio. La morfologia sconnessa e aciculare fa di questa fase un elemento infragile e peggiorativo delle proprietà del materiale. Nel caso in esame il Fe è presente allo 0,32%. Questo elemento indesiderato è presente come residuo del processo di estrazione della bauxite oppure inevitabilmente presente nella produzione di leghe secondarie a partire da rottame.

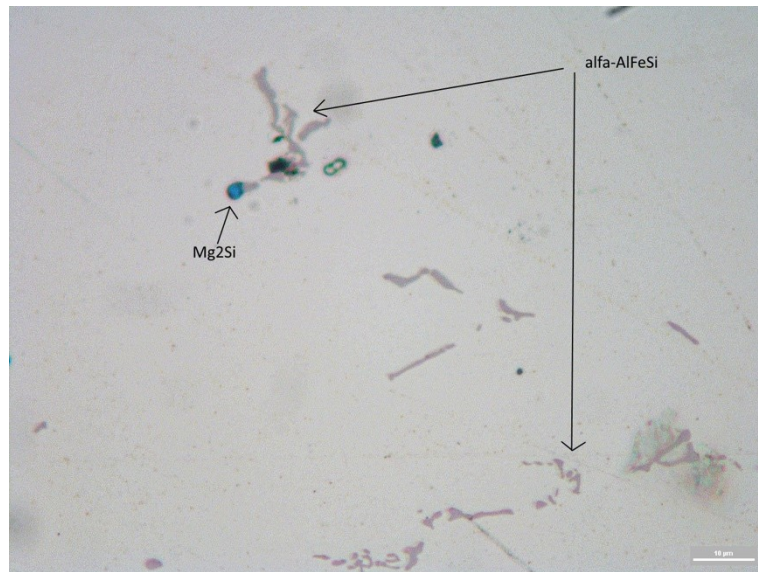


Figura 36 - Micrografia 1000x

Per una valutazione comparativa con i pezzi trattati che verranno descritti in seguito si procede ad una valutazione della dimensione del grano secondo normativa ASTM E112-13 [31]. La valutazione complessiva della dimensione del grano al centro del pezzo di partenza restituisce mediamente un valore *grain size* pari a 3.

3.4 Trattamenti termici

Come descritto in precedenza il pezzo in esame è messo a disposizione dopo aver già subito trattamenti termici presso un'azienda esterna secondo le normative internazionali di riferimento tra cui la AMS2772 [32] e la AMS2750 [33]. Il fornitore del servizio di trattamento termico fornisce i seguenti diagrammi temperatura-tempo generati dal software dal forno:

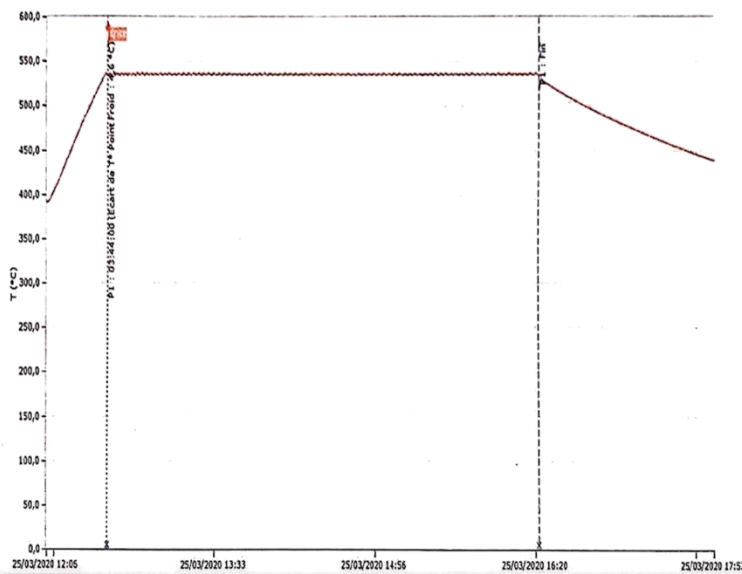


Figura 38 - Diagramma originale del Trattamento termico di solubilizzazione a $535 \pm 5^\circ\text{C}$ con permanenza di 3 ore

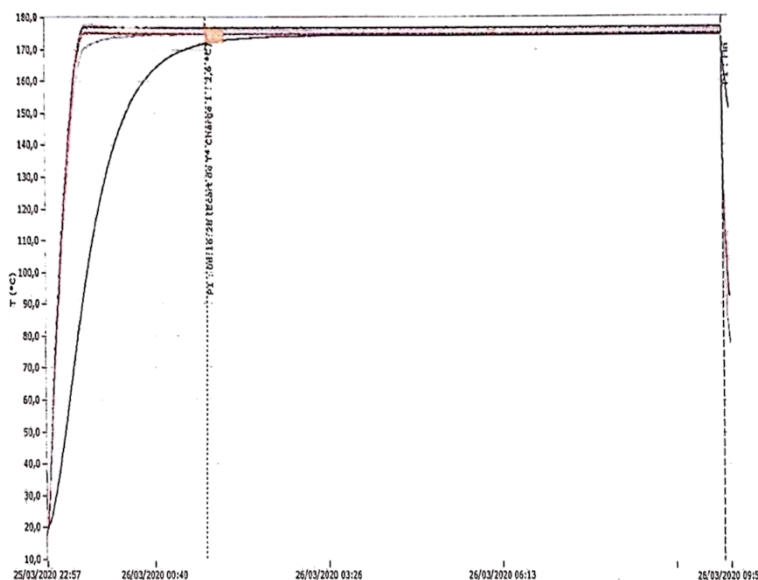


Figura 37 - Diagramma originale dell'Invecchiamento artificiale alla temperatura di $175 \pm 3^\circ\text{C}$ con permanenza di 8 ore

Come descritto nell'introduzione a questo capitolo sono stati effettuati ulteriori trattamenti termici a partire dal pezzo di partenza già trattato.

I nuovi trattamenti sono stati eseguiti presso l'officina interna dedicata del *Laboratorio Forgerossi Research*.

3.4.1 Solubilizzazione – 4si_8h

Il primo spezzone ad essere trattato è quello denominato 4si_8h, ovvero il pezzo che subirà una nuova solubilizzazione a diversa temperatura per redistribuire gli elementi in lega nella matrice in modo diverso dalla solubilizzazione precedentemente effettuata a $535 \pm 5^\circ\text{C}$ con permanenza di 3 ore.

Per valutare la temperatura alla quale svolgere il trattamento si ricorre ai diagrammi di solubilità del magnesio (Mg) e del silicio (Si), elementi caratteristici presenti nelle leghe della serie 6XXX. La presenza del magnesio nelle leghe della serie AA6061 rientra nella forcella di percentuale in peso 0,8 – 1,2 mentre quella del silicio è tra lo 0,4-0,8. La proporzione tra i due è Mg : Si = 1,73 : 1 e si va dunque a considerare quale dei due elementi sia meno presente in proporzione per poter poi entrare nel diagramma che vede nell'asse delle ascisse il composto Mg_2Si . Secondo il certificato del fornitore risulta che il pezzo contiene l'1% di Mg e lo 0,6% di Si. L'elemento discriminante risulta il magnesio, si può entrare nel diagramma illustrato nella Figura 39 con una retta verticale in corrispondenza del valore 0,57% in ascissa.

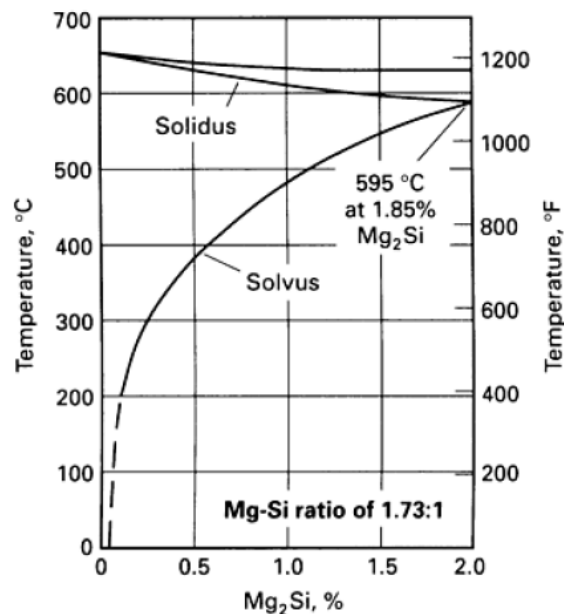


Figura 39 - Diagramma di solubilità Al-Mg₂Si

Con l'intenzione di raggiungere una diffusione più efficace del magnesio e del silicio nella matrice si propone di innalzare la temperatura di solubilizzazione tra i 550°C e i 560°C [34].

Pertanto la nuova solubilizzazione viene condotta ad una temperatura intermedia di $555 \pm 5^\circ\text{C}$ con permanenza identica alla precedente di tre ore.

Trascorse le tre ore previste il pezzo viene estratto dal forno e temprato rapidamente in acqua per congelare la soluzione solida formatasi durante il trattamento.

Per monitorare la temperatura non ci si affida alla termocoppia del forno bensì ad una seconda termocoppia mobile inserita all'interno di uno spezzone di lega di alluminio 6061 appositamente forato simile nello spessore a quelli in esame. Questo accorgimento consentirà di analizzare l'effettiva variazione di temperatura di tutto il pezzo considerando la sua inerzia termica e il suo spessore.



Figura 40 - Termocoppia da inserire nel pezzo campione forato in lega Al6061



Figura 41 - Inserimento pezzo in forno per solubilizzazione

3.4.2 Invecchiamento

Si procede con il trattamento di invecchiamento dei tre pezzi 2i_2h, 3i_4h e 4si_8h alla temperatura di $175 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Per facilitare la procedura vengono inseriti simultaneamente nel forno e verranno estratti ciascuno al tempo prestabilito. Il forno viene caricato la sera ed impostato per arrivare rapidamente in temperatura all'inizio della giornata lavorativa successiva in modo da poter presenziare a tutte le tre estrazioni dei pezzi.

I pezzi vengono inseriti in forno uno a fianco all'altro nell'ordine in cui dovranno essere estratti e con denominazioni indicanti le ore di permanenza (2H, 4H, 8H) per facilitare l'operatore.



Figura 42 - Pezzi inseriti in forno per l'invecchiamento

L'estrazione avviene in modo molto rapido per non influire sulla temperatura costante del forno e il pezzo viene riposto a raffreddare all'aria.

Le fette trattate termicamente vengono poi marchiate come le precedenti allo stato originale per ricavare i provini da testare.

3.5 Proprietà meccaniche – confronto

Si procede dunque alle prove meccaniche e alla valutazione delle variazioni delle proprietà meccaniche del materiale a seconda dei diversi trattamenti subiti.

Poiché si andranno a valutare due diversi processi di trattamento termico ogni sottocapitolo è suddiviso in:

- **Pezzi 2i_2h e 3i_4h**
- **Pezzo 4si_8h**

3.5.1 Prova di trazione

Viene condotta la prova di trazione analogamente alle condizioni descritte nel paragrafo 3.3 seguendo le normative ASTM E8/E8M e UNI EN ISO 6892-1 utilizzando provini ricavati da tre posizioni (superiore, media e inferiore) della fetta con raggio 12,5 mm e tratto utile 50 mm.

Valori tipici minimi della lega in esame sottoposta al trattamento di solubilizzazione e invecchiamento artificiale (-T6) sono un carico di rottura di 260 MPa e carico di snervamento di 240 MPa.

Pezzi 2i_2h e 3i_4h:

Con campioni invecchiati 2 e 4 ore in più rispetto al pezzo di partenza si nota un leggero miglioramento della resistenza a snervamento e rottura.

Nella Tabella 13 si riportano i risultati derivanti dalle prove sui tre campioni estratti nella parte superiore, media e inferiore del campione 2i_2h per un confronto di tre provini in posizione analoga del campione A.

	D.	So	Lo	YS	TS	El	RA
	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	%	%
1A	12,5	122,72	50	299,94	335,8	18,98	43,09
5A	12,5	122,72	50	292,07	328,6	18,14	41,87
10A	12,5	122,72	50	291,56	327,6	17,38	42,97
				294,52	330,67	18,17	42,64
2H-1	12,52	123,11	50	312	336	14,49	40,59
2H-2	12,51	122,91	50	305,31	330,1	14,44	41,97
2H-3	12,51	122,91	50	310,31	335,4	14,68	40,25
				309,21	333,83	14,54	40,94

Tabella 13 - Risultati prove di trazione dei provini ricavati da A e 2i_2h

Nella Tabella 14 si riportano i risultati relativi al campione 3i_4h invecchiato 4 ore a confronto del materiale di partenza rappresentato del campione A:

	D.	So	Lo	YS	TS	El	RA
	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	%	%
1A	12,5	122,72	50	299,94	335,8	18,98	43,09
5A	12,5	122,72	50	292,07	328,6	18,14	41,87
10A	12,5	122,72	50	291,56	327,6	17,38	42,97
				294,52	330,67	18,17	42,64
4H-1	12,5	122,72	50	312,12	336,3	14,41	40,03
4H-2	12,5	122,72	50	305,03	332,6	14,86	42,24
4H-3	12,51	122,91	50	310,33	336,8	15,2	42,7
				309,16	335,23	14,82	41,66

Tabella 14 - Risultati prove di trazione dei provini ricavati da A e 3i_4h

Si riporta, per il pezzo invecchiato 4 ore il diagramma sforzo-deformazione sovrapposto a quello del pezzo A come illustrato in Tabella 14.

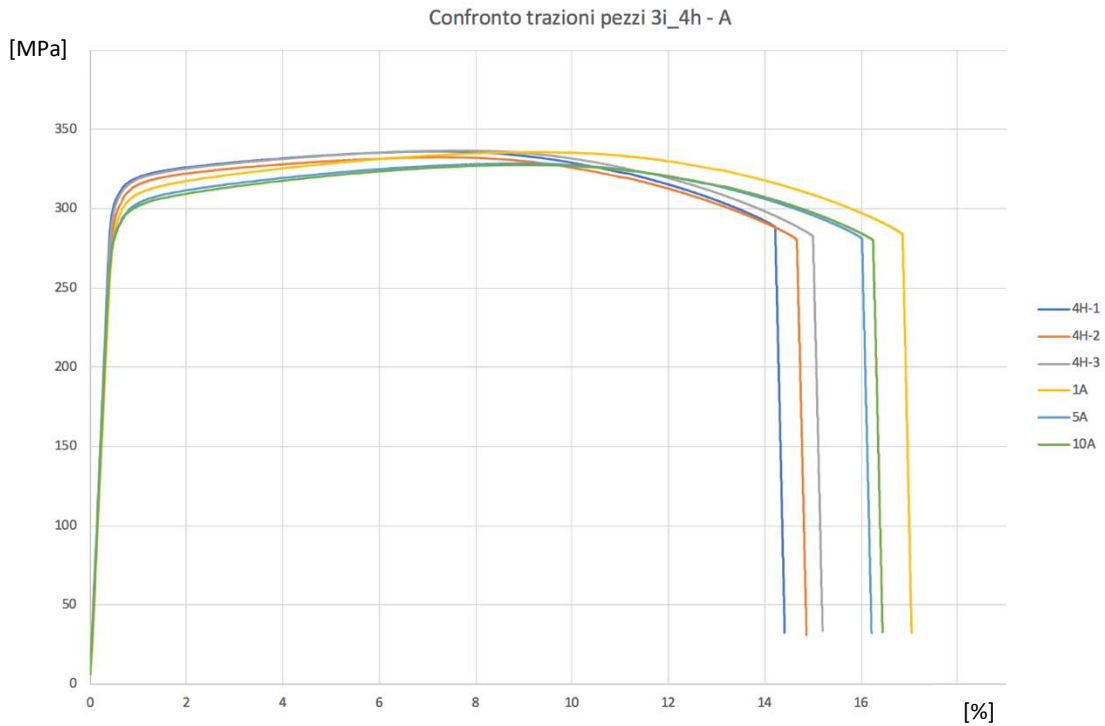


Figura 43 - Diagramma trazione con confronto di provini del pezzo A e 3i_4h

Il trattamento termico di invecchiamento ha prodotto una ulteriore precipitazione della seconda fase Mg_2Si che ha provocato un miglioramento della resistenza allo snervamento (+5%) a discapito di un ridotto allungamento (-18%).

Pezzo 4si_8h:

Il campione ha subito una ri-solubilizzazione a $555 \pm 5^\circ C$ per riportare i precipitati in soluzione solida ed è poi stato sottoposto a trattamento di invecchiamento di 8 ore identico al pezzo di partenza.

Nella Tabella 15 si riportano i risultati derivanti dalle prove sui campioni estratti nella parte superiore, media e inferiore a confronto di tre provini in posizione analoga del campione di riferimento A.

	D.	So	Lo	YS	TS	El	RA
	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	%	%
1A	12,5	122,72	50	299,94	335,8	18,98	43,09
5A	12,5	122,72	50	292,07	328,6	18,14	41,87
10A	12,5	122,72	50	291,56	327,6	17,38	42,97
				294,52	330,67	18,17	42,64
8H-1	12,49	122,52	50	311,93	336,5	14,86	42,15
8H-2	12,48	122,33	50	305,55	331,5	14,85	41,57
8H-3	12,51	122,91	50	311,43	337,4	14,81	42,82
8H-3				309,63	335,13	14,84	42,18

Tabella 15 - Risultati prove di trazione dei provini ricavati da A e 4si_8h

Si riporta in seguito il diagramma sforzo-deformazione indicativo dei valori della Tabella 15.

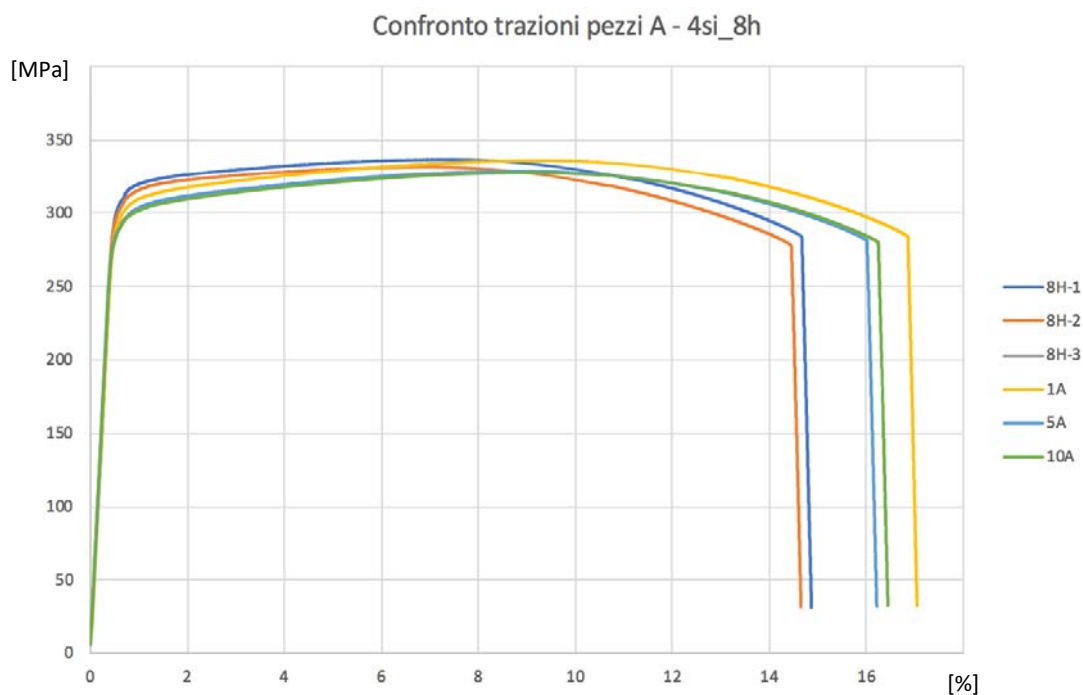


Figura 44 - Diagramma trazione con confronto di provini del pezzo A e 4si_8h

Si può notare dunque dai risultati ottenuti che il trattamento termico di solubilizzazione, a parità di tempo di invecchiamento, ha reso il materiale più resistente allo snervamento (+5%). Questo miglioramento è indice di una più efficiente diffusione del magnesio e del silicio in soluzione solida a temperature più elevate.

Questa diffusione più efficace ha portato poi, durante l'invecchiamento, ad una precipitazione della seconda fase Mg₂Si che ha rafforzato il materiale.

L'aumento di resistenza allo snervamento e rottura del materiale provoca inoltre una riduzione della proprietà di allungamento (-17%).

3.5.2 Prova di durezza

Dai pezzi trattati termicamente vengono ricavate delle fette con facce parallele ottenute per fresatura come indicato dalla procedura per le prove di durezza. Viene condotta una prova di durezza con metodo Brinell HBW2,5/62,5 ricavando tre dati utili da ogni campione in posizioni superiore, media e inferiore della sezione. Ognuno dei tre dati è ottenuto come media di tre misurazioni adiacenti distanziate di più di tre diametri dell'impronta quindi per ogni fetta vengono effettuate nove misurazioni.

Pezzi 2i_2h e 3i_4h:

I dati relativi al pezzo 2i_2h sono molto simili a quelli del pezzo 3i_4h, si deduce quindi che, vista la considerevole differenza nel tempo di trattamento, ci si trova nell'intorno dell'invecchiamento di punta quando le proprietà del materiale raggiungono l'apice prima del sovra-invecchiamento.

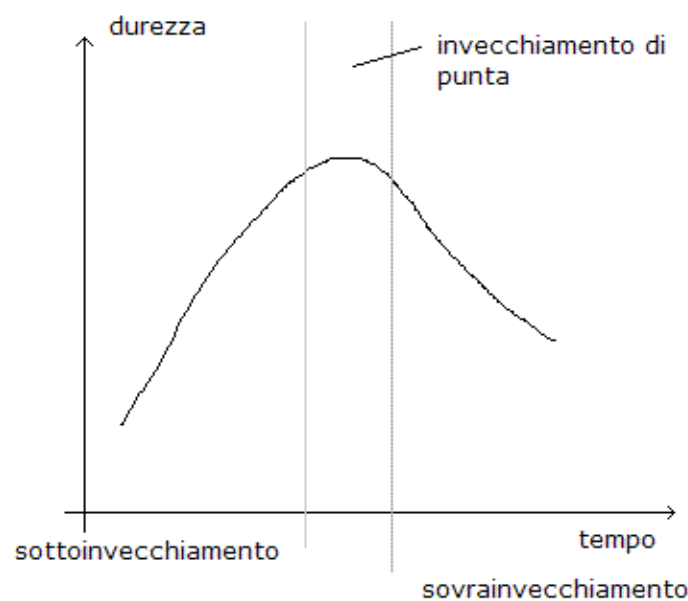


Figura 45 - Curva tipica della variazione delle proprietà con l'invecchiamento

Nella Tabella 16 si riportano i risultati derivanti dalle impronte effettuate nella parte superiore, media e inferiore per entrambe le fette per un confronto di tre durezze, quindi nove impronte per ogni fetta, in posizione analoga del campione di riferimento A:

	HBW 1	HBW 2	HBW 3	HBW
1A	109,3	113,1	114,2	112,2
2A	113,2	115,6	112,9	113,9
3A	115,5	113	114,9	114,5
				113,5
2H-1	116,4	114,9	115,9	115,7
2H-2	114,6	118,5	116,5	116,5
2H-3	111,7	116,7	115,4	114,6
				115,6
4H-1	117,2	115,2	115,9	116,1
4H-2	117,3	118,5	115,3	117,0
4H-3	115,2	117,5	116,3	116,3
				116,5

Tabella 16 - Risultati prova di durezza HBW 2,5/62,5, confronto dei campioni A, 2i_2h e 3i_4h

L'invecchiamento ha prodotto una ulteriore precipitazione e ingrossamento della seconda fase Mg₂Si con un relativo aumento della durezza dei campioni analizzati, +1,9 % per il campione invecchiato 2 ore e +2,6 % per quello invecchiato 4 ore.

Pezzo 4si_8h:

Il campione è stato ri-solubilizzato ad una temperatura maggiore per riportare in soluzione solida gli elementi in lega. Con l'invecchiamento ulteriore è avvenuta una nuova precipitazione a bordo grano ed ingrossamento delle seconda fase Mg₂Si che ha portato ad ottenere i seguenti dati. Come per i campioni precedentemente analizzati sono state effettuate tre prove di durezza nella parte superiore, media ed inferiore calcolando la media di tre impronte per ciascuna posizione per poi confrontarle con il campione di riferimento A.

Nella Tabella 17 si riportano i risultati delle prove:

	HBW 1	HBW 2	HBW 3	HBW
1A	109,3	113,1	114,2	112,2
2A	113,2	115,6	112,9	113,9
3A	115,5	113	114,9	114,5
				113,5
8H-1	116,4	115,2	117,1	116,2
8H-2	116,3	116,3	114,9	115,8
8H-3	116,7	117,6	115,4	116,5
				116,2

Tabella 17 - Risultati prova di durezza HBW 2,5/62,5, confronto dei campioni A, 4si_8h

Il trattamento, a parità di tempo e temperatura di invecchiamento, ha consentito di aumentare del 2,4% la durezza del materiale.

3.5.3 Confronto micrografie

Sono stati ricavati dei provini per l'analisi micrografica dagli spezzoni utilizzati per le prove di durezza. Per poter apprezzare meglio la variazione della dimensione del grano tra interno ed esterno della sezione del pezzo sono stati ricavati provini trasversali da parte interna a parte esterna. La dimensione del provino è leggermente maggiore a quelle consuete ma può essere comunque lavorato normalmente. Si procede alla levigatura dei provini con carte da 180, 320, 800 e 1000. Successivamente viene fatta la lappatura, che solitamente necessita solo di passaggi con panni e paste diamantate da 6 μm e 1 μm , mentre per questo tipo di materiale è necessario un passaggio finale con una sospensione di ossidi di magnesio per ottenere una superficie a specchio idonea all'analisi micrografica.

Con l'analisi al microscopio ad opportuni ingrandimenti (100x) si procede come indicato nella normativa ASTM E112-13 alla valutazione della dimensione del grano per confronto con il *Plate Number I* disponibile in laboratorio.

Pezzi 2i_2h e 3i_4h:

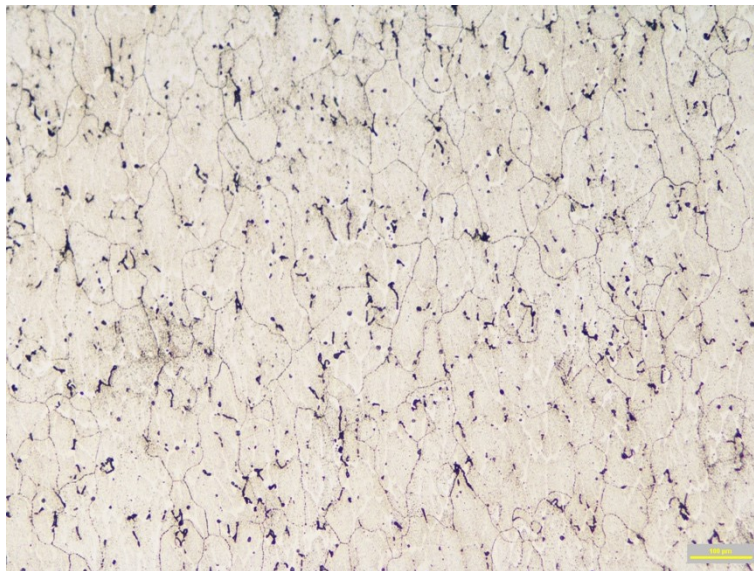


Figura 46 - Micrografia 2i_2h, grain size number 3,5

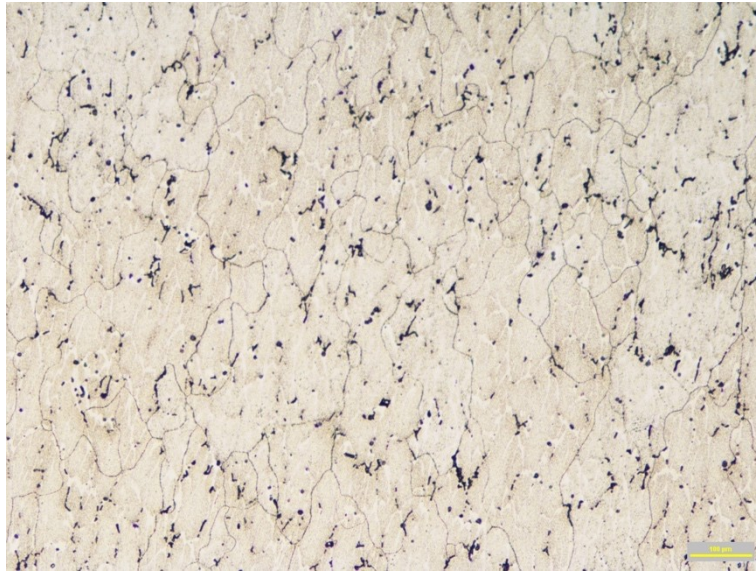


Figura 47 - Micrografia 3i_4h, grain size number 3

Pezzo 4si_8h:

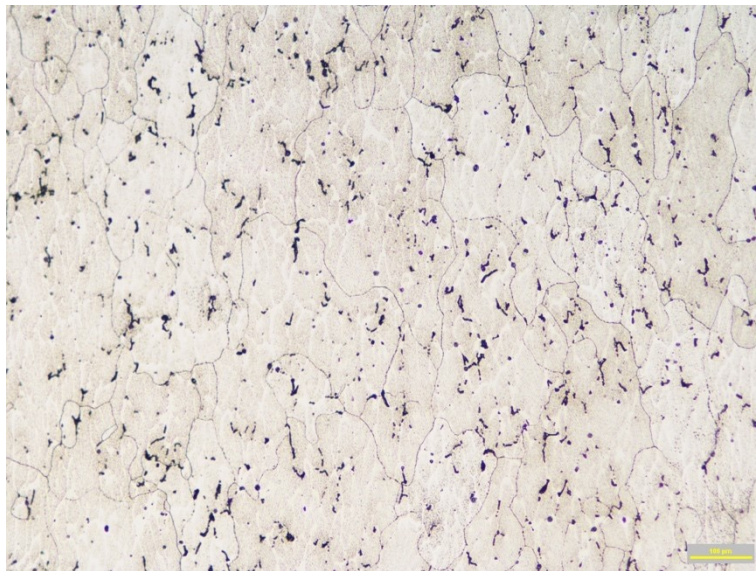


Figura 48 - Micrografia 4si_8h, grain size number 3

Il miglioramento delle prove meccaniche non è facilmente rilevabile dalle caratteristiche micrografiche. Il materiale infatti presenta analoghe dimensioni del grano e distribuzione della seconda fase Mg_2Si .

Conclusioni

Questo lavoro di tesi è stato svolto presso il *Laboratorio Forgerossi Research* facente parte di *Siderforgerossi Group S.p.A.* con l'obiettivo di condurre alcuni progetti propedeutici al conseguimento dell'accreditamento *Nadcap* nel primo trimestre del 2021.

Per comprendere al meglio le dinamiche del laboratorio e le procedure di prova si è deciso di apportare le implementazioni richieste dal programma *PRI-Nadcap* contestualmente alla caratterizzazione di un materiale nuovo per il laboratorio e per l'azienda, una lega di alluminio della serie AA6061.

Seguendo le indicazioni del documento AC7101/1 REV.G all'APPENDIX D è stato costituito con successo un programma IRR (*Internal Round Robin*) caratterizzando un materiale di tipo "*unverified material*" e calcolando la sua distribuzione di riferimento. Con il programma IRR è stato poi possibile procedere alla qualifica della catena operatore-macchina con la creazione di un foglio di calcolo automatico a feedback condizionali. Gli operatori del laboratorio, pur essendo le forcelle dei risultati molto strette, hanno conseguito con successo la qualifica, indice di qualità delle procedure di prova svolte all'interno del *Laboratorio Forgerossi Research*.

Per la caratterizzazione è stato necessario prendere confidenza con le procedure di prova del laboratorio e sono state eseguite: prova di trazione, prova di durezza, analisi macrografica, analisi micrografica, analisi chimica oltre al procedimento di ricavo e preparativa dei provini.

A conclusione della caratterizzazione del materiale allo stato di fornitura -T6, ovvero già solubilizzato ed invecchiato, sono stati proposti dei trattamenti termici aggiuntivi per verificare la variazione delle proprietà meccaniche.

Sono stato proposti due invecchiamenti ulteriori di 2 e 4 ore alla stessa temperatura del trattamento precedente e un trattamento più radicale di ri-solubilizzazione a temperatura maggiore, ricavata dai diagrammi di solubilità Al-Mg₂Si, e invecchiamento di 8 ore analogo al precedente. Dai risultati delle prove di trazione e durezza è stato possibile constatare un considerevole miglioramento in entrambi i casi.

Bibliografia e sitografia

[1] Giornale di Vicenza, “*Siderforgerossi Nasce la newco della metallurgia*”, M.Bernardini, 17 Luglio 2013

[2] <http://www.siderforgerossi.com/history1.html>

[3] <http://www.siderforgerossi.com/quality.html>

[4] *Manuale della Qualità Rev.1*, Laboratorio Forgerossi Research, 2018

[5] www.accredia.it , Accredia / Banche Dati / Laboratori di prova / Prove accreditate del Laboratorio 1422

[6] UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018, “*Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura*”, Febbraio 2018

[7] *RT-24 rev.02*, “*Prove valutative*” (Proficiency testing), Accredia, 1 Gennaio 2016

[8] *RT-08 rev.04*, “*Prescrizioni per l’accreditamento dei laboratori di prova – rif. Norma UNI EN CEI ISO/IEC 17025:2018*”, Accredia, 30 Maggio 2018

[9] ISO 9001:2015, “*Sistemi per la gestione della qualità - requisiti*”, Settembre 2015

[10] European Accreditation EA-4/15 rev.01, “*Accreditation For Non-Destructive Testing*”, 21 Maggio 2015

[11] JCGM 100:2008 “*Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Settembre 2008

[12] DT-0002/6 rev.00, “Guida per la valutazione e l’espressione dell’incertezza nelle misurazioni”, Accredia, 1 Dicembre 2007

[13] European Accreditation EA-4/02 rev.01, “Expression of uncertainty of measurement in calibration”, Settembre 2013

[14] DT-05_DT rev.01, “Introduzione ai criteri di valutazione dell’incertezza di misura nelle tarature”, Accredia, 20 Novembre 2014

[15] https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_aerospaziale

[16] UNI EN 9100:2018, “Sistemi di gestione per la qualità - Requisiti per le organizzazioni dell’aeronautica, dello spazio e della difesa”, 19 Luglio 2018

[17] <https://p-r-i.org/sector/aviation-defense-space/>

[18] <https://it.wikipedia.org/wiki/Nadcap>

[19] “Materiali per l’industria aeronautica”, Unità 1, L. Mascolo, pagg 1-12

[20] “Materiali per l’industria aeronautica”, Unità 2, L. Mascolo, pagg 13-14

[21] Appunti del corso “Prodotti Metallurgici Innovativi e Multifunzionali”, F. Bonollo, A.A. 2017/2018

[22] Appunti del corso “Materiali Metallici e Trattamenti Termici”, G. Timelli, A.A. 2016/2017

[23] C.R. Brooks, “Heat Treating of Aluminum Alloys”, ASM Handbook, Vol. 4, pag. 1889, 1991

[24] I.Polmear, D. StJohn, J.Nie, M. Qian, “Light Alloys – Metallurgy of the Light Metals”, 5th Edition, Elsevier, pagg. 157-263, 2017

- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy
- [26] https://it.wikipedia.org/wiki/CFM_International_CFM56#CFM56-7B_%22Evolution%22
- [27] *Nota 21, Nota 22*, ASTM E8/E8M-16a, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, pag. 16, 2016
- [28] ASTM B557-15, “*Standard test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum – and Magnesium – Alloy Products (metric)*”, 2015
- [29] A. Tonietto, “*Caratterizzazione microstrutturale e meccanica di leghe di alluminio della serie AlMg5Si2Mn*”, Tesi di laurea triennale in ingegneria Meccanica e Meccatronica, Unipd, DTG, A.A. 2016/2017
- [30] R. Zanolli, “*Caratterizzazione microstrutturale e meccanica di leghe AlMg5Si2Mn dopo trattamento di modifica*”, Tesi di laurea triennale in ingegneria Meccanica e Meccatronica, Unipd, DTG, A.A. 2017/2018
- [31] *TABLE 1 “Suggested Comparison Charts for Metallic Materials”*, ASTM E112-13, “*Standard Test Method for Determining average Grain Size*”, 2013
- [32] ASM2772G, “*Heat Treatment of Aluminum Alloy Raw Materials*”, 19 Aprile 2016
- [33] AMS2750F, “*Heat Treatment Standard and Calibration*”, 29 Giugno 2020
- [34] “*Corso avanzato sulle Leghe di Alluminio: Trattamenti termici*”, F. Bonollo, 18 Marzo 2016

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro di tesi è doveroso un ringraziamento al Professor Franco Bonollo, al mio tutor aziendale Matteo Longin e a *Siderforgerossi Group S.p.a.* In particolare un grande Grazie va a tutte le persone, ora miei colleghi, del *Laboratorio Forgerossi Research*: Denis, Giorgio, Roberto, Mattia, Ugo, Manolo, Andrea R. Un particolare ringraziamento va al responsabile del laboratorio Andrea Zorzi, amico e guida in questo percorso, per avermi accolto con pazienza e fiducia in questo progetto così importante di crescita professionale.

Ci tengo molto a ringraziare tutti coloro che mi hanno accompagnato dai primi passi alle ultime fatiche di questo prezioso percorso universitario.

In primis ringrazio la mia famiglia, i miei genitori, mio fratello, i nonni, per avermi sostenuto nelle vittorie e soprattutto nelle sconfitte. Non mi avete mai sottoposto a pressioni se non quella di poter deludere la vostra infinita fiducia. Vi sono grato per questo, è stato un tenero e dolce punto saldo che mi ha insegnato ad arrivare con determinazione ad ogni traguardo.

Ringrazio i miei compagni di viaggio: Andrea, Riccardo, Jacopo, Alessandro, Giacomo, Giuliano, Martino, Luca, Francesco. La nostra amicizia fatta di sorrisi e collaborazione ci ha portato tutti insieme ad importanti mete.

Ringrazio con il cuore anche tutti i miei amici, il gruppo Sammy Runners, il gruppo De Fajans, grazie ai quali ho scoperto che con impegno e spensieratezza si può fare del bene.

Crescere insieme a persone che credono nei giovani non è mai un'opportunità scontata, personalmente devo ringraziare il mio Presidente Amerigo Basso, con lui tutta l'A.I.Pro.Sa.B. e il mio Sindaco Raffaella Campagnolo assieme a tutta la nostra lista. Queste persone e i loro collaboratori sono per me un esempio virtuoso e sono onorato di avere l'opportunità di essere guidato con lungimiranza e premura ad affrontare al meglio il mio futuro.

Infine ringrazio Sammy per rendere speciali le nostre vite.