

L'alluminio e le sue leghe

Marco V. Boniardi
Andrea Casaroli

L'**ALLUMINIO** puro (cioè con un contenuto minimo di alluminio pari al 99.50%) è un metallo di color grigio argenteo con una struttura cristallina cubica a facce centrate. La sua densità e la sua temperatura di fusione sono pari rispettivamente a 2700 kg/m³ e 660°C. Le principali proprietà dell'alluminio puro, che lo hanno reso importante a livello industriale, sono:

- **bassa densità**;
- **buona conducibilità elettrica e termica**, pari a circa 2/3 della conducibilità del rame (grazie alla sua bassa densità, l'alluminio è comunque il miglior conduttore elettrico a parità di peso);
- **elevata grado di deformabilità** (l'alluminio può essere facilmente ridotto in lamine sottili - malleabilità, in fili sottili - duttilità o in profilati, tramite processi di deformazione plastica);
- **buona resistenza alla corrosione in ambienti neutri con pH da 4 a 8** (la resistenza alla corrosione in ambienti acidi o basici è invece scarsa);
- **buona saldabilità** (a causa della forte reattività dell'alluminio per l'ossigeno è necessario utilizzare atmosfere protettive, in modo da isolare il giunto di saldatura dall'ambiente circostante; le tecniche principalmente utilizzate sono il TIG - Tungsten Inert Gas e il MIG - Metal Inert Gas);
- **elevata riflettanza** (per riflettanza si intende la porzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere);

Le proprietà meccaniche dell'alluminio puro, allo stato ricotto, sono piuttosto scarse:

- carico unitario di rottura (**R**): **60 ÷ 100 MPa**;
- carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **30 ÷ 50 MPa**;
- durezza: **15 ÷ 25 HB**;
- modulo elastico (**E**): **all'incirca 70.000 MPa**;
- allungamento percentuale a rottura (**A%**): **superiore al 40%**;

La resistenza meccanica dell'alluminio puro può essere notevolmente migliorata per incrudimento (tramite deformazione plastica a freddo), attraverso cui è possibile aumentare il carico unitario di rottura di una volta e mezzo e triplicare il carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (figura 1).

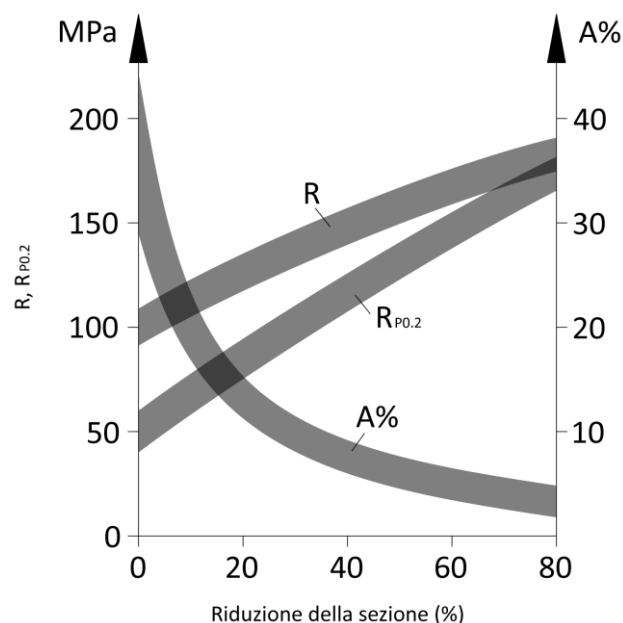


Figura 1: Andamento del carico unitario di rottura (R), del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (R_{p0.2}) e dell'allungamento percentuale a rottura (A%) in funzione del grado di incrudimento per l'alluminio puro.

A causa delle sue mediocri proprietà meccaniche, gli impieghi industriali dell'alluminio puro sono ridotti a pochi casi particolari che si riferiscono alla realizzazione di conduttori elettrici, fogli per la conservazione di alimenti, alla fabbricazione di impianti chimici, scambiatori di calore, conduttori e condensatori elettrici, corpi riflettenti ed applicazioni architettoniche e decorative.

Le scarse proprietà meccaniche dell'alluminio puro ne hanno da sempre impedito un ampio utilizzo in ambito industriale, dove invece trovano largo impiego le sue leghe. I principali elementi di alligazione utilizzati nelle leghe commerciali sono il rame, il manganese, il silicio, lo zinco, il magnesio e lo zinco; gli effetti di tali elementi sulle proprietà dell'alluminio sono elencate sinteticamente in figura 2.

	Cu	Mn	Si	Mg	Zn
Proprietà meccaniche	↑↑	↑	↑	↑	↑↑
Deformabilità a freddo	↓	↑	↓	↓	↓
Resistenza a corrosione	↓	↑	=	↑	=
Saldabilità	↓	↑	=	↑	↓

Figura 2: Effetto dei principali elementi di lega sulla resistenza meccanica, sulla deformabilità a freddo, sulla resistenza alla corrosione e sulla saldabilità dell'alluminio puro (↑ migliora; ↓ peggiora; = rimane invariata).

L'aggiunta degli elementi di lega permette di migliorare in modo considerevole la resistenza a trazione, che può superare quella degli acciai dolci, rendendo le leghe di alluminio adatte anche per impieghi strutturali. Questa considerazione è ancor più vera se si esaminano le proprietà meccaniche specifiche, cioè rapportate alla densità (σ/ρ), vero parametro di riferimento per tutte le applicazioni in cui vi siano problemi di contenimento dei pesi. Le leghe di alluminio presentano infatti valori di resistenza a trazione specifica molto elevati, superiori anche a quelli degli acciai ad alta resistenza (vedi figura 3).

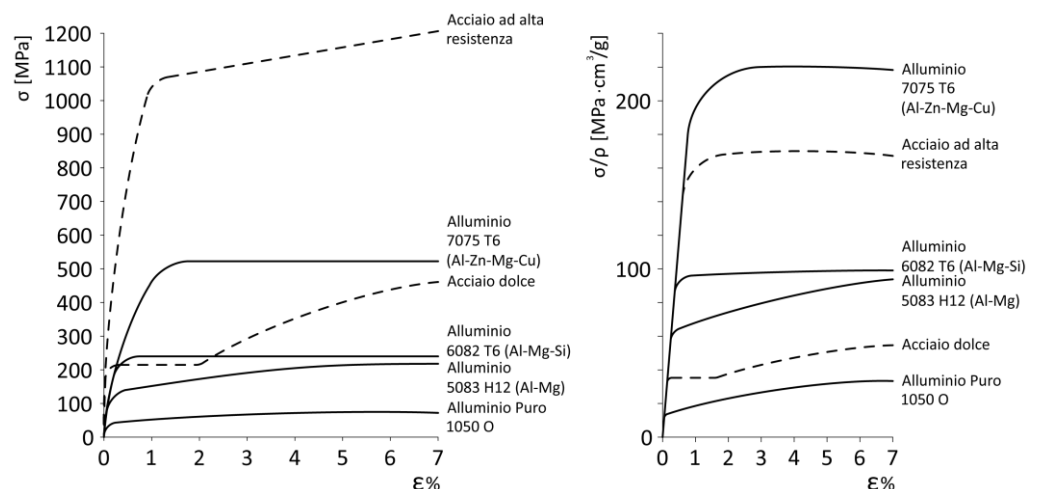


Figura 3: Curve di trazione $\sigma - \epsilon$ e curve di trazione $\sigma/\rho - \epsilon$ per alcune leghe d'alluminio e per un acciaio dolce ed un acciaio ad alta resistenza (adattata da M. Conserva, F. Bonollo, G. Donzelli, Alluminio - manuale degli impieghi).

Le leghe dell'alluminio vengono abitualmente suddivise in due categorie:

- **leghe da deformazione plastica;**
- **leghe per getti.**

Le **leghe da deformazione plastica vengono definite in tal modo perché il loro utilizzo avviene allo stato di semilavorati deformati plasticamente a freddo, in particolare laminati ed estrusi**; esse rappresentano la tipologia più importante fra le leghe leggere dell'alluminio, sia per quel che riguarda il numero di applicazioni che per la quantità di materiale prodotto.

Il sistema utilizzato per la designazione di questo tipo di leghe si basa su di un numero di quattro cifre che ha valore simbolico e che permette di individuare la composizione chimica della lega.

Più precisamente:

- la prima cifra indica la famiglia di leghe secondo lo schema seguente:
 - **1xxx**: alluminio puro (contenenti almeno il 99.0% di alluminio);
 - **2xxx**: leghe alluminio - rame;
 - **3xxx**: leghe alluminio - manganese;
 - **4xxx**: leghe alluminio - silicio;
 - **5xxx**: leghe alluminio - magnesio;
 - **6xxx**: leghe alluminio - magnesio - silicio;
 - **7xxx**: leghe alluminio - zinco - magnesio;
 - **8xxx**: leghe di alluminio contenenti elementi differenti da quelli precedentemente elencati.
- la seconda cifra corrisponde a zero se la lega contiene elementi conformi alla propria famiglia di appartenenza, mentre è diversa da zero se vi sono varianti rispetto alla lega base.
- le terza e la quarta cifra:
 - per l'alluminio non legato (1xxx) indicano la percentuale minima di alluminio; Il numero si riferisce alle cifre decimali, ad esempio 1050 indica alluminio puro al 99.50%;
 - per le leghe d'alluminio indicano un numero progressivo che definisce in modo univoco la lega all'interno della famiglia a cui appartiene.

Alcune proprietà caratteristiche delle leghe d'alluminio da deformazione plastica sono mostrate nelle figure 4, 5 e 6.

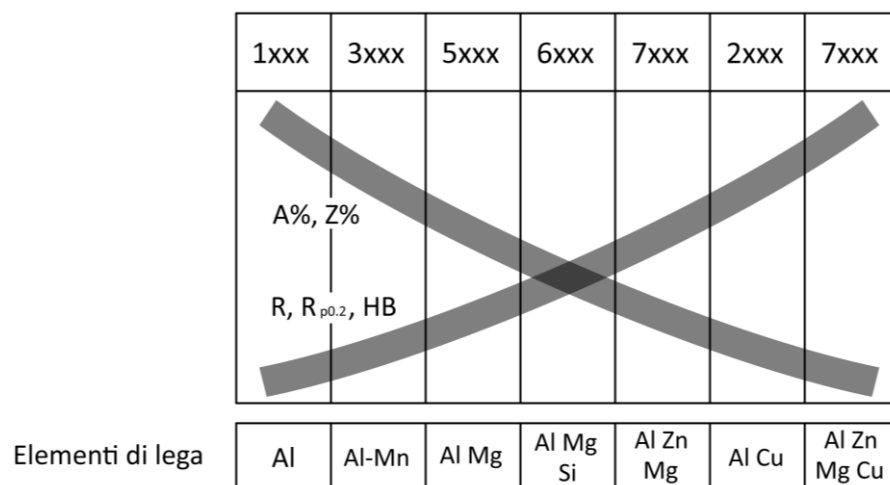


Figura 4: Andamento qualitativo delle proprietà meccaniche in funzione delle differenti famiglie di leghe d'alluminio da deformazione plastica (adattata da M. Conserva, F. Bonollo, G. Donzelli, Alluminio - manuale degli impieghi).

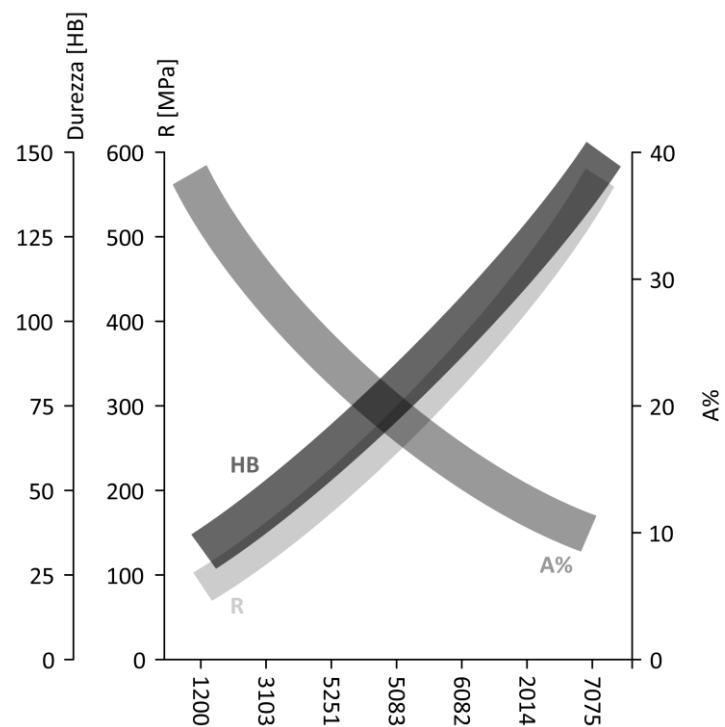


Figura 5: Andamento del carico unitario di rottura a trazione (R), della durezza Brinell e dell'allungamento percentuale a rottura (A%) per leghe di alluminio da deformazione plastica, appartenenti alle serie 1000, 2000, 3000, 5000, 6000 e 7000.

Questo sistema di designazione, nato negli Stati Uniti ad opera dell'Aluminum Association, è correntemente utilizzato anche in Europa. Negli USA le quattro cifre sono precedute dalle lettere AA (Aluminum Association) mentre in Europa la AA viene sostituita da EN AW dove EN sta per "Europeén Normalisation" e AW per "Aluminum Wrought", terminologia anglosassone per indicare i semilavorati ("Wrought") in lega d'alluminio.

Ad esempio le due sigle di seguito indicate, sono rappresentative della medesima lega:

- AA 6060;
- EN AW 6060.

Nell'ambito della normativa europea, a complemento della designazione numerica a quattro cifre, è possibile indicare anche la composizione chimica (es. EN AW 6060 [AlMgSi]).

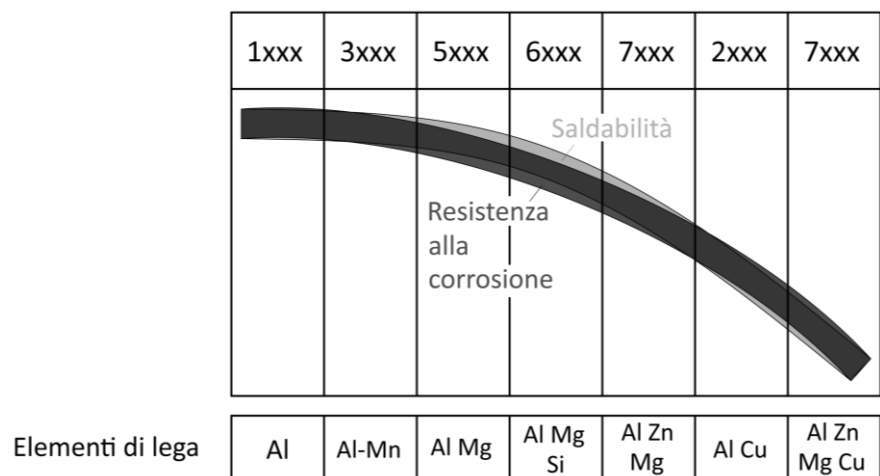


Figura 6: Andamento qualitativo della saldabilità e della resistenza alla corrosione in funzione delle differenti famiglie di leghe d'alluminio da deformazione plastica (adattata da M. Conserva, F. Bonollo, G. Donzelli, Alluminio - manuale degli impieghi).

Data la grande numerosità delle leghe da deformazione plastica, si ricorre ad una ulteriore classificazione legata al meccanismo metallurgico che ne determina le proprietà meccaniche. Le leghe da deformazione plastica vengono infatti suddivise in:

- **leghe da trattamento termico;**
- **leghe da invecchiamento.**

Sono da trattamento termico (anche chiamate da bonifica o da invecchiamento) le leghe appartenenti alle seguenti serie:

- **serie 2xxx** (alluminio-rame);
- **serie 6xxx** (alluminio-magnesio-silicio);
- **serie 7xxx** (alluminio-zinco-magnesio);
- **serie 8xxx** (solo alcune, come ad esempio le leghe alluminio-litio).

Queste leghe dell'alluminio sono utilizzate per la realizzazione di molti semilavorati, quali laminati, forgiati, trafilati ed estrusi: essi vengono inizialmente deformati plasticamente a caldo e poi subiscono un trattamento termico per migliorare la loro resistenza meccanica.

Il ciclo termico classico, a cui vengono sottoposte le leghe da trattamento termico prevede:

1. **trattamento termico di solubilizzazione** tramite riscaldamento a temperature dell'ordine di $450^{\circ}\text{C} \div 550^{\circ}\text{C}$: in questo modo la maggior parte degli elementi di lega presenti va in soluzione nella matrice d'alluminio;
2. **raffreddamento rapido in acqua**: si ottiene una soluzione solida di alluminio sovrassatura degli elementi di lega presenti a cui è stata impedita la normale formazione dei costituenti strutturali previsti dai diagrammi di stato (nella forma di placchette a bordo grano);
3. **trattamento termico di invecchiamento a bassa temperatura**: si ha la formazione (precipitazione) di composti intermetallici, costituiti dall'alluminio e dagli elementi di lega presenti, che risultano finemente ed omogeneamente dispersi nella matrice di alluminio. I principali composti intermetallici delle leghe di alluminio utilizzate in ambito industriale sono:
 - CuAl_2 , Al_2CuMg ;
 - Mg_2Si ;
 - MgZn_2 ;
 - Al_3Li .

Ciò spiega il motivo per cui solo le serie 2xxx, 6xxx e 7xxx (ed alcune leghe della serie 8xxx) possano essere considerate da trattamento termico: tali famiglie sono, infatti, le uniche a contenere i principali elementi costitutivi (Cu, Mg, Zn e Li) necessari alla formazione dei composti intermetallici.

Alla fase 1 e 2 si dà il nome di “tempra di soluzione”, la numero 3 prende il nome di “invecchiamento”, mentre l'insieme è denominato “bonifica delle leghe leggere”.

La tempra di soluzione (detta anche tempra strutturale) prevede una fase di riscaldamento, il mantenimento in temperatura ed un rapido raffreddamento. La scelta della temperatura (generalmente compresa fra i 450°C e i 550°C) è un'operazione delicata perché ad essa è legato il rischio di bruciatura del componente, ovvero la possibile comparsa di una fase liquida con parziale fusione della lega in prossimità dei bordi grano. La bruciatura è osservabile ad occhio nudo e si presenta sotto forma di un annerimento superficiale del pezzo, dovuto all'ossidazione del liquido formatosi a bordo grano o, nei casi più gravi, con la formazione di piccole gocce di metallo liquido.

Il tempo di mantenimento ricopre grande importanza, perché deve permettere un sufficiente grado di solubilizzazione degli elementi alliganti in modo da ottenere una soluzione solida omogenea. La scelta del tempo di mantenimento dipende dal processo produttivo e dalle dimensioni del semilavorato: essa può variare da una decina di minuti fino ad alcune ore.

In prima approssimazione è possibile affermare che:

- componenti fortemente incruditi richiedono tempi di solubilizzazione minori rispetto ai getti;
- componenti di piccola massa e spessore sottile richiedono tempi di solubilizzazione minori rispetto a pezzi di grande massa e spessore elevato.

Il principale mezzo di raffreddamento utilizzato è costituito dall'acqua che consente di ottenere velocità di raffreddamento superiori alle decine di gradi al secondo. L'utilizzo di un mezzo di raffreddamento così drastico e, nel contempo, economico, è possibile grazie alla elevata conducibilità termica delle leghe di alluminio: in tal modo le temperature sono più omogenee, si hanno minori gradienti termici tra superficie e cuore dei pezzi e si ottengono tensioni residue di limitata entità. L'utilizzo di un mezzo ad elevata drasticità, quale l'acqua, evita inoltre la formazione di precipitati grossolani che non favorirebbero l'indurimento della lega e, nel contempo, peggiorerebbero la resistenza alla corrosione intergranulare.

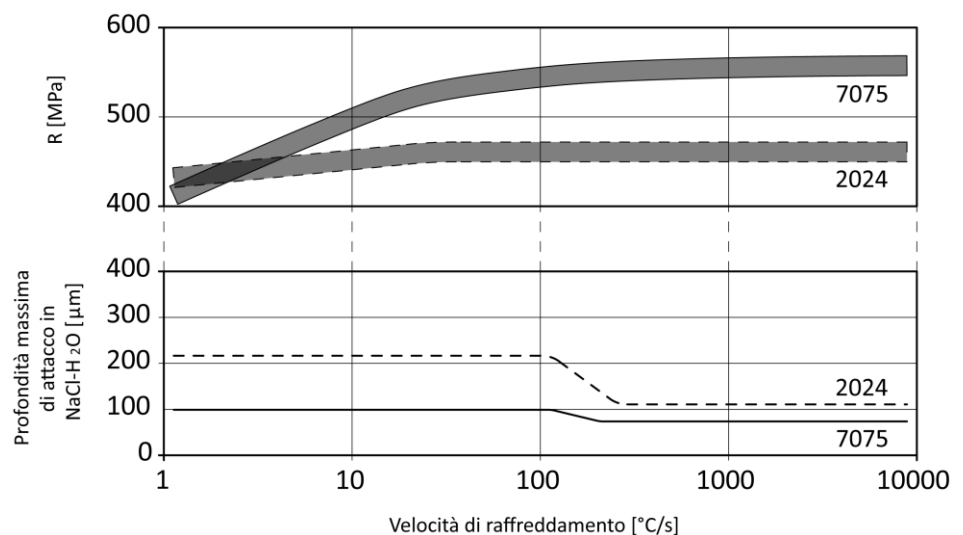


Figura 7: Effetto della velocità di raffreddamento dopo tempra di soluzione sul carico unitario di rottura a trazione (R) e sulla profondità di corrosione di laminati in 2024-T4 e 7075-T6 (adattata da M. Conserva, F. Bonollo, G. Donzelli, Alluminio - manuale degli impieghi).

L'“invecchiamento” (spesso chiamato “invecchiamento artificiale”) prevede una fase di riscaldamento, una di mantenimento ed un successivo raffreddamento.

- il riscaldamento ed il mantenimento della lega vengono effettuati alla temperatura di circa 150°C ÷ 200°C per un tempo variabile fra 3h e 20h;
- durante l'invecchiamento si osserva la precipitazione delle fasi indurenti, costituite da composti intermetallici, finemente ed omogeneamente dispersi nella matrice di alluminio. Il rapido raffreddamento imposto dalla precedente tempra di solubilizzazione crea, infatti, condizioni di sovrassaturazione degli elementi di lega nell'alluminio. La soluzione sovrassatura è per sua stessa natura instabile e tende all'equilibrio strutturale, consentendo la formazione dei precipitati;
- l'invecchiamento deve essere effettuato immediatamente dopo la tempra di solubilizzazione.

Se ciò non avviene, si assiste ad una iniziale formazione di precipitati prima

del trattamento termico: tale fenomeno impedisce di ottenere le proprietà meccaniche desiderate, una volta realizzato l'invecchiamento;

- l'invecchiamento può essere eseguito anche a temperatura ambiente; in tal caso si parla di "invecchiamento naturale": esso necessita di tempi più lunghi, superiori alle 48h, riscontrando valori di durezza leggermente superiori e di tenacità leggermente inferiori rispetto all'invecchiamento artificiale.

Il massimo valore di durezza raggiungibile durante l'invecchiamento è dipendente sia dalla temperatura che dal tempo di permanenza. Dal diagramma di figura 8 si nota come, eseguendo l'invecchiamento a temperature diverse (crescenti da T_5 a T_1), si ottenga una serie di curve il cui massimo cresce, spostandosi verso sinistra, all'aumentare della temperatura. Congiungendo i massimi è possibile ricavare la curva, in linea tratteggiata, rappresentativa del limite di indurimento massimo per la lega presa in considerazione.

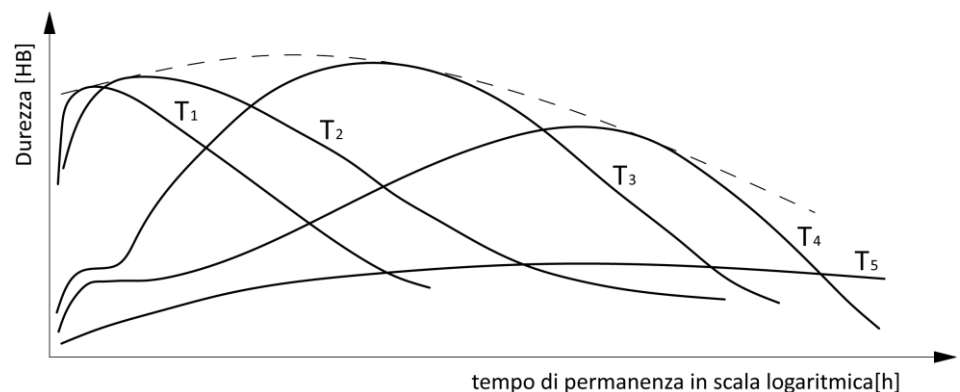


Figura 8: Durezza ottenibile tramite trattamento termico di invecchiamento artificiale in differenti condizioni operative. Le temperature sono crescenti da T_5 a T_1 (tratto da D. Veschi, L'alluminio e le leghe leggere).

Per riuscire a comprendere perché ogni curva presenti un valore massimo di durezza e perché i valori di tale massimo si spostino verso sinistra all'aumentare della temperatura, è necessario approfondire la modalità attraverso cui la precipitazione consente di aumentare la durezza della lega.

La presenza dei precipitati non agisce tanto creando un ostacolo fisico al moto delle dislocazioni, quanto piuttosto generando una distorsione dei piani del reticolo cristallino in corrispondenza delle zone in cui tali precipitati si vengono a formare: è la distorsione locale del reticolo, assimilabile ad un incrudimento localizzato, a provocare la resistenza al moto delle dislocazioni e di conseguenza l'aumento di durezza della lega.

Affinché i composti intermetallici siano in grado di deformare localmente, in modo significativo, i piani del reticolo cristallino è necessario che la loro dimensione rientri all'interno di un certo intervallo, chiamato "dispersione critica". Al di sotto di tale intervallo dimensionale (zona di "dispersione atomica") i precipitati non hanno la grandezza necessaria a deformare i piani del reticolo, mentre al di sopra (zona di "coalescenza"), i precipitati sono talmente grossolani da non interessare in modo significativo i reticoli circostanti (vedi figura 9).

Avendo compreso le modalità con cui si sviluppa il meccanismo di indurimento, è evidente come ciò dipenda:

- dalla diffusione e dalla mobilità degli atomi degli elementi di lega che, trovandosi in condizioni di non equilibrio, tendono a raggrupparsi formando

i precipitati;

- dalla temperatura, il cui aumento, provoca un incremento della diffusione e della mobilità atomica.

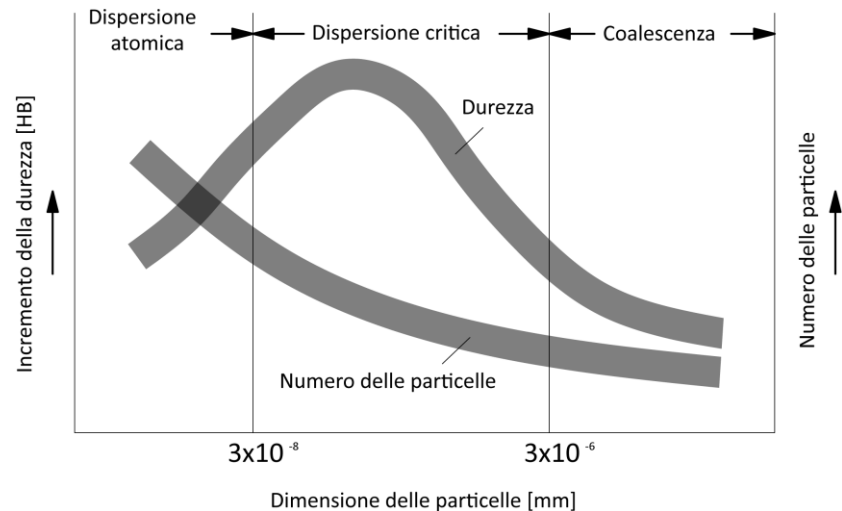


Figura 9: Relazione fra durezza e dimensioni delle particelle precipitate durante il trattamento termico di invecchiamento (adattata da D. Veschi, L'alluminio e le leghe leggere).

Dalle considerazioni precedentemente esposte deriva che (si veda di nuovo la figura 8):

- ogni curva presenta un massimo, perché solo all'interno di un preciso intervallo temporale le particelle riescono ad assumere la dimensione necessaria a deformare in modo opportuno il reticolo. Inizialmente hanno dimensioni troppo piccole e si trovano all'interno della zona di "dispersione atomica"; dopo un certo tempo, per contro, iniziano a raggrupparsi entrando nella zona di "coalescenza";
- il massimo di ogni curva si sposta a sinistra al crescere delle temperatura, perché tale aumento provoca un incremento della diffusione e della mobilità atomica degli elementi di lega, diminuendo il tempo necessario alla formazione dei precipitati e quindi all'aumento di durezza. Per temperature troppo basse la mobilità atomica degli elementi di lega è talmente scarsa da impedire la formazione di precipitati di dimensione sufficiente a distorcere i piani cristallini.

Questa tipologia di grafici, la cui forma varia al variare della lega, viene utilizzata industrialmente per la scelta delle condizioni operative (tempi e temperature) a cui effettuare l'invecchiamento: di norma si cerca di tendere alle condizioni indicate dalla curva tratteggiata.

Per alcune serie, quali la 7xxx, tra il trattamento termico di tempra e quello di invecchiamento è anche possibile effettuare opportuni processi di deformazione plastica a freddo in modo da incrudire il materiale; tale procedimento consente di aumentare ulteriormente la resistenza meccanica e la durezza.

I trattamenti termici, a cui vengono sottoposte le leghe da deformazione plastica sono indicati con le seguenti sigle:

- **T1**
 - rapido raffreddamento a seguito di un processo di fabbricazione ad alta temperatura (forgiatura, estrusione, laminazione, ecc.);
 - invecchiamento naturale fino ad una condizione di stabilità;

- **T2**
 - rapido raffreddamento a seguito di un processo di fabbricazione ad alta temperatura (forgiatura, estrusione, laminazione, ecc.);
 - deformazione a freddo (per aumentare la resistenza meccanica);
 - invecchiamento naturale fino ad una condizione di stabilità microstrutturale;
- **T3**
 - solubilizzazione;
 - deformazione a freddo (per aumentare la resistenza meccanica);
 - invecchiamento naturale fino ad una condizione di stabilità microstrutturale;
- **T4**
 - solubilizzazione;
 - invecchiamento naturale fino ad una condizione di stabilità microstrutturale;
- **T5**
 - rapido raffreddamento a seguito di un processo di fabbricazione ad alta temperatura (forgiatura, estrusione, laminazione, ecc.);
 - invecchiamento artificiale;
- **T6**
 - solubilizzazione;
 - invecchiamento artificiale;
- **T7**
 - solubilizzazione;
 - invecchiamento artificiale;
 - sovrainvecchiamento artificiale;
- **T8**
 - solubilizzazione;
 - deformazione a freddo (per aumentare la resistenza meccanica);
 - invecchiamento artificiale;
- **T9**
 - solubilizzazione;
 - invecchiamento artificiale;
 - deformazione a freddo (per aumentare la resistenza meccanica);
- **T10**
 - rapido raffreddamento a seguito di un processo di fabbricazione ad alta temperatura (forgiatura, estrusione, laminazione, ecc.);
 - deformazione a freddo (per aumentare la resistenza meccanica);
 - invecchiamento artificiale;

In aggiunta ai codici summenzionati, possono essere apposte, in successione, sigle alfa-numeriche indicanti cicli termici o termo-meccanici in grado di modificare ulteriormente alcune proprietà della lega quali la deformabilità, la resistenza alla corrosione o la tenacità alla frattura.

Leghe serie 2xxx (Alluminio-Rame), commercialmente dette AVIONAL

Il principale elemento di lega è il rame che, per percentuali superiori allo 0.30%, forma una struttura mista fra la soluzione solida α e il composto intermetallico CuAl_2 . Dal diagramma di stato Al-Cu (vedi figura 10) si nota che, con una concentrazione di rame del 33%, si ha la formazione di un eutettico a 548°C fra α e CuAl_2 (fase θ); a tale temperatura si registra la massima solubilità del rame nella fase α dell'alluminio (5.65%).

La particolare forma del diagramma di stato Al-Cu permette alle leghe della serie 2xxx di essere sottoposte al trattamento di bonifica delle leghe leggere.

Il trattamento di tempra, seguito da quello di invecchiamento artificiale, permette la precipitazione di particelle finemente e omogeneamente disperse del composto intermetallico CuAl_2 . Il fenomeno descritto si verifica soprattutto per leghe contenenti tenori di rame inferiori al 5.65% (di solito $\text{Cu} = 3\div 4\%$): in queste condizioni si ha la massima solubilità di rame nel reticolo α dell'alluminio.

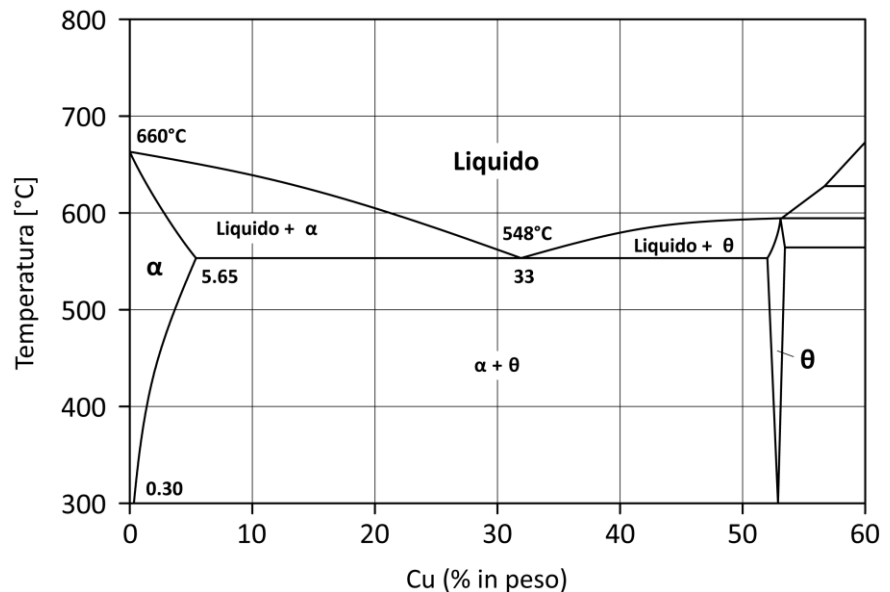


Figura 10: Il diagramma di stato Al - Cu (porzione di interesse per le leghe 2xxx).

Vediamo ad esempio ciò che avviene se si tratta termicamente una lega contenente il 3.5% di rame, ipotizzando di effettuare una ricottura completa oppure una tempra di soluzione più invecchiamento.

Nel caso della ricottura completa la lega verrà riscaldata ad una temperatura di 520°C-530°C e successivamente verrà raffreddata lentamente in forno (assimilabile, per comodità, ad un raffreddamento per successivi stati d'equilibrio). Inizialmente, ad alta temperatura, si avrà una soluzione solida omogenea di cristalli α , in cui tutto il rame è disciolto nel reticolo dell'alluminio. Solo successivamente, per effetto del lento raffreddamento, si osserverà la formazione di placchette a bordo grano di CuAl_2 (fase θ), a causa della diminuzione di solubilità del rame nell'alluminio (figura 11).

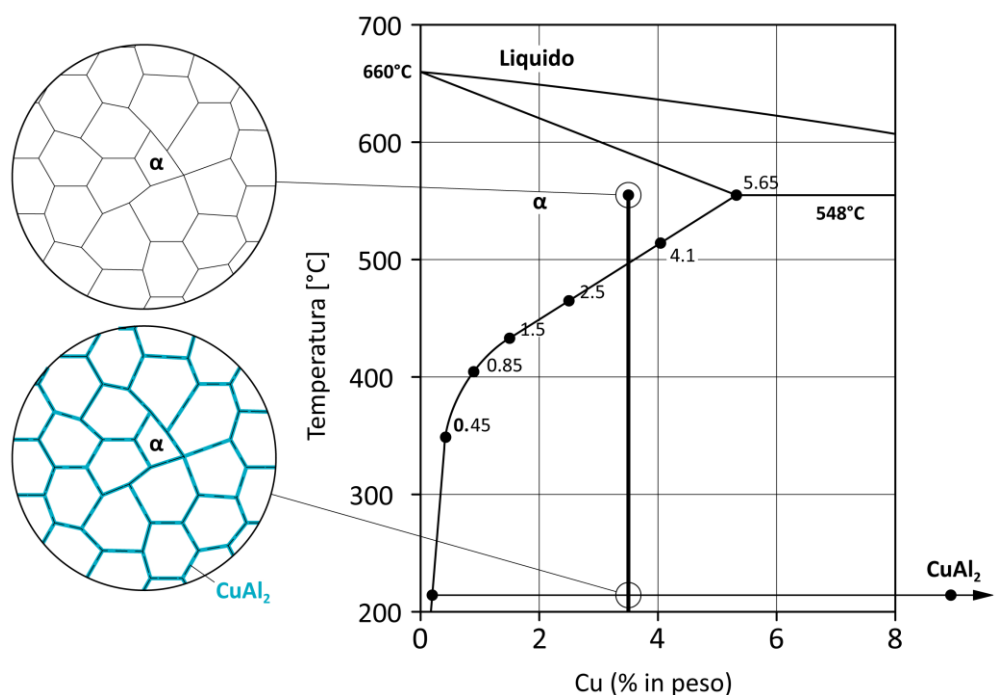


Figura 11: Diagramma di stato Al - Cu (porzione di interesse per le leghe 2xxx).

Se invece si esegue un rapido raffreddamento dalle temperature di 520°C-530°C, si impedisce la precipitazione della fase CuAl_2 e si ottiene, come osservato in precedenza, una soluzione solida sovrassatura di rame nel reticolo dell'alluminio. Solo con il successivo invecchiamento avverrà la precipitazione fine ed omogenea delle particelle intermetalliche (a livello submicroscopico) con un conseguente effetto di rafforzamento della lega (vedi figura 12). L'andamento della durezza delle leghe Al-Cu al termine del processo di bonifica, in funzione del tenore di rame e del tempo di invecchiamento a 150°C, è mostrato in figura 13.

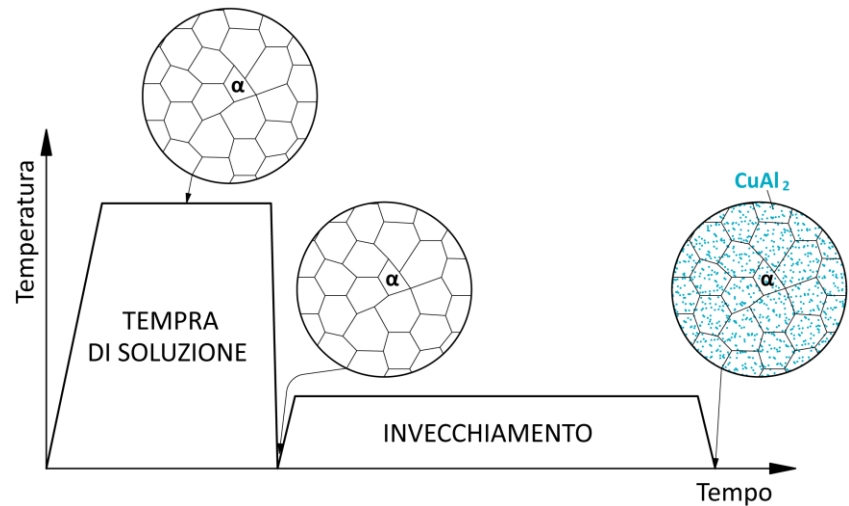


Figura 12: Schematizzazione del trattamento di tempra di soluzione e invecchiamento delle leghe Al-Cu e relative strutture ottenibili.

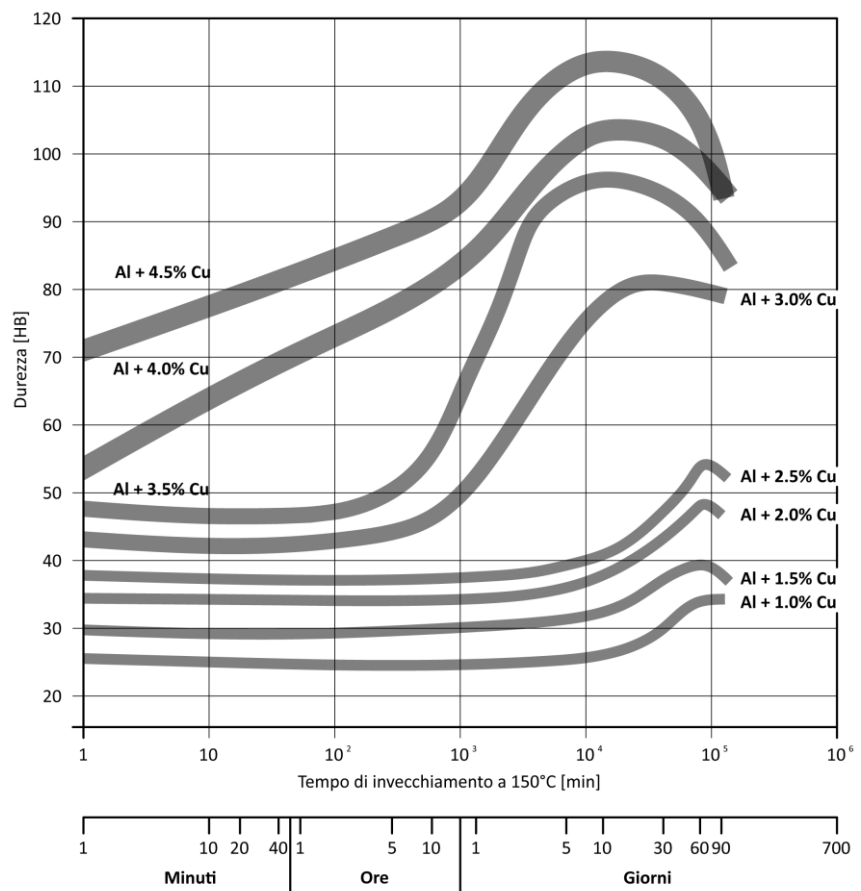


Figura 13: Andamento della durezza di leghe Al-Cu sottoposte ad invecchiamento artificiale, in funzione del contenuto di rame e del tempo di permanenza alla temperatura di 150°C. (tale grafico è indicativo anche dell'andamento del carico unitario di rottura a trazione essendo le due proprietà correlate tra loro).

Le leghe della serie 2xxx, unitamente a quelle della serie 7xxx, presentano le più elevate caratteristiche meccaniche fra tutte le leghe di alluminio, comparabili a quella di un buon acciaio da costruzione per uso generale.

Le leghe della serie 2xxx sono difficilmente saldabili, hanno grossi problemi di deformabilità a freddo e presentano una scarsa resistenza alla corrosione. Le tipiche proprietà di queste leghe sono:

- **scarsa deformabilità a freddo;**
- **scarsa resistenza alla corrosione**, tanto da richiedere la loro placcatura con alluminio ad elevata purezza. La scarsa resistenza alla corrosione è dovuta alla presenza di rame sotto forma di precipitati dispersi nella lega; il rame presenta una nobiltà molto maggiore rispetto all'alluminio e, quindi, se messo in contatto con quest'ultimo e con un elettrolita (ad esempio in soluzioni acquose), provoca l'insorgenza di fenomeni di corrosione galvanica;
- **scarsa saldabilità** dovuta alla formazione di cricche a caldo all'interno del giunto saldato durante la solidificazione del cordone di saldatura. Nelle leghe della serie 2xxx, a causa dell'ampio intervallo di solidificazione generato dalla aggiunta di rame, si forma una significativa quantità di liquido che, oltre al problema delle cricche a caldo, può dare origine anche alla formazione di cavità intergranulari (vedi figura 14);

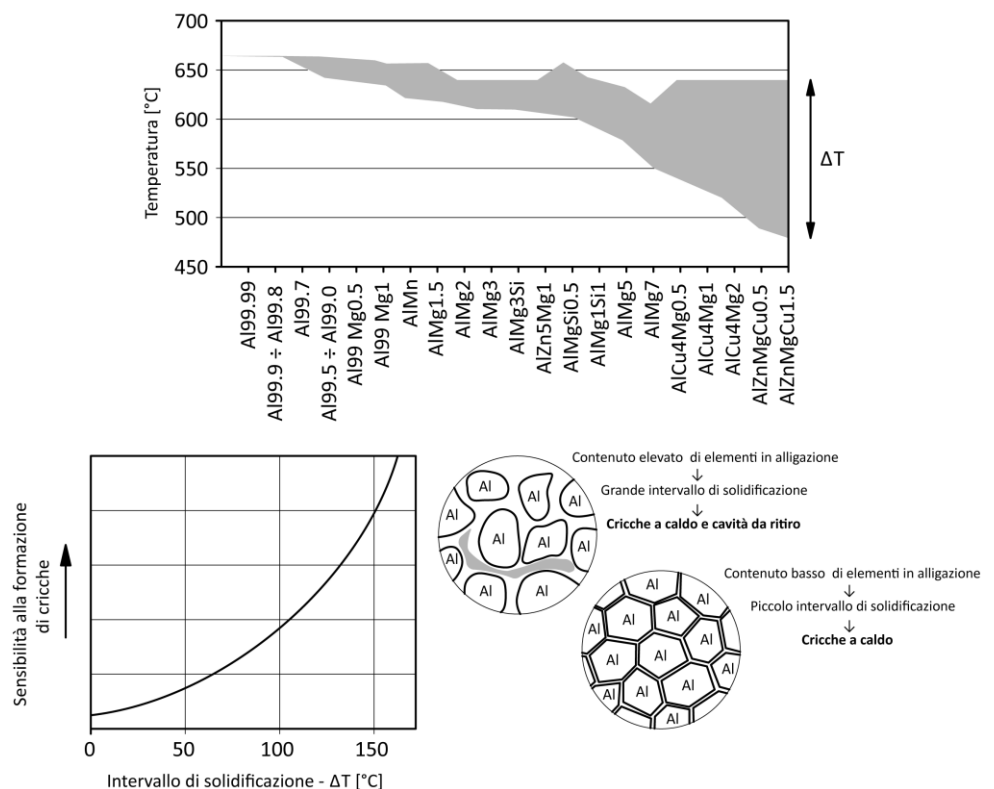


Figura 14: Ampiezza dell'intervallo di solidificazione (ΔT) per alcune leghe di alluminio e correlazione tra ΔT e la sensibilità alla cricatura a caldo/formazione di cavità da ritiro (adattata da M. Conserva, F. Bonollo, G. Donzelli, Alluminio - manuale degli impieghi).

- **eccellente resistenza meccanica** (dopo solubilizzazione e invecchiamento artificiale - T6):
 - carico unitario di rottura (**R**): **400 ÷ 500 MPa**;
 - carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **300 ÷ 400 MPa**;
 - durezza: **110 ÷ 120 HB**;
 - modulo elastico (**E**): **70.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A%**): **8% ÷ 10%**.

I principali settori di applicazione delle leghe della serie 2xxx sono:

- industria aeronautica;
- industria aerospaziale;
- industria bellica;
- industria meccanica.

Leghe serie 6xxx (Alluminio-Magnesio-Silicio), commercialmente dette ANTICORODAL

I principali elementi di lega della serie 6xxx sono il Magnesio ed il Silicio. Le leghe della serie 6xxx costituiscono la famiglia più utilizzata in assoluto nell'ambito delle leghe leggere dell'alluminio, grazie alla elevata deformabilità, truciolabilità e saldabilità ed alle buone proprietà meccaniche (anche se inferiori a quelle delle leghe 2xxx).

Dall'osservazione del diagramma di stato Al-Mg si nota la presenza dell'intermetallico Mg_2Al_3 (fase β) e di un ampio intervallo di solubilità del magnesio nella fase α dell'alluminio (figura 15). Questo fatto consentirebbe, al pari delle leghe della serie 2xxx, l'esecuzione del trattamento di bonifica per leghe con tenori di magnesio inferiori al limite di solubilità: in realtà però non si ottengono miglioramenti significativi.

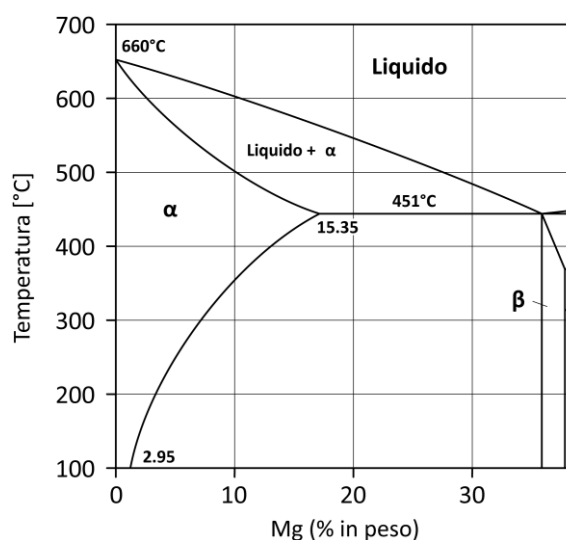


Figura 15: Il diagramma di stato Al-Mg (porzione di interesse per le leghe della serie 6xxx).

Nella pratica, pertanto, le leghe alluminio-magnesio da trattamento termico contengono sempre anche silicio: tale elemento garantisce infatti la formazione dell'intermetallico Mg_2Si , caratterizzato da un forte effetto di indurimento.

Dall'osservazione del diagramma di stato Al- Mg_2Si (vedi figura 16) si nota come la forma della curva limite di solubilità renda adatte tali leghe al trattamento termico di bonifica. Il trattamento di tempra seguito da quello di invecchiamento artificiale permette, infatti, la precipitazione di particelle finemente disperse del composto intermetallico Mg_2Si . La massima solubilità di Mg_2Si nella soluzione solida α è dell'1.8% a 595°C.

Il diagramma di stato Al- Mg_2Si è da ritenersi valido solo quando il Mg ed il Si siano presenti in quantità stechiometriche corrispondenti al composto Mg_2Si . La presenza di Mg in eccesso dà infatti luogo alla riduzione del limite di solubilità di Mg_2Si in α : tale effetto è chiaramente mostrato dalle linee contrassegnate con le lettere a, b e c che mostrano il limite di solubilità all'aumentare dell'eccesso di magnesio (c: 0.2% Mg; b: 0.6% Mg; a: 1% Mg). A causa di ciò si cerca di limitare il più possibile l'eccesso di magnesio, in modo da massimizzare la quantità di Mg_2Si solubilizzabile con il trattamento termico di tempra, da cui dipendono direttamente le caratteristiche meccaniche; un eccesso di silicio non causa, invece, questo tipo di problema.

Per tutti questi motivi le leghe 6xxx utilizzate industrialmente hanno tenori di magnesio oscillanti tra lo 0.5% e l'1.2% e di silicio tra lo 0.4% e lo 0.9%.

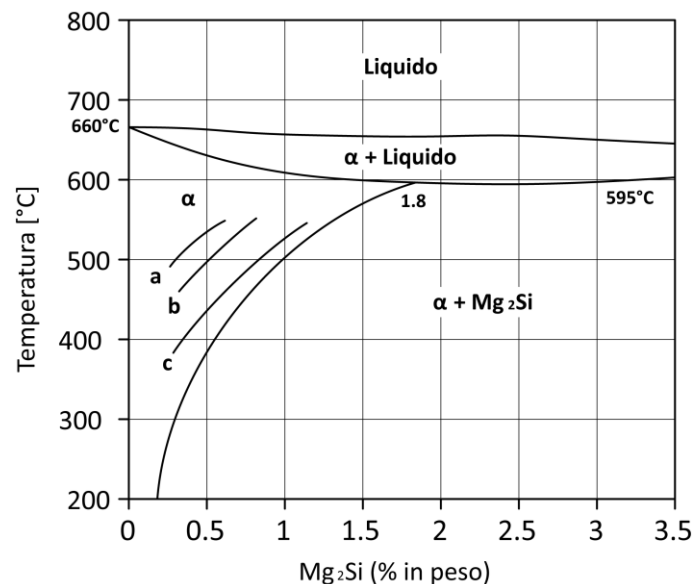


Figura 16: Diagramma di stato Al-Mg₂Si (porzione di interesse per le leghe 6xxx).

La microstruttura tipica di una lega alluminio-magnesio-silicio è mostrata in figura 17.

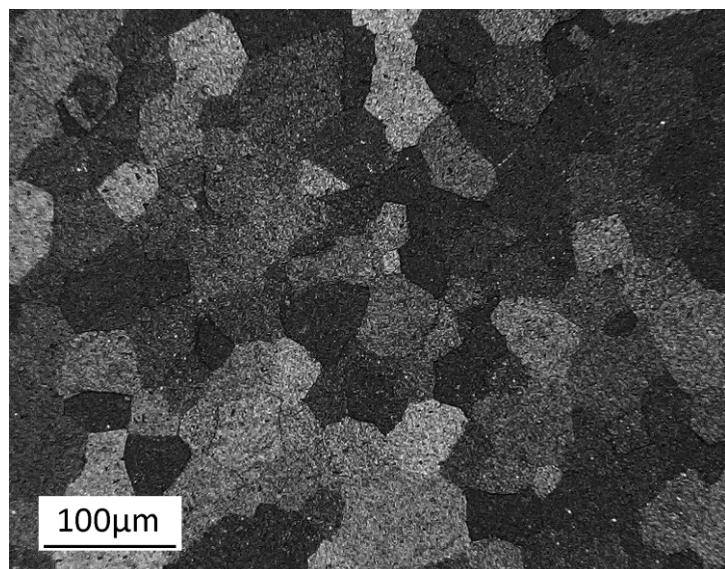


Figura 17: Microstruttura di lega d'alluminio 6060 (fonte: Andrea Casaroli - Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

Le proprietà delle leghe della serie 6xxx sono:

- **elevata formabilità a caldo**, al punto tale da essere considerate come le migliori leghe da estrusione;
- **buona deformabilità a freddo** allo stato ricotto e T4 (tempra di soluzione + invecchiamento naturale fino a condizioni di stabilità microstrutturale);
- **buona resistenza alla corrosione**;
- **buona saldabilità**;
- **ottima resistenza meccanica**, dipendente dalle quantità degli elementi di lega (dopo solubilizzazione e invecchiamento artificiale - T6):
 - carico unitario di rottura (**R**): **250 ÷ 350 MPa**;
 - carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **200 ÷ 250 MPa**;
 - durezza: **80 ÷ 100 HB**;
 - modulo elastico (**E**): **70.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A%**): **10% ÷ 15%**.

I principali settori di applicazione delle leghe della serie 6xxx sono:

- edilizia (componenti strutturali);
- industria automobilistica;
- industria navale;
- industria meccanica.

Leghe serie 7xxx (Alluminio-Zinco-Magnesio, Alluminio-Zinco-Rame)

Nelle leghe della serie 7xxx il principale elemento di lega è lo zinco, il cui tenore è compreso fra il 4% e il 9%, abbinato al magnesio e al rame. Dall'osservazione del diagramma di stato Al-Zn si nota come la forma della curva limite di solubilità renda adatte tali leghe al trattamento termico di bonifica (figura 18).

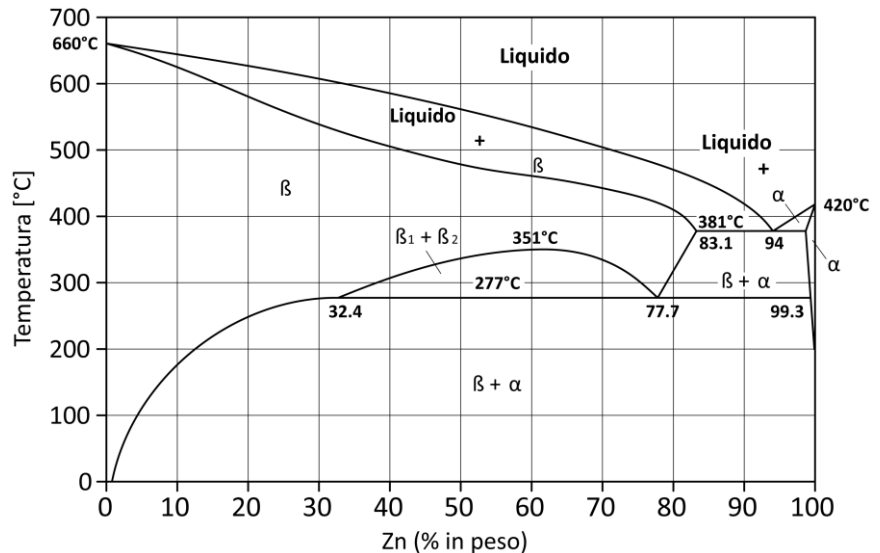


Figura 18: Diagramma di stato Al-Zn.

Il trattamento di tempra seguito da quello di invecchiamento artificiale permette, infatti, la precipitazione di particelle finemente disperse della soluzione solida α nella soluzione β dell'alluminio. La massima solubilità di Zn nella soluzione solida β è dell'83% a 380°C. Allo zinco viene sempre abbinata la presenza del magnesio e del rame, aggiunti sia singolarmente che in modo combinato; l'aggiunta del solo zinco consentirebbe di ottenere solamente leghe con scarsa resistenza a caldo, scarsa resistenza a corrosione e la tendenza a fessurarsi in modo spontaneo.

Fra le leghe della serie 7xxx, quelle maggiormente utilizzate sono:

- le leghe Al-Zn-Mg che presentano facilità di sovra saturazione del composto intermetallico $MgZn_2$ e non necessitano di invecchiamento artificiale. La formazione dei precipitati indurenti avviene per invecchiamento naturale;
- le leghe Al-Zn-Mg-Cu che presentano elevate caratteristiche di resistenza meccanica, tenacità a frattura e resistenza a fatica; tali proprietà, unitamente alla loro bassa densità, ne fanno uno dei materiali più utilizzati nel settore aeronautico. Queste leghe sono note commercialmente con il nome di ERGAL (vedi figura 19).

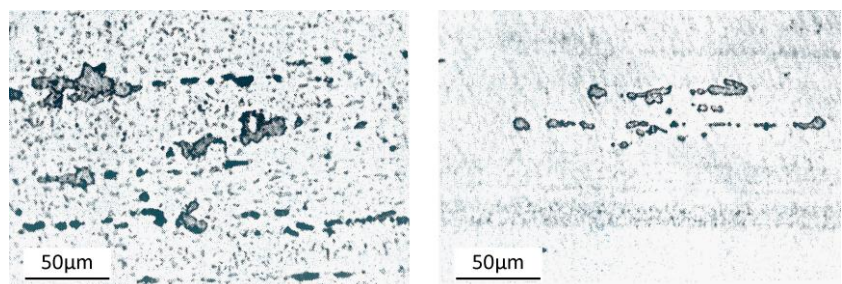


Figura 19: Micrografie della lega d'alluminio 7075, laminata a caldo: le particelle scure sono intermetallici Al-Cu-Mg e Al-Fe-Mg. A sinistra la lega è allo stato ricotto mentre a destra è allo stato bonificato (tratta da D. Veschi, L'alluminio e le leghe leggere).

Le leghe della serie 7xxx, unitamente a quelle della serie 2xxx, presentano le più elevate caratteristiche meccaniche fra tutte le leghe d'alluminio, del tutto confrontabili a quelle di un buon acciaio da costruzione per uso generale (vedi figura 20). Tali caratteristiche sono ulteriormente migliorabili tramite processi di deformazione plastica a freddo, eseguiti tra la tempra di soluzione e l'invecchiamento (artificiale o naturale che sia).

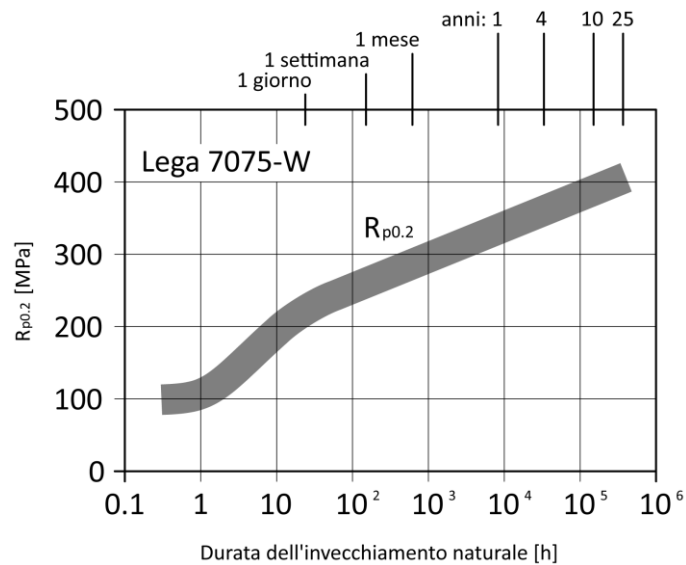


Figura 20: Andamento del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare ($R_{p0.2}$) in funzione del tempo di invecchiamento naturale per una lega 7075. Le leghe della serie 7xxx possono essere sottoposte sia ad invecchiamento naturale che ad invecchiamento artificiale.

Le proprietà delle leghe della serie 7xxx sono:

- **scarsa deformabilità a freddo;**
- **resistenza alla corrosione e saldabilità dipendenti dalla presenza di rame.** Queste proprietà diminuiscono sensibilmente all'aumentare del contenuto di rame e le ragioni sono le stesse già presentate per le leghe della serie 2xxx;
- **ottima resistenza meccanica** (dopo solubilizzazione e invecchiamento artificiale - T6):
 - carico unitario di rottura (**R**): **450 ÷ 570 MPa**;
 - carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**$R_{p0.2}$**): **400 ÷ 500 MPa**;
 - durezza: **120 ÷ 150 HB**;
 - modulo elastico (**E**): **70.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A**): **5% ÷ 10%**.

I principali settori di applicazione delle leghe 7xxx sono:

- industria aeronautica;
- industria aerospaziale;
- industria bellica;
- industria meccanica.

LEGHE DA DEFORMAZIONE PLASTICA (DA INCRUDIMENTO)

Le leghe dell'alluminio da deformazione plastica da incrudimento appartengono alle serie seguenti:

- **serie 1xxx** (alluminio industrialmente puro);
- **serie 3xxx** (alluminio - manganese);
- **serie 4xxx** (alluminio - silicio);
- **serie 5xxx** (alluminio - magnesio);
- **serie 8xxx** (solo alcune, come ad esempio le leghe alluminio-ferro e le leghe alluminio-nichel).

Sono utilizzate per la produzione di laminati e trafilati; la loro resistenza meccanica può essere incrementata unicamente attraverso processi di deformazione plastica a freddo (incrudimento).

L'unico trattamento termico applicabile a questa categoria di leghe è la ricottura, che ha il solo scopo di attenuare, o eliminare, gli effetti della deformazione plastica imposta al materiale.

A seconda della temperatura a cui viene eseguita, la ricottura può consentire o il solo riassetamento cristallino ($200^{\circ}\text{C} \div 250^{\circ}\text{C}$) o la ricristallizzazione, parziale o completa, dello stato di incrudimento iniziale ($350^{\circ}\text{C} \div 400^{\circ}\text{C}$). Il raffreddamento deve essere lento e può essere eseguito in aria ferma o in forno.

I semilavorati allo stato ricotto presenteranno scarsa resistenza meccanica ma elevata deformabilità a freddo; al contrario quelli incruditi che avranno, invece, elevata resistenza meccanica ma minore deformabilità a freddo. I codici utilizzati per la designazione degli stati metallurgici di impiego delle leghe da incrudimento sono:

- **F** grezzo di fabbricazione; non sono garantiti valori minimi di resistenza meccanica;
- **O** completamente ricotto; permette di ottenere il valore di durezza minimo previsto per un determinato tipo di lega;
- **H** incrudito per deformazione dopo ricottura. Esistono le seguenti varianti:
 - **H1** solo incrudito. Non è previsto alcun ciclo termico supplementare;
 - **H2** incrudito e parzialmente ricotto al fine di raggiungere il livello desiderato di resistenza meccanica;
 - **H3** incrudito e stabilizzato. Il trattamento termico di stabilizzazione (anche detto ricottura di stabilizzazione) consiste nel riscaldamento ad una temperatura di circa 250°C per un certo tempo e al successivo raffreddamento in aria; esso consente di limitare il fenomeno della dilatazione permanente. La dilatazione permanente consiste nel mancato recupero, al termine del raffreddamento, di una parte della dilatazione che il metallo ha subito durante il riscaldamento (circa 0.3%);
 - **H4** incrudito e verniciato/laccato (con conseguente ricottura parziale dovuta al ciclo termico del rivestimento).

Nella designazione è previsto anche l'utilizzo:

- di una seconda cifra, compresa fra 1 e 9, che indica il grado di incrudimento, il quale aumenta al crescere del valore della cifra stessa;
- di una terza cifra, necessaria per specificare eventuali varianti rispetto agli stati definiti in precedenza.

Leghe serie 1xxx (Alluminio industrialmente puro - almeno 99%)

Le leghe della serie 1xxx presentano:

- **buona conducibilità elettrica e termica**, pari a circa i 2/3 di quella del rame puro elettrolitico;
- **elevato grado di deformabilità a freddo**;
- **buona resistenza alla corrosione** in ambienti attorno alla neutralità (pH da 4 a 8). La resistenza alla corrosione in ambienti acidi o basici è invece scarsa, come è tipico per tutte le leghe dell'alluminio);
- **buona saldabilità**;
- **elevata riflettanza**;
- **limitata resistenza meccanica** (allo stato ricotto):
 - carico unitario di rottura (**R**): **$60 \div 100 \text{ MPa}$** ;
 - carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **$30 \div 50 \text{ MPa}$** ;
 - durezza: **$15 \div 25 \text{ HB}$** ;
 - modulo elastico (**E**): **70.000 MPa** ;

- allungamento percentuale a rottura (**A%**): **superiore al 40%**;
- **la resistenza meccanica può essere migliorata per incrudimento** tramite deformazione plastica a freddo.

La microstruttura tipica di un alluminio industrialmente puro è mostrata in figura 21 e in figura 22.

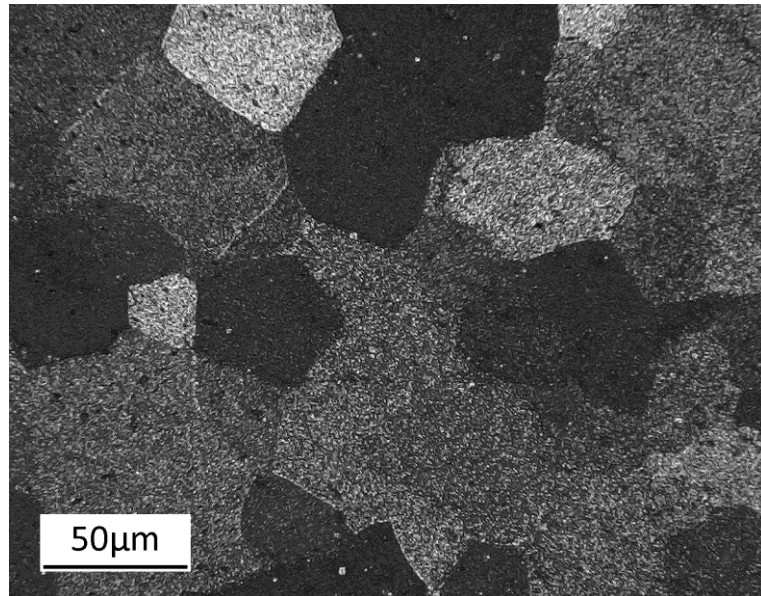


Figura 21: Microstruttura di una lega d'alluminio 1050 allo stato ricotto: 300°C - 1h (fonte: Andrea Casaroli - Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

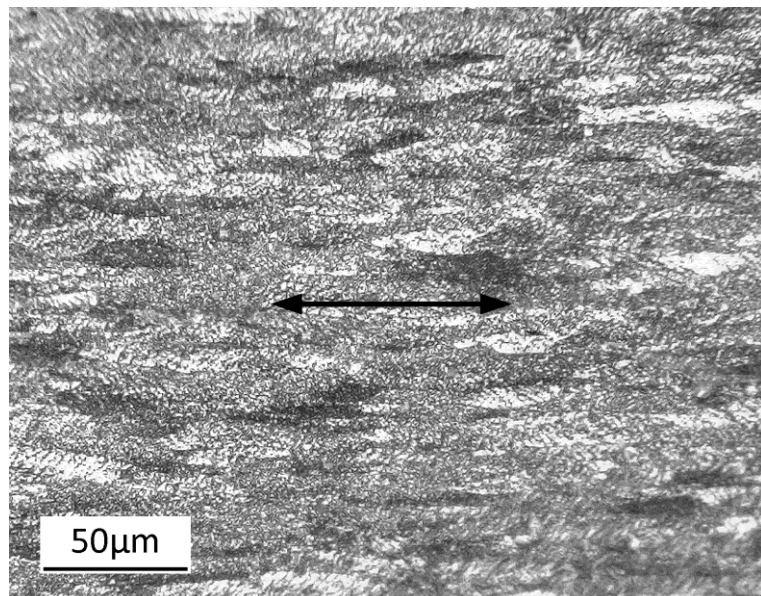


Figura 22: Microstruttura di lega d'alluminio 1050, incrudita a freddo. Si noti il forte grado di deformazione del grano cristallino lungo la direzione di laminazione, indicata dalla freccia (fonte: Andrea Casaroli - Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

Le principali applicazioni industriali comprendono:

- conduttori elettrici;
- fogli per la conservazione di alimenti (la cosiddetta “carta stagnola”);
- impianti chimici;
- corpi riflettenti;
- scambiatori di calore;
- conduttori e condensatori elettrici;
- applicazioni architettoniche e decorative.

Leghe serie 3xxx (Alluminio - Manganese)

Il principale elemento di lega è il manganese che viene aggiunto in modo da migliorare le proprietà meccaniche senza causare sensibile diminuzione della deformabilità. La quantità massima di manganese, contenuta nelle leghe commerciali, è dell'1.5% (vedi figura 23).

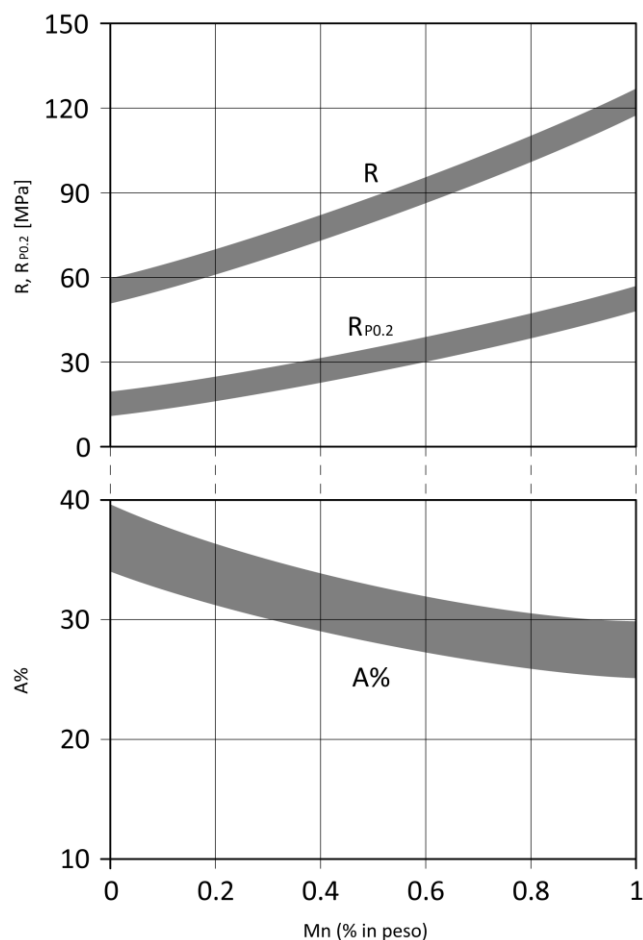


Figura 23: Effetto dell'aggiunta di manganese in soluzione solida con l'alluminio sul carico unitario di rottura (R), sul carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare ($R_{p0.2}$) e sull'allungamento percentuale a rottura (A%).

Le leghe della serie 3xxx presentano:

- **elevata deformabilità a freddo;**
- **buona resistenza alla corrosione**, comparabile a quella delle leghe della serie 1xxx;
- **buona saldabilità**, comparabile a quella delle leghe della serie 1xxx;
- **discrete proprietà meccaniche** (stato ricotto):
 - carico unitario di rottura (R): **90 ÷ 180 MPa**;
 - carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**$R_{p0.2}$**): **40 ÷ 80 MPa**;
 - durezza: **25 ÷ 45 HB**;
 - modulo elastico (E): **70.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (A%): **25% ÷ 30%**;
 - **la resistenza meccanica può essere migliorata per incrudimento** tramite deformazione plastica a freddo.

Le leghe della serie 3xxx sono preferibilmente utilizzate sotto forma di laminati e sono indicate sia per lavorazioni di imbutitura che per estrusione. Le principali applicazioni industriali comprendono:

- impianti chimici;
- edilizia (serramenti, pannelli, coperture);

- imballaggi (lattine, scatolame);
- scambiatori di calore.

Leghe serie 5xxx (Alluminio - Magnesio)

Il principale elemento di lega è il magnesio che conferisce doti particolari di resistenza alla corrosione, resistenza meccanica, resistenza a caldo (vedi figura 24).

Le leghe della serie 5xxx sono denominate commercialmente Peraluman.

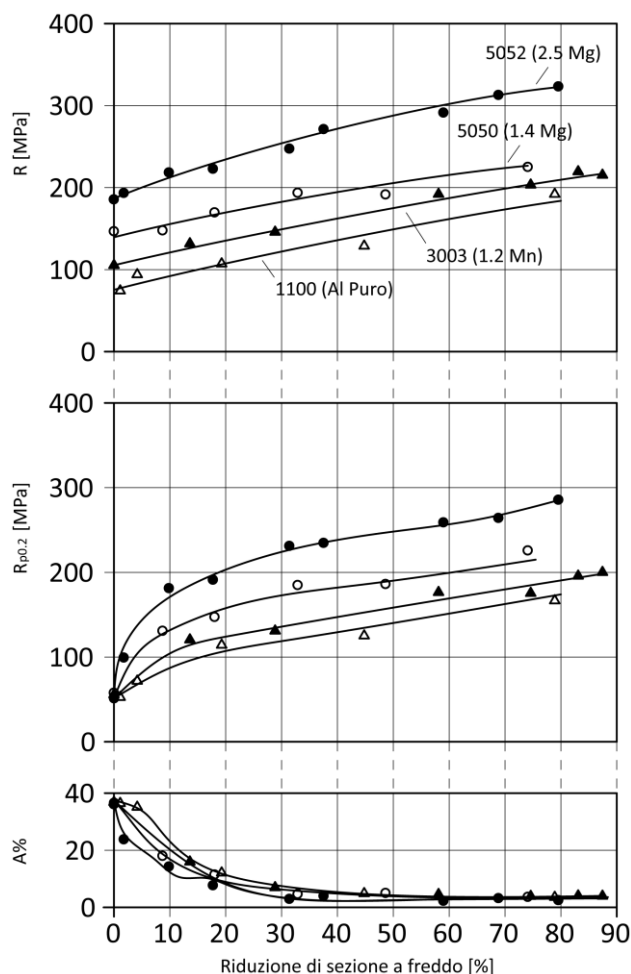


Figura 24: Effetto dell'aggiunta di magnesio e dell'incrudimento sul carico unitario di rottura (R), sul carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare ($R_{p0.2}$) e sull'allungamento percentuale a rottura ($A\%$) per leghe della serie 5xxx rispetto alle leghe 1100 e 3003.

Come già ricordato il magnesio forma composti intermetallici con l'alluminio (Al_3Mg_2 e Al_2Mg_3): nonostante ciò le leghe della serie 5xxx non vengono sottoposte a bonifica, perché il trattamento non porta ad un sensibile miglioramento delle proprietà meccaniche. Al crescere del contenuto di magnesio (la quantità massima, nelle leghe commerciali, è del 5%), aumentano le caratteristiche resistenziali, ma si riduce progressivamente la deformabilità a freddo e la duttilità. Per tale motivi i profilati estrusi in leghe della serie 5xxx hanno forme semplici.

Le leghe della serie 5xxx presentano:

- **buona deformabilità**, anche se inferiore a quella delle leghe delle serie 1xxx e 3xxx;
- **buona resistenza alla corrosione**, superiore in ambienti marini, anche a quella delle leghe della serie 1xxx;
- **buona saldabilità**, comparabile a quella delle leghe della serie 1xxx;

- **discreta resistenza meccanica**, crescente all'aumentare della percentuale di magnesio (stato ricotto):
 - carico unitario di rottura (**R**): **120 ÷ 280 MPa**;
 - carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **60 ÷ 130 MPa**;
 - durezza: **45 ÷ 75 HB**;
 - modulo elastico (**E**): **70.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A**): **10% ÷ 25%**;
 - **la resistenza meccanica può essere migliorata per incrudimento** tramite deformazione plastica a freddo.

Le principali applicazioni industriali comprendono:

- impianti chimici;
- edilizia;
- costruzioni navali;
- impianti per la produzione di alimenti;
- industria automobilistica e meccanica in genere.

LEGHE PER GETTI

Le **leghe di alluminio per getti** sono largamente utilizzate in fonderia per la realizzazione di getti colati:

- in sabbia;
- in conchiglia a gravità;
- in conchiglia sotto pressione (pressofusione).

Circa il 40% delle leghe d'alluminio impiegate in Italia viene utilizzato in fonderia per la produzione di getti. La scelta della tecnica di colata è essenzialmente legata a motivazioni di carattere economico:

- la formatura in sabbia viene preferita a quella in conchiglia nel caso in cui i componenti presentino elevata complessità geometrica e debbano essere prodotti in quantità limitata;
- la colata in conchiglia per gravità o sotto pressione viene invece adottata quando sia necessario garantire un'elevata produttività, indispensabile in produzioni di media e grande serie; tale tecnologia richiede però investimenti iniziali di elevata entità sia per l'acquisto degli stampi che dei macchinari per la colata.

La tecnica di colata condiziona notevolmente la struttura cristallina del getto e, quindi, le sue proprietà meccaniche. In linea di massima l'utilizzo di conchiglie metalliche, a più elevata conducibilità termica rispetto alle forme in sabbia, permette la creazione di strutture con microstruttura più fine e maggiore resistenza meccanica. La maggior velocità di raffreddamento delle conchiglie e l'elevata rigidità possono però causare l'insorgere di tensioni residue che, unitamente al problema della fragilità a caldo tipica dei getti d'alluminio, può provocare la cricatura del semilavorato.

Le proprietà delle leghe di alluminio, di maggior interesse nel caso si debbano realizzare getti, sono:

- la **tendenza della lega alla fragilità** a caldo; per fragilità a caldo si intende la formazione di cricche dovute alla presenza:
 - di un sottile strato di liquido eutettico che circonda i grani cristallini già solidificati;
 - di tensioni residue dovute alle differenti leggi di raffreddamento e, quindi, alle differenti dilatazioni termiche a cui sono sottoposte le varie zone del getto;
- la **colabilità**, ossia la capacità di un materiale allo stato liquido di riempire una forma riproducendone, con precisione, la geometria;
- la **fluidità**, cioè l'attitudine delle varie parti di un fluido a scorrere le une sulle altre;

- la **tendenza ad inglobare i gas**.

Le leghe che meglio rispondono a tali esigenze sono quelle che presentano un ristretto intervallo delle temperature di solidificazione ed una bassa temperatura di fusione, quali le composizioni eutettiche delle leghe Al-Si e Al-Si-Cu. L'aggiunta del silicio permette, infatti, di aumentare la colabilità e la fluidità, mentre la scelta della lega eutettica (o prossima all'eutettico) consente di limitare il contenuto di gas disciolti e di ridurre l'ampiezza dell'intervallo di solidificazione, da cui è dipendente la fragilità a caldo (vedi figura 25).

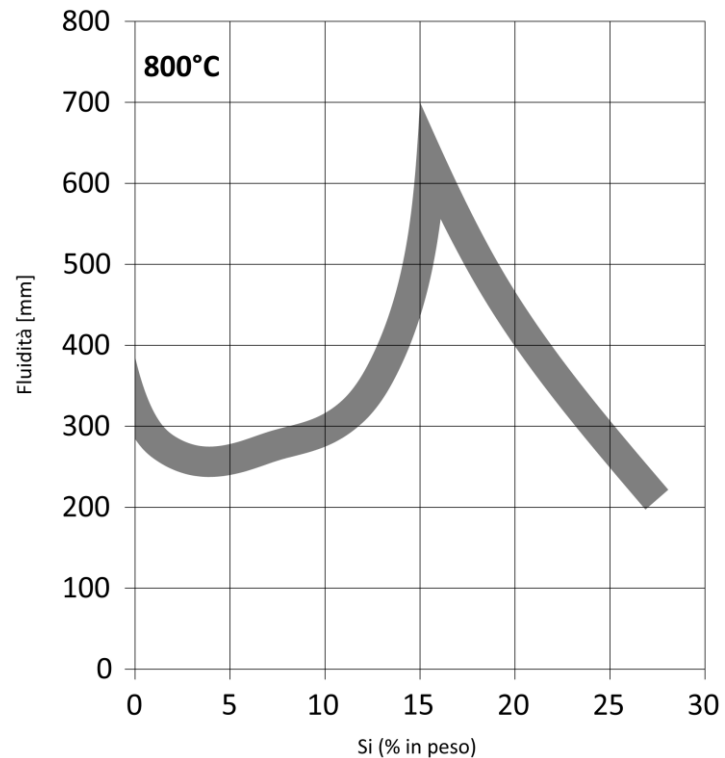


Figura 25: Effetto dell'aggiunta di silicio sulla fluidità delle leghe di alluminio. In fonderia il termine fluidità viene utilizzato per indicare la distanza che un metallo fuso percorre in un condotto a sezione sottile prima di solidificare.

A differenza delle leghe di alluminio da deformazione plastica, le leghe per getti non presentano un unico sistema di unificazione riconosciuto a livello mondiale.

Per quanto riguarda l'Unione Europea i sistemi di designazione attualmente utilizzati sono due:

- EN 1780-1
- EN 1780-2

La EN 1780-1 prevede l'utilizzo di un codice numerico preceduto da:

- EN: Européen Normalisation;
- A: Indica il metallo (Aluminum);
- B, C o M: indica la forma in cui viene fornito il prodotto: B per pani da rifusione, C per getti, M per leghe madri. La lega madre è una lega binaria utilizzata ogni volta che risulti necessario aggiungere un elemento di lega dall'elevato punto di fusione all'interno di un bagno liquido di alluminio. La lega madre contiene l'elemento desiderato nella massima percentuale possibile e permette di velocizzare la sua dissoluzione all'interno del bagno fuso.

Il codice numerico che identifica univocamente una lega per getti è composto da cinque cifre:

- la prima identifica la famiglia della lega in base all'elemento principale;

- la seconda cifra è sempre pari a 0 per l'alluminio non legato (1xxxx) mentre per le leghe d'alluminio serve per identificare il tipo la lega;
- la terza e la quarta cifra:
 - per l'alluminio non legato (1xxxx) indicano la percentuale minima di alluminio; il numero si riferisce alle cifre decimali, ad esempio 10850 indica alluminio puro al 99.85%;
 - per le leghe d'alluminio indicano un numero progressivo utile a definire in modo univoco la lega all'interno della famiglia a cui appartiene;
- la quinta cifra ha lo stesso significato per tutte le tipologie di alluminio (legato o non legato) ed è pari a 0 se l'alluminio viene usato per un impiego generale, mentre è diverso da zero per impieghi speciali.

Alcuni esempi sono:

- EN AB-10850 alluminio non legato per uso generale, puro al 99.85%, fornito sotto forma di pani
- EN AC-42100 lega AlSi7Mg0.3, fornita sotto forma di getti

In figura 26 è mostrata una semplificazione che permette di ricondurre immediatamente qualsiasi codice alla relativa famiglia d'appartenenza.

Macro-gruppi leghe	Principale elemento di lega	Gruppi di leghe	Principali elementi di lega	Esempi
1xxxx	-	10xxx	-	Alluminio puro con titolo minimo di Al pari al 99.50%
2xxxx	Rame	21xxx	Rame	AlCu4MgTi
4xxxx	Silicio	41xxx	Silicio - Magnesio	AlSi2MgTi
		42xxx		AlSi7Mg0.3
		43xxx		AlSi10Mg - AlSi9Mg
		44xxx	Silicio	AlSi9 - AlSi12
		45xxx	Silicio - Rame	AlSi5Cu3Mg - AlSi5Cu4
		46xxx		AlSi7Cu3Mg - AlSi11Cu2
		47xxx		AlSi12Cu1Fe
		48xxx		AlSi12CuNiMg
5xxxx	Magnesio	51xxx	Magnesio	AlMg3 - AlMg9
7xxxx	Zinco	71xxx	Zinco - Magnesio	AlZn5Mg

Figura 26: Leghe di alluminio per getti; suddivisione in famiglie secondo la normativa EN 1780-1.

La EN 1780-2 prevede invece l'utilizzo di simboli chimici, seguiti da cifre indicanti la purezza dell'alluminio o il tenore nominale dell'elemento di lega. I simboli chimici sono quelli comunemente riconosciuti a livello internazionale. Come per la EN 1780-1 anche la EN 1780-2 prevede l'aggiunta, in testa alla sigla, di:

- EN: Européen Normalisation;
- A: Indica il metallo (Aluminum);
- B, C o M: indica la forma in cui viene fornito il prodotto: B per pani da rifusione, C per getti, M per leghe madri.

Alcuni esempi sono:

- EN AB-AlSi12CuNiMg alluminio fornito sotto forma di pani da rifusione contenente Si (10.5% ÷ 13.5%), Cu (0.8% ÷ 1.5%), Mg (0.8% ÷ 1.5%), Ni (0.7% ÷ 1.3%)
- EN AC-AlZn5Mg alluminio fornito sotto forma di getti contenente Zn (4.5% ÷ 6.5%), Mg (0.4% ÷ 0.7%), Mg (0.8% ÷ 1.5%)

Sono le leghe di alluminio per getti più diffuse. Il contenuto di silicio è compreso fra il 5% ed il 13% e sono impiegate quando sia necessaria un'elevata colabilità, unitamente ad una discreta resistenza meccanica ed una buona resistenza alla corrosione.

In figura 27 è mostrato il diagramma di stato valido per le leghe Al-Si.

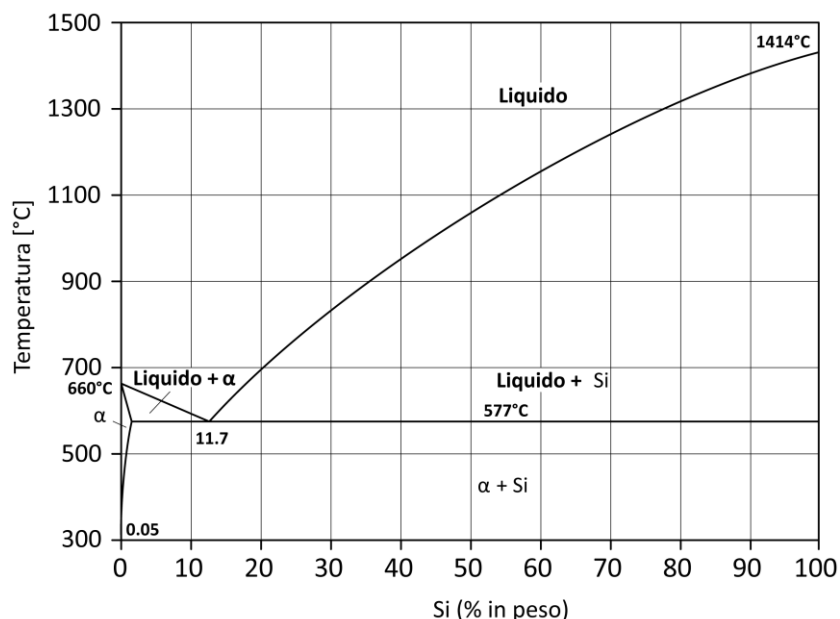


Figura 27: Diagramma di stato Al-Si.

Queste leghe da fonderia sono caratterizzate da **bassi valori di tenacità** e di deformabilità a freddo, dovuti ad una microstruttura costituita da cristalli dendritici di alluminio e strutture aciculari ricche di silicio.

La tenacità e la deformabilità possono essere migliorate in modo significativo mediante opportune **modifiche del bagno liquido di alluminio**: si tratta di aggiungere particolari elementi chimici, quali calcio, fosforo, bismuto, antimonio o titanio che, pur non entrando in lega, favoriscono la formazione di aggregati cristallini di silicio molto fini e di forma globulare (vedi figura 28).

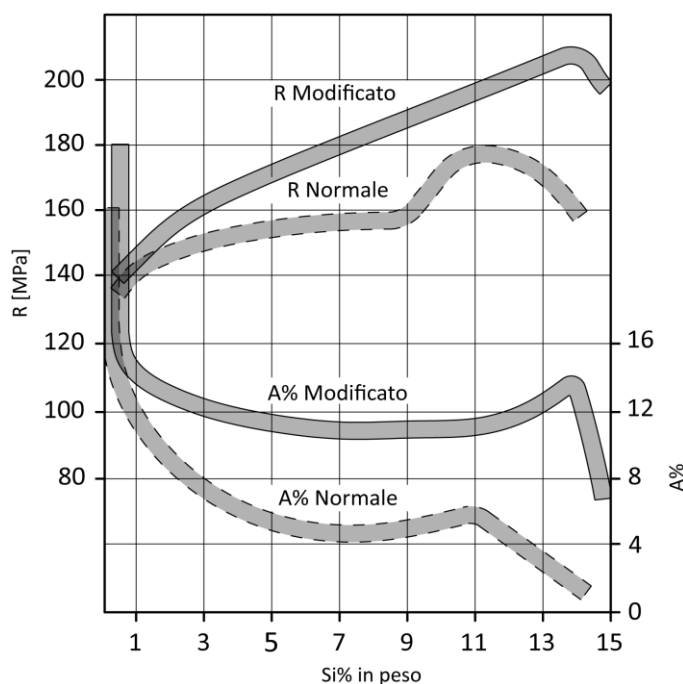


Figura 28: Carico unitario di rottura (R) e allungamento percentuale a rottura (A%) di leghe Al-Si per getti, con o senza modifica del bagno liquido.

In alternativa alla modifica del bagno metallico, è possibile affinare il grano cristallino imponendo elevate velocità di raffreddamento dei getti: in questo modo, però, non si ottiene alcun vantaggio relativamente alla forma aciculare

dei cristalli di silicio. Per quanto detto, è evidente come la modifica del bagno liquido risulti essenziale per i getti formati in sabbia, mentre sia consigliabile per getti colati in conchiglia solo in presenza di elevati spessori di parete (vedi figure 29, 30 e 31).

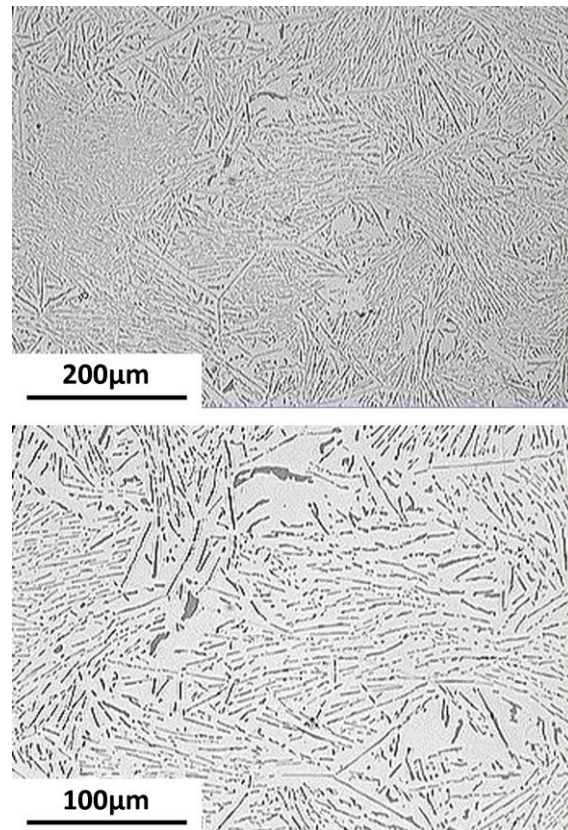


Figura 29: Microstruttura di lega d'alluminio per getti EN AC-ALSi13 colata in sabbia senza trattamento di modifica. Sono ben evidenti le strutture aciculari ricche di silicio. (fonte: pwatlas.mt.umist.ac.uk, visitato nel febbraio 2013).

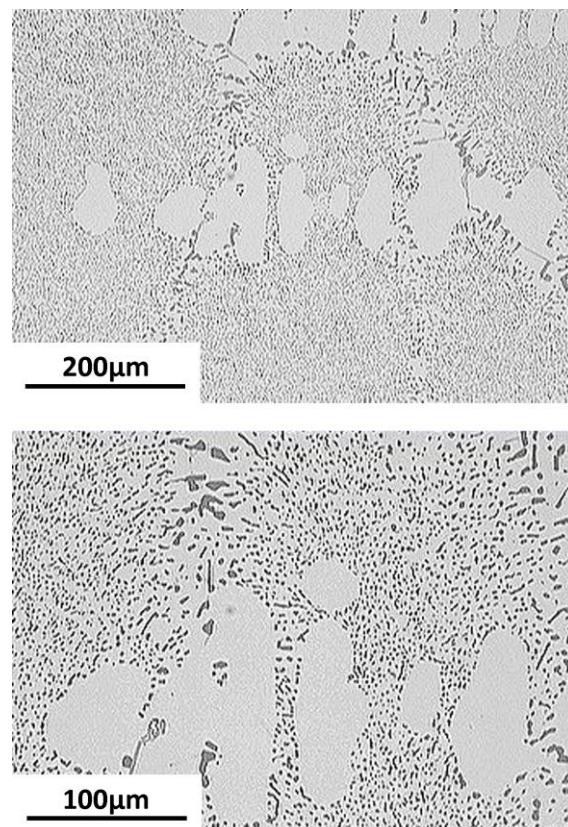


Figura 30: Microstruttura di lega d'alluminio per getti EN AC-ALSi13 colata in sabbia con trattamento di modifica. È ben evidente la formazione di strutture fini e di forma globulare al posto delle strutture aciculari. (fonte: pwatlas.mt.umist.ac.uk, visitato nel febbraio 2013).

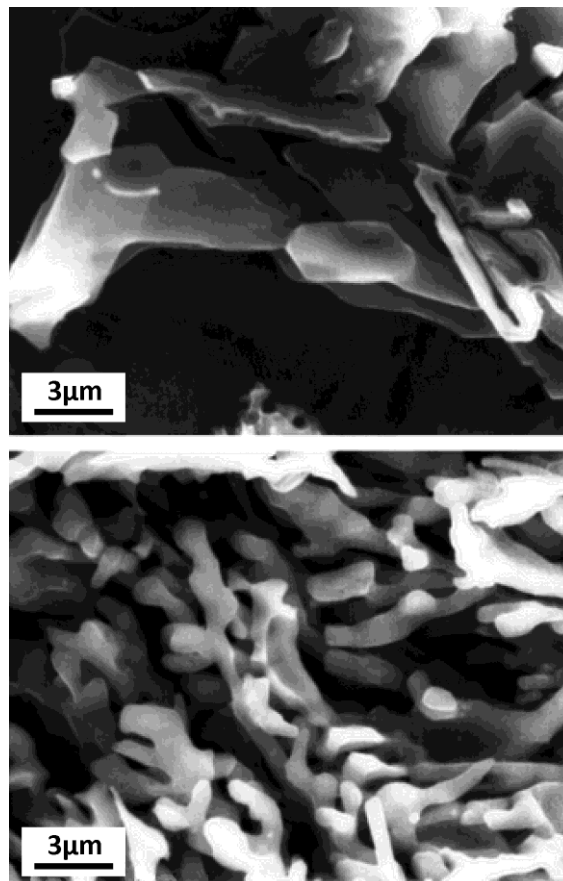


Figura 31: Superficie di frattura, osservata al microscopio elettronico a scansione, di una lega d'alluminio per getti EN AC-ALSi13 colata in sabbia, con o senza trattamento di modifica. È ben evidente la formazione di strutture fini e di forma globulare al posto delle strutture aciculari. (fonte: ASM Handbook Committee, Metals Handbook - Vol. 9, ASM International 2001).

Le leghe alluminio-silicio non subiscono alcun effetto se trattate termicamente; esse presentano, allo stato grezzo di solidificazione, le seguenti proprietà meccaniche:

- carico unitario di rottura (**R**): **150 ÷ 190 MPa**;
- carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **100 ÷ 160 MPa**;
- durezza: **50 ÷ 90 HB**;
- modulo elastico (**E**): **70.000 MPa**;
- allungamento percentuale a rottura (**A**): **0.5% ÷ 3%**.

Leghe Alluminio - Rame - Silicio

Leghe Alluminio - Rame - Silicio

Questa classe di leghe prevede in lega oltre al silicio (5% ÷ 13%) anche il rame (2% ÷ 5%) allo scopo di aumentare la resistenza meccanica tramite il trattamento termico di bonifica delle leghe leggere. Spesso questo tipo di leghe prevede la presenza di Mg (1.5% massimo) utile per aumentare la velocità di invecchiamento, che in assenza di magnesio, risulta troppo lenta ed antieconomica. Le leghe con tenori di silicio più elevati presentano elevata resistenza all'usura: ciò le rende particolarmente adatte per la produzione di blocchi motore e pistoni.

Le proprietà meccaniche delle leghe Al-Cu-Si sono:

- carico unitario di rottura (**R**): **200 ÷ 300 MPa**;
- carico unitario di scostamento dalla proporzionalità lineare (**R_{p0.2}**): **100 ÷ 200 MPa**;
- durezza: **80 ÷ 120 HB**;

- modulo elastico (E): **70.000 MPa**;
- allungamento percentuale a rottura (A%): **0.5% ÷ 3%**.

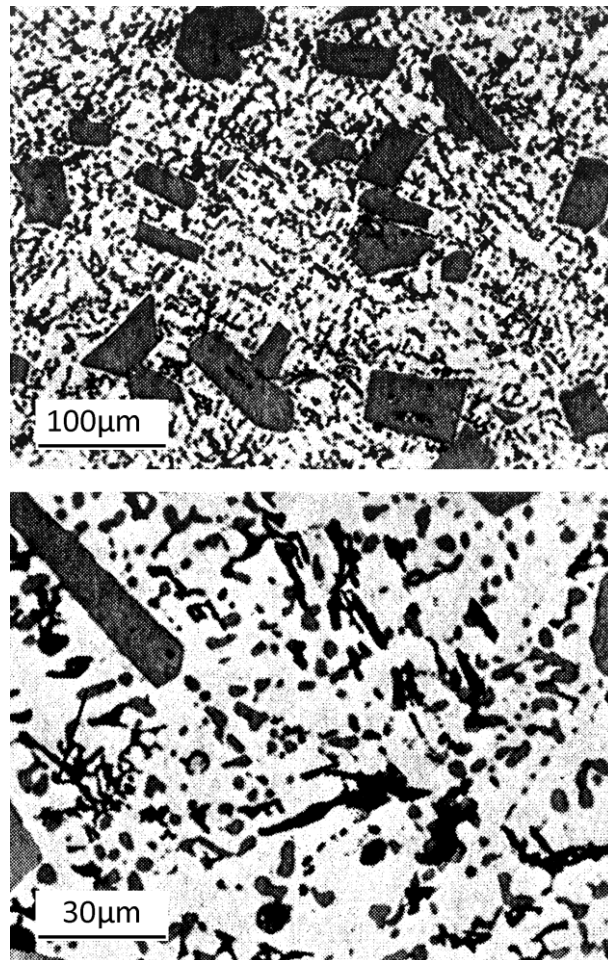


Figura 32: Microstruttura di lega d'alluminio per getti EN AC- AlSi21CuNiCo (getto grezzo pressofuso) sono evidenti grossi cristalli di silicio (colore grigio) e composti a base di rame di dimensione minore (colore nero). (tratta da D. Veschi, *L'alluminio e le leghe leggere*).

Le principali applicazioni industriali delle leghe per getti (sia Al-Si che Al-Cu-Si) riguardano:

- industria automobilistica e dei motoveicoli;
- industria meccanica in genere;
- casalinghi.

BIBLIOGRAFIA

- ASM Handbook Committee, *Metals Handbook* - Vol. 2, ASM International 2001.
- ASM Handbook Committee, *Metals Handbook* - Vol. 9, ASM International 2001.
- M. Conserva, F. Bonollo, G. Donzelli, *Alluminio - manuale degli impieghi*, Edimet 2004.
- D. Veschi, *L'Alluminio e le leghe leggere*, HOEPLI 1989.
- E. Gianotti, *Alluminio e sue leghe: Classificazioni e trattamenti termici*, Trattamenti termici Ferioli e Gianotti, s.d.
- M. Di Sabatino, *Studio sulla fluidità delle leghe di alluminio*, La Metallurgia Italiana, Marzo 2008.

Questa pubblicazione è proprietà letteraria riservata di Marco V. Boniardi e Andrea Casaroli; essa è protetta dal diritto d'autore, ai sensi della legge 22 aprile 1941 n. 633 e successive modificazioni, e dal Titolo IX del Libro Quinto del Codice civile italiano.

I diritti di traduzione, di riproduzione, di memorizzazione elettronica e di adattamento totale e parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i Paesi.



L'alluminio e le sue leghe

Marco V. Boniardi

Andrea Casaroli

Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano
via La Masa, 1 20156 Milano