



**Serie 1000:** (Alluminio industrialmente puro - almeno 99%); le leghe di questa serie sono caratterizzate da eccellente resistenza alla corrosione, conducibilità termica ed elettrica elevate, buona lavorabilità, caratteristiche meccaniche piuttosto basse. Le caratteristiche meccaniche possono essere aumentate, entro certi limiti, mediante incrudimento.

Le principali applicazioni comprendono impianti chimici, corpi riflettenti, scambiatori di calore, conduttori e condensatori elettrici, applicazioni architettoniche e decorative, nell'imballaggio di lusso (cosmetici e profumi).

Il metallo **1050**, avente titolo superiore a 99,50% è quello più usato. Rappresenta un buon compromesso tra i valori di resistenza meccanica, l'idoneità alla deformazione plastica e la proprietà dell'aspetto. I campi dell'applicazione sono molteplici: imballaggio, edilizia, caldaie, lattoneria, alette e tubi per scambiatori di calore, conduttori elettrici, etc.

L'alluminio **1200**, con titolo tra 99 e 99,5%, sostituisce il 1050° allorchè la plasticità è sufficiente a soddisfare l'impiego voluto (imballaggio, dischi per usi casalinghi e culinari, etc.).

## Leghe Alluminio-Rame (Classe 2xxx)

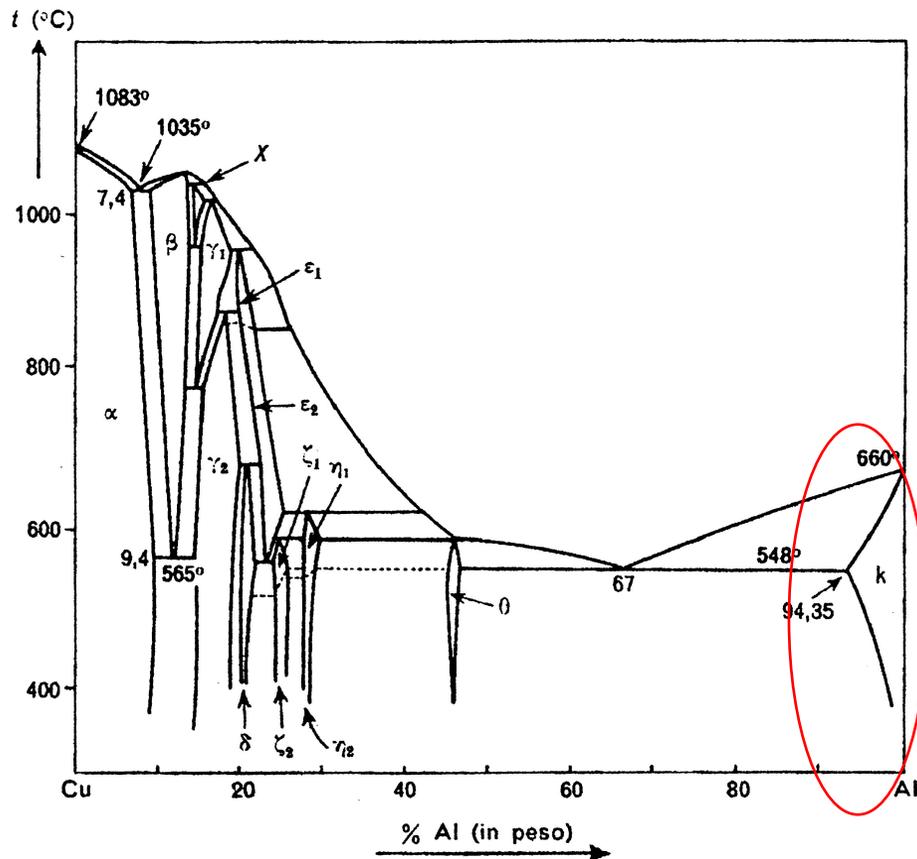


Diagramma di stato Al-Cu.

La presenza del rame aumenta il peso specifico della lega, riduce il coefficiente di dilatazione lineare, riduce la conducibilità sia termica che elettrica, peggiora la resistenza alla corrosione (rispetto all' Al puro) **ma aumenta la resistenza a trazione fino a 500 MPa.**

La solubilità del rame nell' alluminio è pari al 5.65% a 574 C e decresce poi al 0,45% a circa 300 C, **perciò le leghe contenenti dal 2,5 al 5% di rame sono passibili di trattamento termico di solubilizzazione e di invecchiamento.** La solubilizzazione è eseguita riscaldando la lega nel campo di esistenza della fase  $\alpha$  e poi raffreddandola rapidamente. Il successivo invecchiamento, naturale o artificiale, fa precipitare fasi "submicroscopiche" coerenti e semicoerenti con la matrice, accrescendo così le proprietà meccaniche della lega stessa. Queste leghe non sono composte da solo Al e Cu **ma hanno anche aggiunte di Mg e Mn.** Sono leghe in cui si sfrutta sia la soluzione solida sia la precipitazione. **L'indurimento si ha non solo per la precipitazione di  $\text{CuAl}_2$  ma anche  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ .**

Queste leghe sono facilmente lavorabili alle macchine utensili perché danno a differenza dell' Al puro un truciolo ben tagliato.

Per esempio la lega **2017** chiamata DURALLUMINIUM di composizione:

4% Cu - 0,5% Mg - 0,6% Mn

possiede dopo solubilizzazione un carico unitario di rottura di 178 MPa ed un allungamento percentuale del 22%. Per invecchiamento naturale la resistenza cresce rapidamente nelle prime ore e dopo 4 - 5 giorni si stabilizza su valori di **425 MPa** mentre l'allungamento rimane invariato. **Si ottiene quindi un materiale resistente e tenace come un acciaio strutturale avente un peso di circa un 1/3.**

## La lega **2219**

5,8/6,8% Cu - 0,2 Mn - 0,02 Mg - 0,1 Zn - 0,1 Ti

ha buone caratteristiche sia ad alte che a basse temperature, viene infatti usata per i serbatoi dei combustibili per razzi. La presenza di elementi quali Mg e soprattutto Ge stimolano la nucleazione dei precipitati e permettono di raggiungere  $\sigma$  di circa 500 MPa ed un  $\epsilon$  del 12%

Le leghe 2XXX contenenti Cu vennero utilizzate per la prima volta nella costruzione degli zeppelin e poi degli aerei da caccia tedeschi.

Queste leghe **sono facilmente colabili** (il Cu conferisce buona colabilità), generalmente lo si fa in conchiglia per avere raffreddamenti rapidi. Non si può eccedere troppo con il Cu (non oltre l' 8%) perché la lega si fragilisce.

Si utilizzano per getti sottili e di forma complessa (carter, ruote, pistoni)

Per teste di cilindri e pistoni forgiati si usa normalmente la lega

Al-Cu-Ni-Mg (4 - 2 - 0.5)

La lega **2618 (RR58)** veniva utilizzata nella costruzione del **Concorde**, la sua composizione e':

**Cu**=1,9/2,7%. **Si**=0,1/0,25 **Fe**=0,1/1,3 **Mg**=1,3/1,8% - **Zn**=0.1% **Ti**=0,1% **Ni**=0,9/1,2%

resiste per 50.000 ore a 120 C ad uno stress di 500 MPa. L'introduzione recente del silicio ne ha migliorato le caratteristiche consentendone l'uso a 150-200 C.

Leghe Al-Cu-Mg "piu' semplici" vengono utilizzate per carrozzerie nell'industria automobilistica.

La lega più usata di questo gruppo è sicuramente la **2024** generalmente trattata in condizioni T3. A questa lega, sono poi state apportate leggere modifiche e si sono ottenute leghe altrettanto usate di seguito elencate:

2124 T8: ha migliore resistenza meccanica, è stata usata nello Shuttle e nel Boeing 747

2224-2324 T3: hanno migliore tenacità, sono state usate nei Boeing 757 e 767

Altre leghe appartenenti a questo gruppo molto importanti ed utilizzate sono:

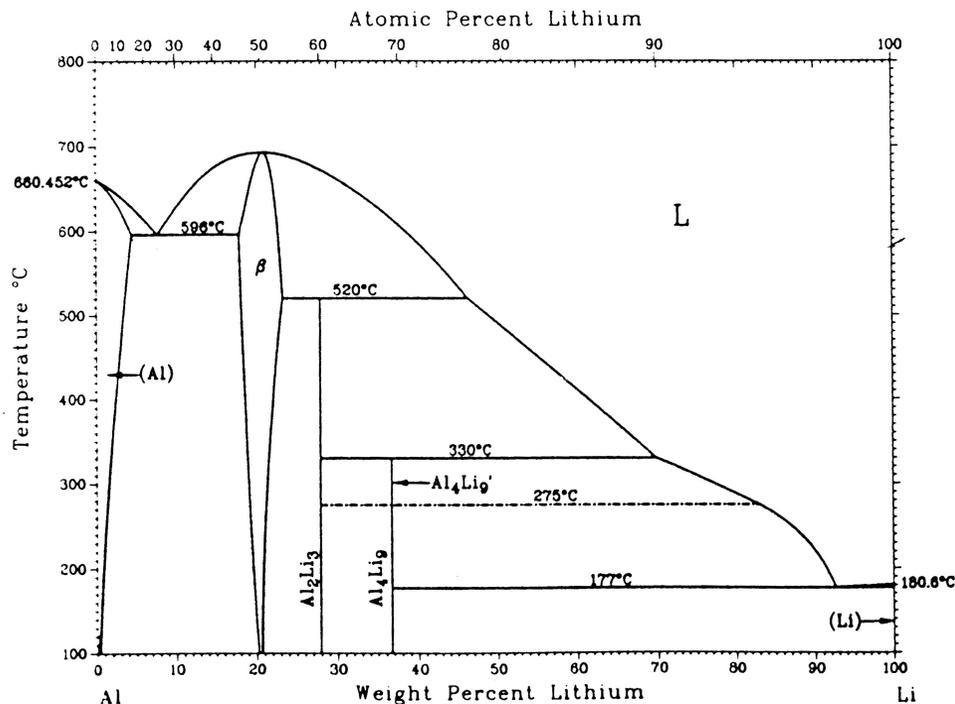
X2095: la X significa che è ancora in fase sperimentale, ma già molto importante per applicazioni criogeniche; leggera presenza di magnesio ed argento

2219 T8: il magnesio è presente in piccola parte, usato per applicazioni criogeniche

Alcune leghe Al-Cu vengono chiamate **Alclad** e sono leghe di Al ad alta resistenza, **ricoperte da uno strato di Al puro** che essendo anodico rispetto la lega ne aumenta la resistenza a corrosione. (Alclad 2024 e' stata la prima ad essere usata sul DC3

## Leghe Al-Cu-Li

Al-Li



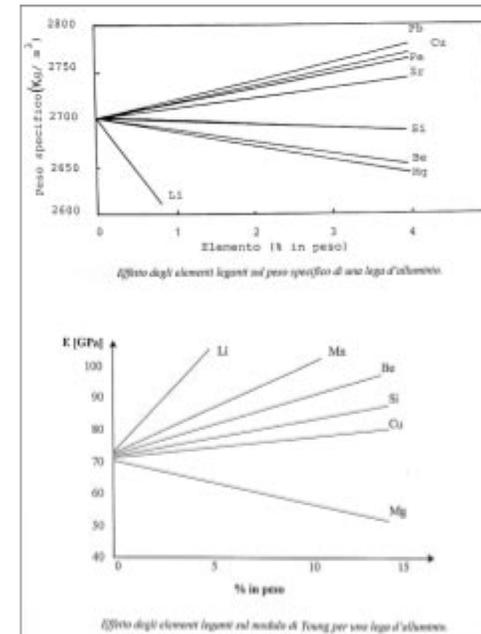
L'aggiunta di Litio alle leghe Al-Cu e' stata studiata soprattutto per ridurre il peso dei veicoli e delle strutture aerospaziali ( $r_{\text{lito}} = 0.53 \text{ g/cm}^3$ ).

**L'aggiunta dell' 1% di Li riduce del 3% la densita' della lega ed aumenta il limite elastico del 6%.**

Il limite di solubilita' del Li nell'alluminio e' del 4.2% ma normalmente si usano tenori tra 1 - 3 %.

Le leghe Al-Li rispetto le 2xxx e 7xxx sono:

- piu' leggere
- piu' rigide (7 - 12% in piu')
- hanno un limite di fatica piu' alto
- migliore resistenza al creep
- hanno tenacita' inferiore
- subiscono stress corrosion cracking
- costano 3 - 5 volte di piu'



L'esplorazione delle leghe innovative e non convenzionali in applicazioni aerospaziali ha avuto inizio nei primi '60 con alcune leghe come il 2020 sviluppato per ridurre il peso delle strutture metalliche mediante l'utilizzo di elementi leganti a densità bassa come il **litio**. Una seconda generazione di leghe di alluminio-litio (Al-Li) (p. es. 2195 o 8090) ha permesso alla fine degli anni 70 di soddisfare i requisiti operativi di alcune strutture avanzate come il **serbatoio esterno dello Space Shuttle** o la struttura dell'**EH101**. **Nonostante l'aumento di resistenza (fino al 15%), bassa densità (- 10%) e ottima saldabilità, l'uso di queste leghe su applicazioni commerciali è stato molto limitato a causa di alcuni problemi significativi:**

- Insufficient thermal stability
- High anisotropy
- Unusual crack path
- Accelerated crack growth in NaCl at low frequency
- Drop of fracture toughness
- High cost



**NESSUNA APPLICAZIONE  
COMMERCIALE SIGNIFICATIVA**

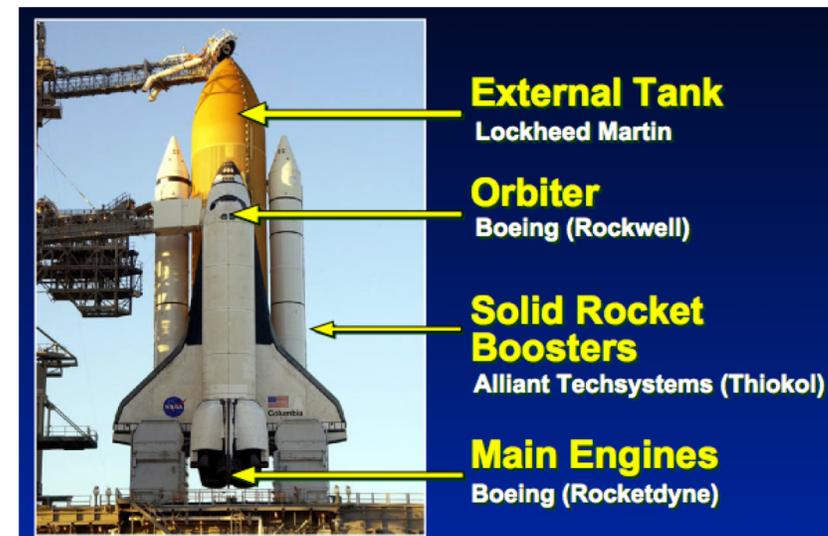
## Leghe Alluminio-Cu-Li

La fase che precipita (invecchiamento) e'  $Al_3Li$  ( $\delta'$ ), i parametri reticolari del precipitato sono molto simili a quelli della matrice (0,12%), **quindi ottima coerenza**. Il precipitato rimane coerente anche per lunghi riscaldamenti a 190 C

Altri precipitati possono essere:

$Al_2CuLi$  -  $Al_2LiMg$  -  $Al_2CuMg$  -  $Al_6CuLi_3$

Le leghe Al-Li devono fronteggiare la concorrenza dei compositi, che offrono spesso caratteristiche confrontabili, oppure sono in certi casi molto superiori per quanto riguarda la loro resistenza e rigidità a temperature superiori a 100°C. Sono però in generale ancora più costosi e soprattutto, richiedono processi specializzati per la loro produzione e messa in opera, mentre le leghe Al-Li si avvalgono delle stesse tecnologie in uso per le leghe di Al delle serie 2xxx e 7xxx.



La lega 2195 nel 1994 e' stata selezionata per il serbatoio dello Shuttle con risparmio di 3175 Kg

Cu 3.70 - 4.30 % Li 0.80 - 1.20 % Mg 0.25 - 0.80 % Ag 0.25 - 0.60%

# The 3rd generation

L'interesse per le leghe Al-Li è cresciuto nuovamente in questi ultimi anni con lo sviluppo di nuove leghe (2098, 2099, 2196, 2198, 2199) che offrono una notevole resistenza e densità più bassa rispetto alle leghe 2000 e 7000 correntemente utilizzate

Physical Properties	Metric
Density	2.78 g/cc

Component Elements Properties	Metric
Aluminum, Al	92.5 - 94.4 %
Chromium, Cr	<= 0.050 %
Copper, Cu	4.0 - 4.50 %
Iron, Fe	<= 0.12 %
Magnesium, Mg	1.20 - 1.60 %
Manganese, Mn	0.45 - 0.70 %
Other, each	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %
Silicon, Si	<= 0.060 %
Titanium, Ti	<= 0.10 %
Zinc, Zn	<= 0.15 %

Physical Properties	Metric
Density	2.70 g/cc

Component Elements Properties	Metric
Aluminum, Al	92.1 - 95.5 %
Copper, Cu	3.20 - 3.80 %
Iron, Fe	<= 0.15 %
Lithium, Li	0.80 - 1.30 %
Magnesium, Mg	0.25 - 0.80 %
Manganese, Mn	<= 0.35 %
Other, each	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %
Silicon, Si	<= 0.12 %
Silver, Ag	0.25 - 0.60 %
Titanium, Ti	<= 0.10 %
Zinc, Zn	<= 0.35 %
Zirconium, Zr	0.040 - 0.18 %

Presa come riferimento **2524**

**2098**

Grazie al contenuto di **litio ridimensionato a meno del 2%** e a trattamenti termo-meccanici ottimizzati, le leghe di terza generazione sono termicamente stabili e offrono resistenza meccanica e alla corrosione in grado di soddisfare i driver design per diverse aree specifiche di ala e la fusoliera:

<b>CONFRONTO CON 2524</b>		
<b>ALCOA ALLOYS</b>	2198	2199
<b>DENSITY</b>	-3%	-5.1%
<b>YOUNG'S MODULUS</b>	+12%	+14%
<b>TENSILE YIELD L</b>	+37%	+14%
<b>TENSILE YIELD LT</b>	+46%	+23%
<b>NO CLADDING REQUIRED</b>		

Le problematiche di saldabilità rimangono comunque le stesse, tipiche di tutte le leghe di alluminio. Vi è infatti da tenere conto che l'alluminio è caratterizzato da:

- un ossido chimicamente molto resistente e fortemente aderente al metallo;
- elevata conducibilità termica ed elevato coefficiente di dilatazione termica;
- ritiro di solidificazione molto elevato
- ottima capacità di solubilizzare idrogeno nel

La presenza di uno spesso strato di ossido è deleteria, perché interferisce con la saldatura, portando alla formazione d'inclusioni o favorendo l'assorbimento d'idrogeno nel liquido (il film superficiale quasi sempre contiene ossidi idrati); esso va quindi rimosso, meccanicamente o chimicamente, dopodiché la saldatura va effettuata nell'arco di poche ore.

La rimozione e la pulitura superficiale devono essere particolarmente accurate nel caso delle leghe Al-Li, perché il Li sembra favorire l'assorbimento d'idrogeno nel liquido. Oltre all'ossido vanno eliminati tutti i contaminanti come idrocarburi e grassi, che durante la saldatura si decomporrebbero liberando idrogeno, e parimenti va controllata con accuratezza la purezza del gas di protezione (shielding gas, usualmente miscele di elio e argon), che non deve contenere né umidità, né ossigeno, né, ovviamente, idrogeno.

L'elevata conducibilità termica fa sì che occorra utilizzare elevate densità di potenza, perché altrimenti l'energia termica è rapidamente trasportata lontano dal cordone di saldatura; nelle saldature ad arco sarà dunque necessario lavorare con densità di corrente più elevate di quelle usuali con le leghe ferrose. È spesso buona pratica effettuare giunzioni con la tecnica della passata multipla, il che implica un effetto termico più breve e più concentrato, così come hanno successo processi ad alta densità di energia come la saldatura a fascio elettronico o laser.

Va rimarcato comunque che le leghe Al-Li hanno una conducibilità più bassa di quella delle leghe classiche concorrenti (dal 30 al 50% in meno); pertanto, il requisito sull'elevata densità di potenza è meno critico.

Invece, l'elevato coefficiente di dilatazione termica delle leghe Al-Li, al pari delle altre leghe di Al, causa delle distorsioni termiche che possono essere notevoli; va quindi curato il vincolo dei pezzi durante il processo.

Il ritiro di solidificazione, che è dell'ordine del doppio rispetto a quello delle leghe ferrose, e l'ampio intervallo di solidificazione, possono portare alla formazione di cricche nel cordone di saldatura: s'impongono cautele nella conduzione del processo e nella scelta del metallo di apporto.

Giovano apporti termici concentrati e di breve durata, quindi è necessario saldare ad elevate velocità di avanzamento. È inoltre noto che la tendenza alla formazione di cricche è accresciuta dalla simultanea presenza di Cu e Mg, mentre il silicio agisce in senso opposto. L'uso della lega Al-Si 4043 come metallo d'apporto (filler) garantisce l'assenza di cricche nel cordone, ma porta a basse duttilità nel cordone per la formazione di fasi fragili come Si elementare o  $Mg_2Si$

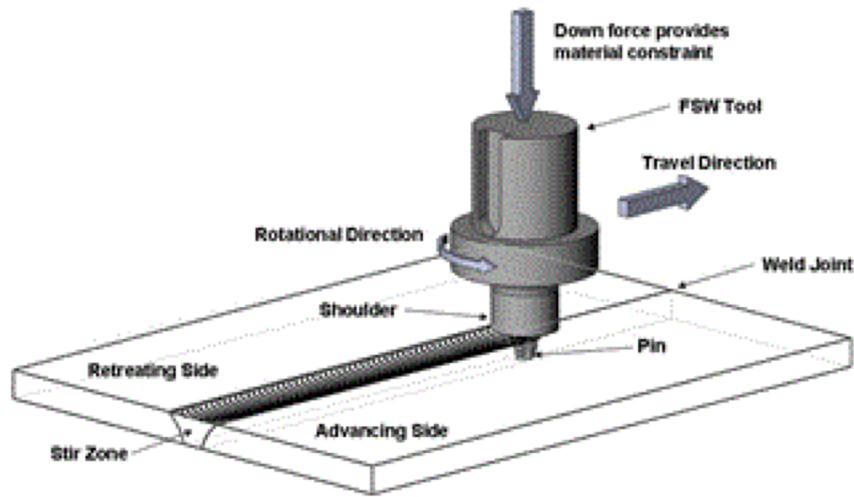
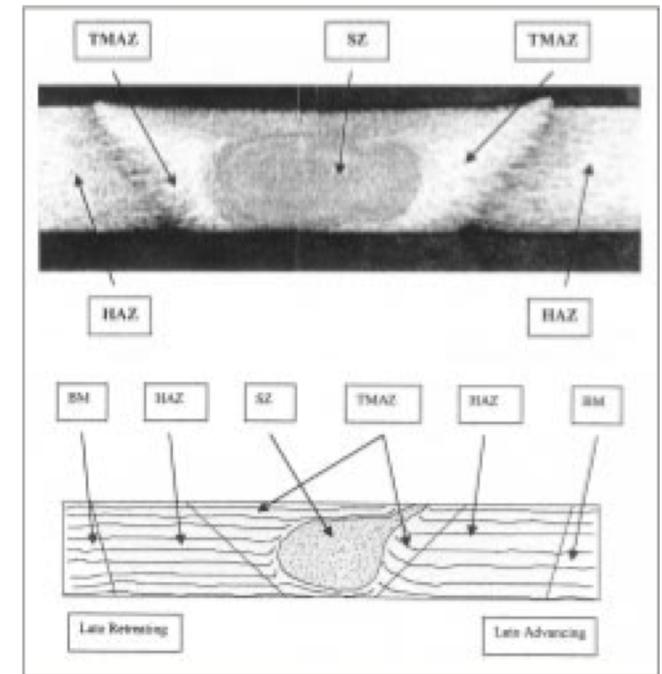


Figure 1. Friction Stir Welding Schematic

Recentemente si è diffuso l'impiego della Friction Stir Welding come tecnologia di giunzione delle leghe di Al. Si ottiene la saldatura senza passare attraverso lo stato liquido e con apporti termici assai più bassi



Il nocciolo (SZ, talvolta anche designato Nugget) contiene una struttura a grani fini ricristallizzati, all'interno dei quali vi sono fasi di equilibrio oppure precipitati rafforzanti in condizioni di sottoinvecchiamento. La TMAZ contiene grani stirati plasticamente con precipitati rafforzanti, o parzialmente disciolti ed eventualmente riprecipitati. Analoga alla TMAZ è la HAZ, dove però i grani sono quelli originali, mentre i precipitati rafforzanti hanno pure subito un'alterazione termica, ma meno intensa.

Le leghe Al-Li tradizionali necessitano di particolari tecniche di produzione per evitare reazioni esplosive al contatto del metallo liquido con acqua o umidità. Inoltre, le leghe Al-Li sviluppate negli anni '70-'80 presentano problemi di scarsa resistenza alla tenso-corrosione. Le nuove leghe hanno una percentuale di litio inferiore alle tradizionali e rientrano nella famiglia Al-Cu (2xxx). Attualmente queste leghe sono impiegate nell'industria aeronautica, ma anche per la produzione di particolari alto-resistenziali per il settore dei trasporti terrestri, come le pinze freni di auto di alta gamma, e per numerose attrezzature sportive. I principali vantaggi delle leghe al litio sono legati alla bassa densità dell'alligante, che determina un abbassamento della densità di lega, e all'aumento del modulo elastico.

## Leghe Al-Mn (Serie 3XXX)

**Queste leghe non si possono rinforzare per invecchiamento.**

La solubilita' del Mn nell' Al e' del 1,82% sebbene in realta' si arrivi solo al 1,25%.

La resistenza media di queste leghe e' di circa 110 MPa **la presenza di Mg fa aumentare la resistenza fino a 180 MPa.**

Queste leghe hanno buona duttilita', resistenza alla corrosione e saldabilita' ma una resistenza meccanica modesta. La lega piu' usata e' la **3003** (Al-Mn-Mg) con  $\sigma_y = 117$  MPa, che possiede buona formabilita', saldabilita' e resistenza alla corrosione.

Scatolame

Lattine per bibite, alimenti, cosmetica.

Utensileria da cucina.

Scambiatori di calore.

Insegne, cartelli stradali.

Pannelli di copertura, edilizia, architettonica

# Leghe Al-Si (Serie 4XXX)

Le leghe Al-Si sono le piu' importanti fra quelle colabili.

*Il silicio*

diminuisce il ritiro (6.6% Al puro, 3.8% lega)

diminuisce la densita' (2.7-0.033%Si)

diminuisce  $\alpha$  (23.5 - 0.3 %Si)  $10^{-6}$

Fra queste leghe si ricordano la **SILUMIN**, contenente il 13% di Si (leggermente ipereutettica).

**ANTICORODAL** (2 - 6% Si),

**ALPAX** corrispondente alla composizione eutettica.

eutettico      Dendriti Al primario

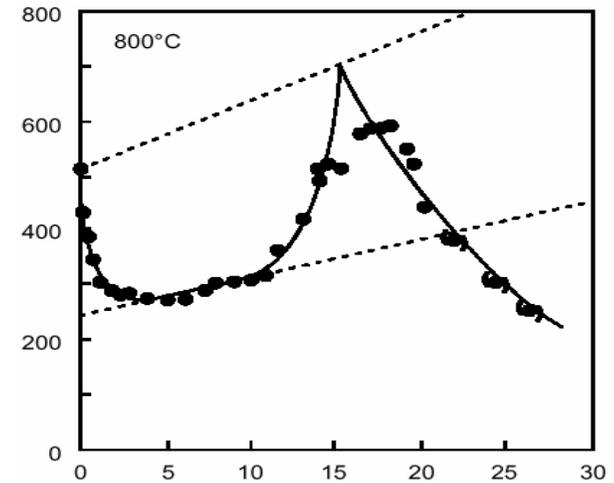
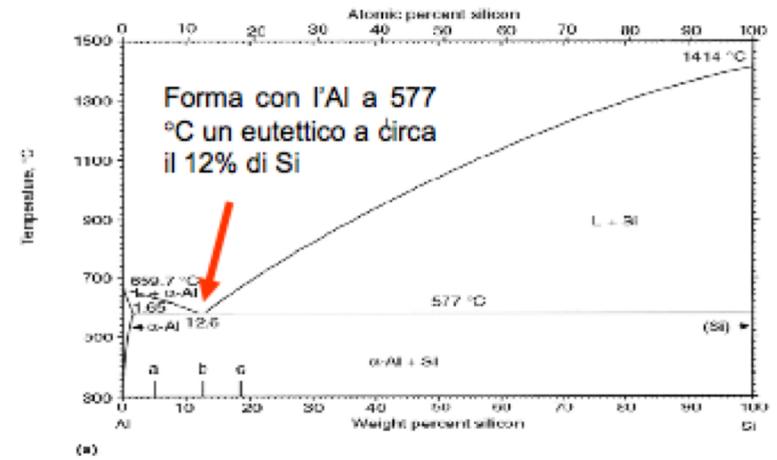
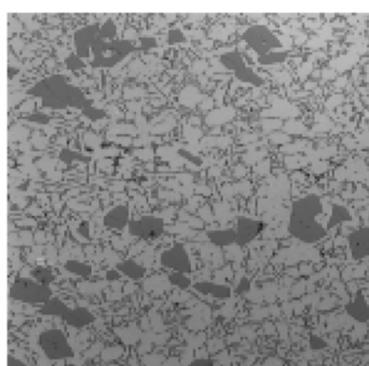
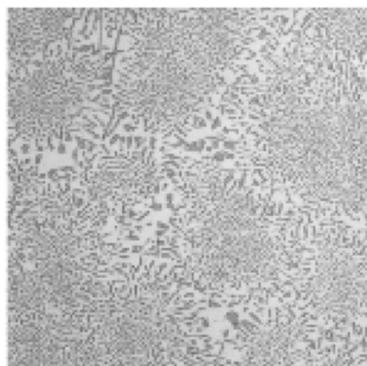
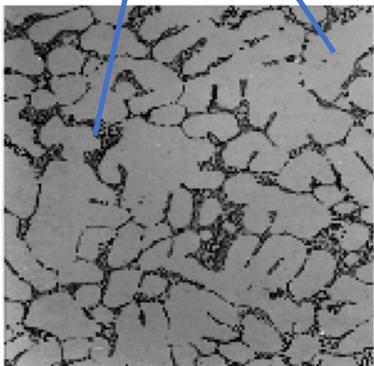
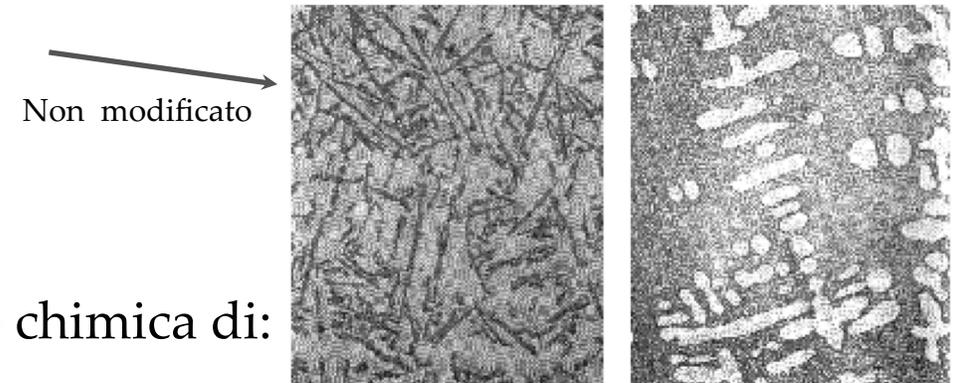


Fig. 2.3 – Fluidità (mm, asse y) al variare della % di Silicio (asse x) in leghe Al-Si.

## Leghe Al-Si (Serie 4XXX)

Generalmente le leghe Al-Si sono eutettiche o ipoeutettiche perche' eventuali particelle di Si ridurrebbero la lavorabilita' all' utensile. Queste leghe, per ottenere la piu' elevata duttilita' possibile, devono avere una struttura eutettica il piu' fine possibile e quindi si deve usare un' alta velocita' di raffreddamento del getto



Una lega **per colata** consiste di una ben calibrata composizione chimica di:

**silicio** - elemento principale

**elementi indurenti** - Cu, Mg, Si (se ipereutettica) la forma e la distribuzione di queste fasi e' fondamentale

**elementi di modifica** - Na, Sr, Sn, Ca, Sb (0,005/0,015%), raffinano e modificano la forma dell'eutettico, alcuni elementi come il fosforo invece hanno un effetto deleterio.

**Ti e B** - raffinano significativamente la microstruttura e precipitano  $TiB_2$

**Zn, Fe, Mn** - PERICOLOSI precipitano in fasi grossolane e riducono le proprieta' della lega, impediscono la liquido eutettico di riempire i vuoti delle dendriti, generando cosi' porosita'.

Leghe molto usate sono

4032 (Al - 12Si - 1Cu - 1Mg - 2Ni)

viene utilizzata per i pistoni dei motori in quanto il Ni formando intermetallici permette una buona resistenza alle alte temperature. Ha buona forgiabilità e basso coefficiente di espansione termica.

A339 (Al - 17Si - 4Cu - 0,55Mg)

viene usata per blocchi motore in quanto il Mg precipitando sotto forma di  $Mg_2Si$  aumenta la resistenza all'usura.

# Leghe Al-Mg (Serie 5XXX)

## Non trattabili termicamente

Il principale elemento di lega è il Mg, che conferisce doti particolari di resistenza alla corrosione, oltre a buona resistenza a caldo ed ottime doti di duttilità e lavorabilità.

Queste leghe sono

piu' leggere dell'alluminio, (2,7- 0.014 %Mg)

hanno buona lavorabilità,

**buona resistenza alla corrosione in ambiente marino**

sono facilmente saldabili

facilmente colabili

mantengono superfici lucide

Mg 0,8-5%, possono contenere anche Mn.

Caratteristiche meccaniche medio-elevate, migliorabili tramite deformazione plastica a freddo. Elevato allungamento a rottura.

Elevata saldabilità con metodi tradizionali

## Applicazioni

Applicazioni architettoniche

Contenitori per alimenti, carburanti ed agenti aggressivi

Impieghi in ambiente marino

Impieghi criogenici o ad elevata pressione

Automotive (5005 – 5050) perche' permettono un grado di finitura superficiale e lucentezza notevoli

## Leghe Al-Mg-Si (Serie 6XXX)

### leghe da trattamento termico

Il Mg e il Si si combinano a formare un composto, il siliciuro di magnesio  $Mg_2Si$  che a sua volta forma un eutettico con l'alluminio. *E' la precipitazione del composto  $Mg_2Si$  dopo **invecchiamento** che permette a queste leghe di possedere una piu' che soddisfacente resistenza meccanica.*

La loro resistenza alla corrosione e' piu' che buona e sono le piu' lavorabili tra quelle invecchiabili.

Quindi la combinazione di colabilita', resistenza meccanica, resistenza alla corrosione, lavorabilita' e formabilita', verniciabilita' le rendono molto attraenti all'industria automobilistica.

Caratteristiche elevate ma inferiori a 2XXX e 7XXX

Vengono utilizzate per applicazioni architettoniche, telai motociclistici e ciclistici, strutture saldate in genere

# Leghe Al-Zn (Mg) (Serie 7XXX)

Trattabili termicamente

Il composto che precipita coerentemente e' il  $MgZn_2$ .

Queste leghe sono, fra quelle dell'alluminio quelle con la resistenza meccanica piu' elevata.

contengono Zn da 5 a 8% e Mg, Cu, Cr e Zr

Caratteristiche elevate per applicazioni high-end

Sensibili alla tensocorrosione, quindi addizioni di Cr

Invecchiano a T ambiente

Saldabilità elevata, senza cali prestazionali

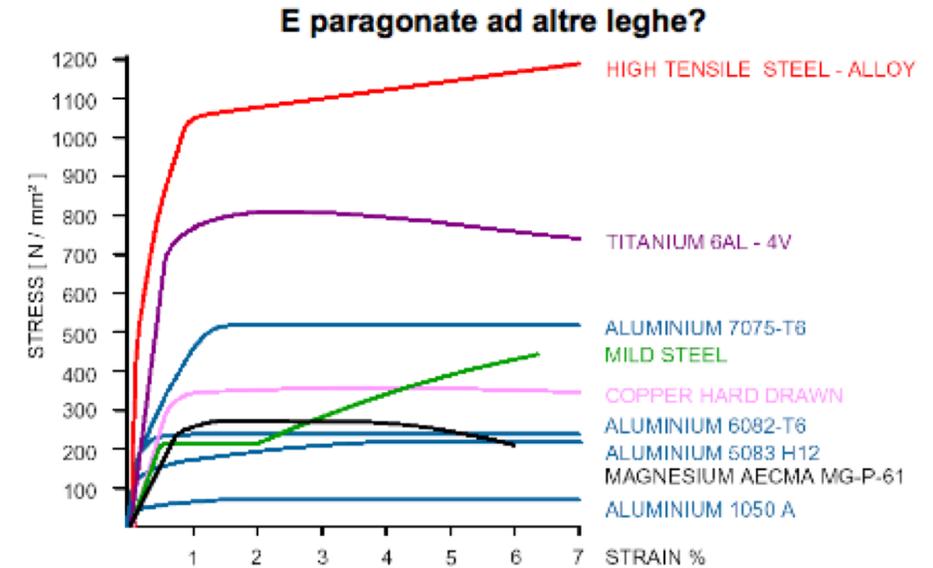
**Applicazioni**

Aeronautica, aerospaziale.

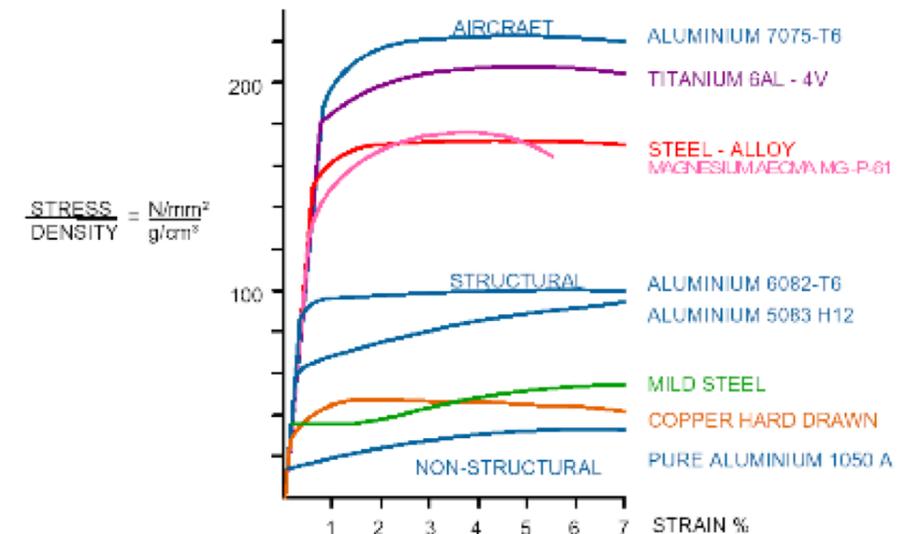
Equipaggiamenti ultraleggeri, applicazioni militari.

Componenti altamente stressati.

Trasporti ferroviari civili.



**Ma, in base alla densità, come si comportano?**



# Leghe Al-Zn (Serie 7XXX) - TITANAL

## Titanal

(88,6%Al - 7%Zn - 2,4%Mg - 1,7%Cu - 0,1%Zr - Cr - Ti)

lega che raggiunge i 690 MPa di rottura e 600 MPa di snervamento, con elevata tenacita'. Molto usata nella sport (sci. snowboard. corone dentate di biciclette)



"This is the ski that caused all the commotion last year. Sold out 4 months after introduction, this ski was designed and is used by Dominique Perret, the world famous extreme skier. This ski is not for the faint of heart, but for the all mountain extreme skier. Power through powder and crud at speed with confidence, jump off the nearest cliff, or race on your nearest GS course. It is simply the fastest, the **stiffest** and the most precise extreme ski on the market today. This is truly an amazing ski".



Titanal provides more torsional stiffness, and gives a damper response. As a result, it is much easier to carve on icy slopes than with a regular skiboard - there is really no comparison. At first glance, a Titanal-enhanced skiboard would seem likely to help only folks who are already at the top of their game on the race course. However, carvers are reporting that Titanal improves the performance of any type of board (all-mountain, freecarve, race) for freecarving as well as racing, and for people with various degrees of carving skill. Presumably, if Titanal can smooth out the bumpiness from badly groomed ice, then it could theoretically benefit anyone.

Lega	$\sigma$ rottura (MPa)	$\sigma$ snerv (MPa)	Allung (%)
Titanal	690	600	10
7075-T6	525	460	6
2014-T6	440	390	6
6061-T6	290	240	6

# Al-Sc Alloys

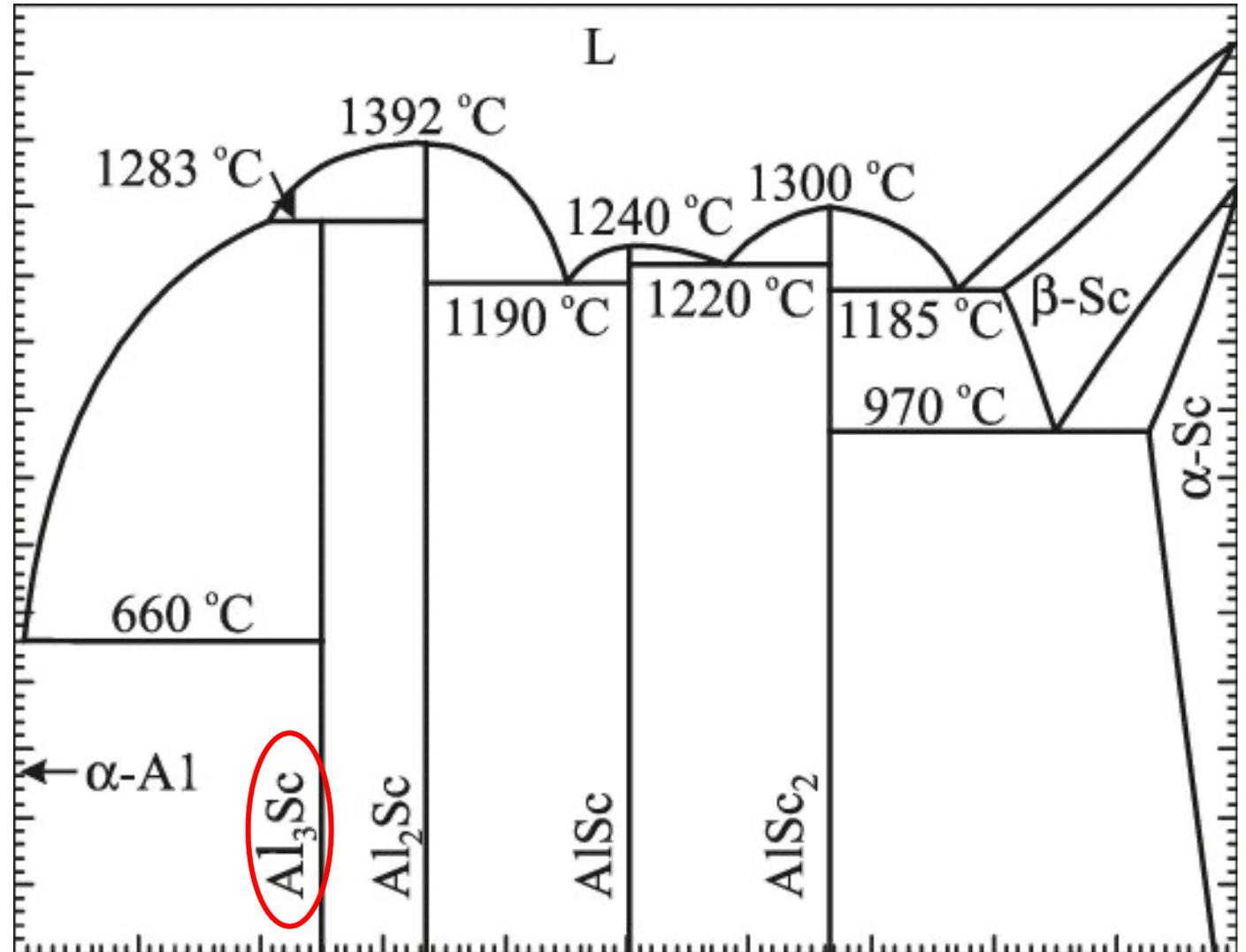
From Scandinavian Peninsula (1879)

Boiling Point 2831 °C

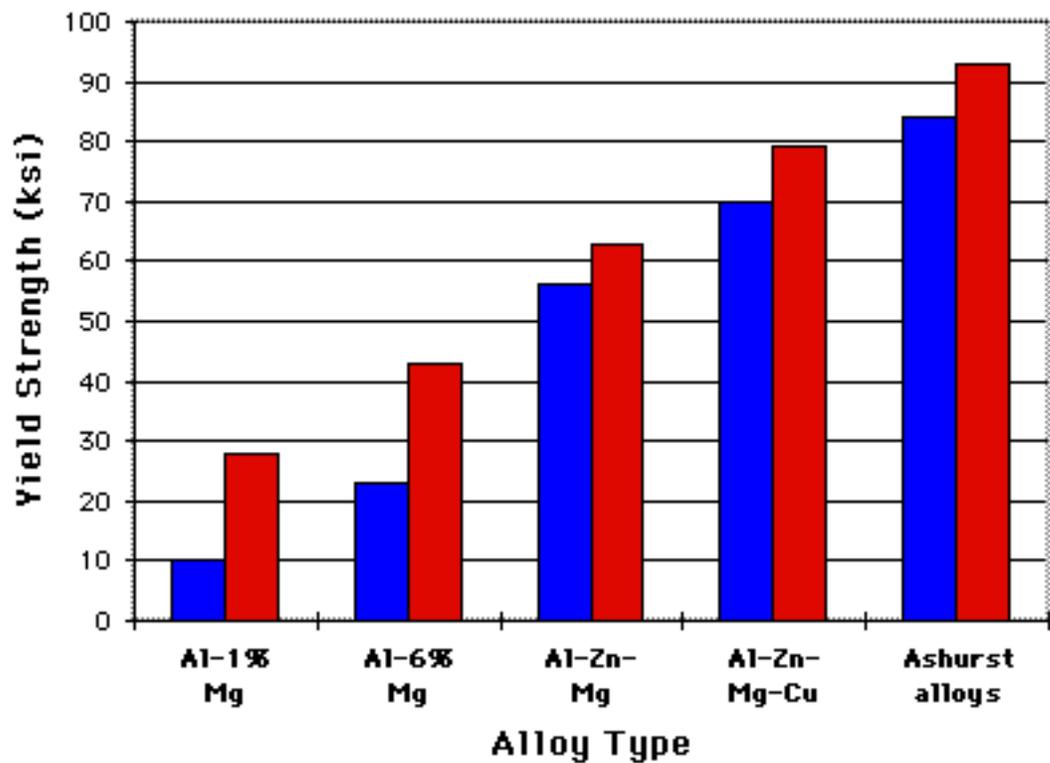
Density @20°C 2.99 g cm<sup>-3</sup>

Melting Point 1541 °C

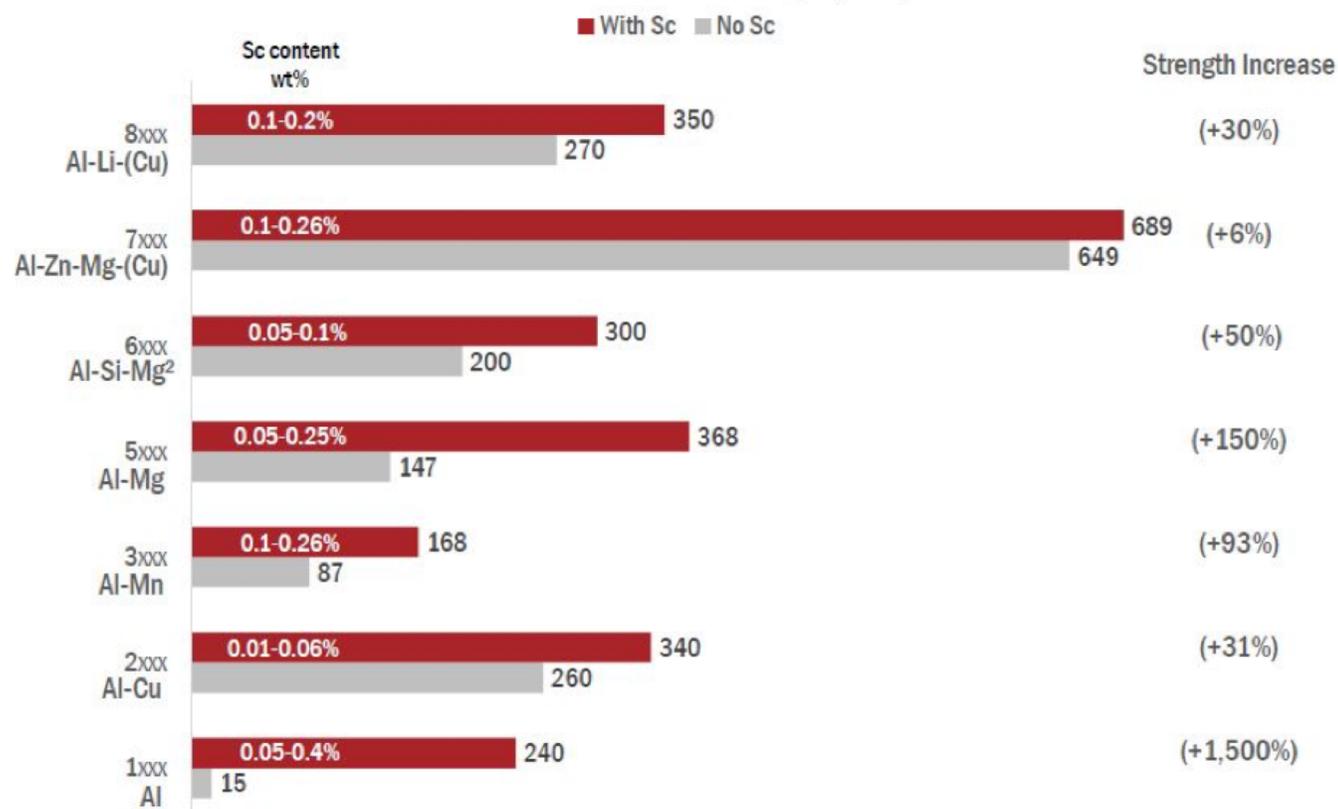
Young Modulus 79 GPa



## Sc Increases Yield Strength of Al Alloys



■ No Sc  
■ + Sc



# LEGHE Al - Sc

Negli anni 2000 è cominciato lo studio del comportamento della 7075 all'aggiunta di scandio tra lo 0.1 e lo 0.5%. *Il motivo per cui non era ancora stata effettuata alcuna sperimentazione è che fino a qualche anno fa l'unica miniera di scandio primario al mondo si trovava in Ucraina, sotto il controllo dell'Unione Sovietica.* Lo sviluppo delle leghe Al- Sc fiorì quindi solo al suo interno, alimentato dalla grande richiesta del settore militare. *Quando nel 1991 l'Unione Sovietica si sciolse, le leghe Al-Sc erano largamente impiegate nei MIG 29 grazie alle loro qualità, migliori delle altre leghe di alluminio già esistenti.* **Infatti lo scandio fornisce il massimo rafforzamento per punto percentuale ottenibile, più di qualsiasi altro elemento, aumentando notevolmente resistenza e tenacità.**

La lega 7075+Sc allo stato estruso raggiunge una tensione di snervamento pari 553 MPa e un carico di rottura di 706 MPa contro i 500 MPa e i 570 MPa della 7075-T6.

Scandium achieves these improved properties in Al-Sc alloys through superior fundamental dispersoid characteristics:

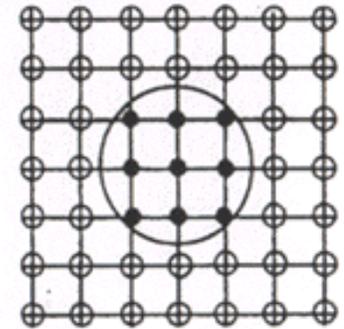
Highly Coherent Dispersoids

Greater Volume Fraction of Dispersoids (more soluble and lower atomic wt.)

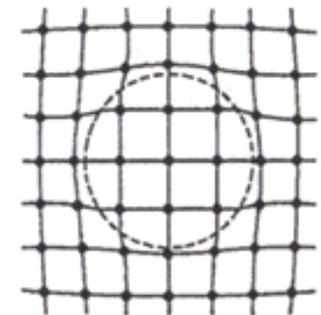
Greater Thermal Stability

**Highly Coherent Dispersoids**

The  $\text{Al}_3\text{Sc}$  dispersoid is an L12-type phase which is coherent with the aluminum matrix. **An extremely high coherency mismatch is observed for the  $\text{Al}_3\text{Sc}$  phase resulting in significant lattice strain to block dislocation motion and to impede grain growth.** This mismatch is 1.2% compared with 0.8% for  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , one of the next most potent dispersoids.



Fully Coherent - No Mismatch



Fully Coherent - High Mismatch

## Greater Volume Fraction of Dispersoids (more soluble and lower atomic wt.)

Compared with other grain refining elements used in aluminum alloys (e.g. Zr, Ti, Mn, Cr) a **greater volume fraction of Sc can be added.**

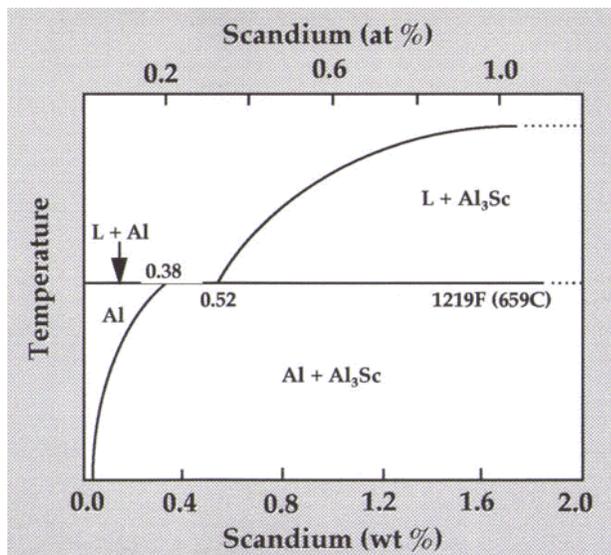
A greater volume fraction effectiveness is important to inhibit recrystallization and prevent subgrain annihilation and coalescence. The high coherency strain further impedes the motion of grain boundaries resulting in a finer grain structure and higher strength through the well known Hall-Petch relationship.

<b>Alloying Element</b>	<b>Solubility (Wt. %)</b>	<b>Solubility (Vol Atomic %)</b>
Sc	0.50	0.30
Ti	0.18	0.05
Zr	0.15	0.08
Mn	0.30	0.15
Cr	0.25	0.13
V	0.10	0.05

## Greater Thermal Stability

The Al-Sc phase diagram shows the Al-Al<sub>3</sub>Sc eutectic reaction to take place at an unusually high temperature (659 C). This high solidification temperature improves heterogeneous nucleation of grains, resulting in a refined grain size (and reduced hot cracking). A reduction in hot cracking is especially important for welding of high strength alloys. **Most of the highest strength aluminum alloys are not weldable and the the addition of Sc can improve the weldability of many of these alloys.**

Perhaps a more important aspect of the greater thermal stability of the Al<sub>3</sub>Sc dispersoids is their effectiveness at reducing recrystallization. Alloys that are heavily cold worked (such as extruded and/or drawn bars, bike frames, and tubes) contain sufficient stored energy to cause recrystallization. This results in substantial strength loss. Designers know that thin-walled products have less strength than thicker sections due to this softening effect. The addition of Sc can eliminate this problem in many combinations of alloy, heat treatment, and mechanical working.



Element	Recrystallization Temp. (C)
Mn	325
Cr	325
Zr	400
Sc	600

Gli effetti positivi dell'aggiunta di Sc,

- efficace affinante del grano.

- alluminio e scandio formano un composto  $Al_3Sc$  (invecchiamento naturale ed artificiale).

- La presenza di scandio in lega ha inoltre una capacità di interazione con lo zirconio.

Se si aggiungono anche piccole percentuali di Sc e Zr, ad esempio in leghe 7xxx si possono ottenere materiali con altissima tenacità

Ulteriori vantaggi derivanti dall'aggiunta di scandio a leghe di alluminio (principalmente famiglie 5xxx e 7xxx) sono inoltre:

- aumento delle caratteristiche tensili anche per ridotte percentuali di alligante (Sc = 0,2-0,3%).

- ottimo comportamento delle saldature effettuate con leghe allo scandio come filler, con un netto incremento della vita a fatica dei giunti saldati.

Questo fatto è legato alle caratteristiche chimico-fisiche delle cosiddette “Terre rare” (scandio, ittrio e lantanoidi), che poi non sono affatto rare ma abbondanti soprattutto nel Nord del mondo. Ad esempio lo scandio è due volte più diffuso del piombo e ben dieci volte più presente nella crosta terrestre rispetto allo stagno.

Se però si devono produrre composti puri di una sola terra, si incontrano grandissime difficoltà di separazione, con una fortissima riduzione della resa della reazione volta ad ottenere una purezza sufficientemente elevata. Peraltro è noto il motivo dell'incremento del costo dei composti puri: alcune terre rare sono diventate negli ultimi anni additivi fondamentali per tecnologie strategiche nei settori dell'elettronica e delle batterie. Senza i composti delle terre rare non potrebbero funzionare strumenti moderni a larga diffusione come smartphone, auto ibride ed elettriche, pale eoliche, oltre a molti sistemi avanzati di difesa.

Il fabbisogno mondiale di ossido di scandio puro per leghe madri è stimato attualmente in circa 15 tonnellate/anno, per la produzione di circa 3.500 tonnellate di leghe con un'alligazione di tenore di 0,2%

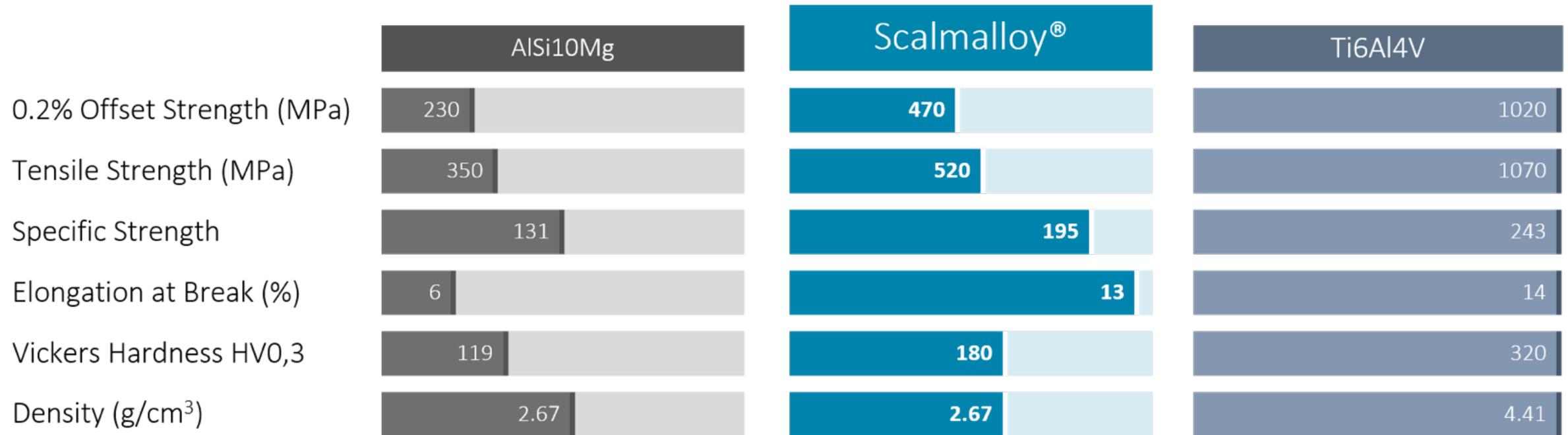
**Ma il prezzo e' circa \$ 7000 /Kg of Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sc puro fluttua tra 4000 e 20000/Kg)**

The good news is that this could soon change due to newly discovered deposits of the mineral Thortveitite in Australia, in the South-eastern state of New South Wales and North-eastern state of Queensland, which possess a significant quantity of scandium oxide (around 30-40%). Work has started on 3 new mines (2017) that will be able to produce together 112 tonnes every year of scandium oxide. This could be a game-changer, **especially in the automotive industry**. Since global production will increase five-fold, we can expect that this supply side boost will pave the way for much lower market prices and an increase in the metal's use – and even compete with 3<sup>rd</sup> generation Advanced High-Strength Steel (AHSS).

Depending on the percentage of the Sc, the price of the Al-Sc alloys are expected to cost between 30% more than non-Sc alloy.

Airbus Group has developed **Scalmalloy**, a high-performance **Al-Sc-Mg** alloy designed for high-strength aerospace structures. **Scalmalloy has exceptional high-fatigue properties with specific strength approaching that of titanium.** In comparison, the AlSi10Mg, widely used, is only half as strong. *It is stated that using aluminium-scandium alloys could reduce the weight of a large aircraft by 10%-15%* or 6-10 tonnes, according to Airbus... worth about \$1.4 million at current market prices... lifetime value of fuel savings would total anywhere between \$20 and \$30 million

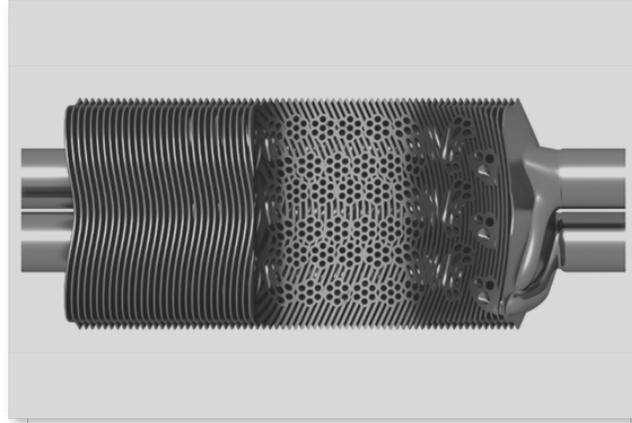
Scalmalloy® unites the best of both “worlds” – Titanium and Aluminum



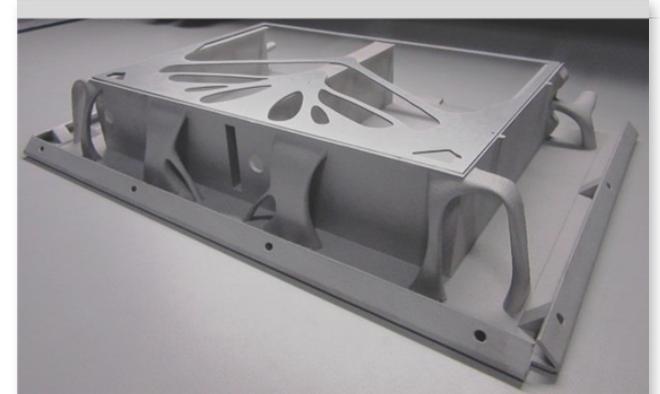
# Scalmalloy® in various applications



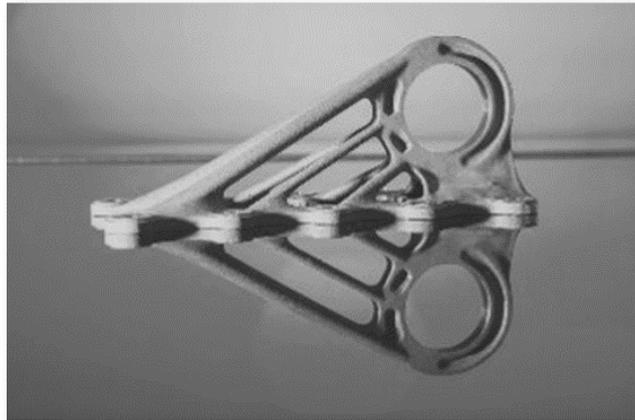
**Aerospace** - "Bionic Partition"



**Automotive** - "Heat Exchanger"



**Space** - "Satellite Panel"



**Aerospace** - "Bracket"



**Others** - "Light Rider"



APWORKS's Scalmalloy aluminum alloy has now also been officially approved by the FIA (Fédération Internationale de l'Automobile) and added to the Formula 1 regulation as one of the 3D printing metal materials. Given that APWORKS is based in Germany it seems safe to assume that the current world champion Mercedes team will be making use of the material for its seemingly unbeatable vehicle. Mercedes F1 has been a major adopter of AM for rapid car development throughout its tenure.