

# MAGNESIO e LEGHE ULTRALEGGERE

## Classificazioni e trattamenti termici

Gianotti Elio. Trattamenti Termici Ferioli & Gianotti S.p.A. Torino – anno 1990

### Indice

<i>Caratteristiche chimiche</i> .....	2
<i>Caratteristiche fisiche</i> .....	2
<i>Caratteristiche meccaniche</i> .....	2
<i>Classificazione e leghe</i> .....	3
<i>Controllo del trattamento termico</i> .....	19
<i>Efficacia dei trattamenti termici</i> .....	21
<i>Elenco e significato dei simboli UNI</i> .....	4
<i>Forni per trattamento termico</i> .....	20
<i>Generalità</i> .....	2
<i>Grano cristallino e proprietà meccaniche</i> .....	13
<i>Influenza degli elementi sulle leghe di Mg</i> .....	12
<i>Influenza dei trattamenti termici sulla corrosione</i> .....	22
<i>Processo elettrolitico</i> .....	3
<i>Processo termico</i> .....	3
<i>Tabelle</i> .....	24
<i>Trattamenti termici</i> .....	14
<i>Variazioni strutturali delle leghe</i> .....	5

### 1) Magnesio puro

Il magnesio puro è un metallo di colore bianco argenteo.

Come tale non trova applicazioni di interesse meccanico.

Si incendia facilmente, quando si trova sotto forma di trucioli o polveri, generando una luce intensissima; come tale era usato in fotografia per il flash ed ancora attualmente in pirotecnica.

È facilmente corrodibile e deve essere protetto con dei trattamenti superficiali.

### 2) Caratteristiche chimiche

Numero atomico: 12

Peso atomico: 24.32

Valenza: 2

Cristallizza con reticolo esagonale, con un solo piano di slittamento a temperatura ordinaria, per cui è poco malleabile rispetto all'alluminio.

A temperatura compresa fra 260 e 360°C si hanno altri slittamenti per cui si verifica un notevole aumento di malleabilità.

È un energico riducente e desolforante ed è aggiunto nelle ghise per ottenere la sferoidizzazione della grafite.

Data la sua alta ossidabilità ad alta temperatura la sua fusione e quella delle sue leghe, deve avvenire in presenza di flussi costituiti da cloruri e fluoruri alcalini ed alcalino terrosi con piccole quantità di ossido di Mg.

### 3) Caratteristiche fisiche

Densità: 1.738

Punto di fusione: 650°C

Punto di ebollizione: 1110°C

Calore specifico a 20°C 0.37 cal / (g·°C). Calore latente di fusione 85 cal / g.

Conducibilità elettrica  $24 \times 10^4$  mho / cm (pari al 38% di quella del Cu).

Conducibilità termica a 20°C 0.37 cal / (cm·°C·s).

Coefficiente di dilatazione tra 20 – 100°C =  $26.1 \times 10^{-6}$  cm / °C.

Potenziale normale di elettrodo -2.34 Volt.

La buona conducibilità elettrica del Mg non è sfruttabile per la costruzione di conduttori elettrici soprattutto per la sua elevata corrodibilità.

Il suo peso specifico molto basso è alla base dell'interesse sempre maggiore delle sue leghe soprattutto nel campo aeronautico e missilistico e in tutti in quei casi in cui occorra diminuire le masse inerti in movimento alternato (es. pistoni di motori a scoppio).

### 4) Caratteristiche meccaniche

La resistenza meccanica del Mg è più elevata di quella dell'alluminio, ma le sue proprietà elastiche, la sua malleabilità e la sua duttilità sono molto ridotte. Il magnesio industriale al 99.5% di purezza si può forgiare a 350°C. Allo stato forgiato ha una resistenza di  $22 \div 28$  Kg/mm<sup>2</sup> ed un allungamento del 10%. Il modulo di elasticità è molto basso (~ 4500 Kg / mm<sup>2</sup>, anche nel caso di leghe trattate termicamente, per cui è necessario aumentare la rigidità delle strutture aumentando le sezioni e rinforzando le nervature. Anche così agendo, l'aumento di

peso che ne consegue lascia ancora margine a grossi vantaggi sui metalli più pesanti. Raddoppiando le sezioni le leghe leggere avranno il vantaggio di allontanare le cause di rottura per flessione o vibrazione, pur conservando ancora notevoli vantaggi dal punto di vista del peso. Il magnesio è molto diffuso in natura, si calcola che nelle rocce della crosta terrestre sia presente nell'ordine del 3% circa.

L'estrazione avviene per elettrolisi partendo dal cloruro fuso ( $MgCl_2$ ), oppure per riduzione partendo dall'ossido ( $MgO$ ).

#### 5) Processo elettrolitico

Si può ottenere il cloruro di Mg dalla dolomite ( $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ ), con un opportuno processo chimico, o da altri minerali. Ottenuto il  $MgCl_2$  è necessario disidratarlo, perché cristallizza con sei molecole di  $H_2O$ , riscaldandolo. E' particolarmente difficile eliminare le due ultime molecole di  $H_2O$  perché il  $MgCl_2$  tende a questo punto a dissociarsi in Mg o e HCl. Si ostacola la decomposizione effettuando il riscaldamento in presenza di HCl gassoso o di cloruro di ammonio che a tale temperatura è parzialmente dissociato.

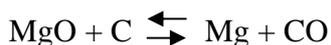
Ottenuto il cloruro di magnesio anidro lo si fonde in vasche di ferro con anodi di grafite (punto di fusione  $718^\circ C$ ) in presenza di cloruri e fluoruri alcalini o alcalino terrosi che hanno funzione di ricoprire, proteggendolo, il bagno.

Il magnesio che si separa ai catodi di ferro galleggia sul sale fuso e viene periodicamente allontanato dalla cella.

Verrà poi rifuso in forni elettrici, protetto con sali fusi. Il magnesio così ottenuto ha la seguente composizione media % Mg 99.85 ; Al 0.07 ; Mn 0.08 ; Si 0.01 ; Cu 0.003 ; Ni 0.001 ; Fe 0.03 ; Ca 0.01 ; Pb 0.001 ; Zn 0.01.

#### 6) Processo termico

Si basa sulla reazione reversibile:



Sopra i  $2000^\circ C$  la reazione è tutta spostata a destra. Tenendo conto che il Mg bolle a  $1100^\circ C$  è sufficiente mantenere la temperatura al di sopra di tale valore ( $1200 \div 1600^\circ C$ ) e raffreddare poi bruscamente i gas che si svolgono dalla reazione per impedire il ritorno a sinistra dell'equilibrio.

Come mezzo riducente è possibile usare anche carburo di calcio o silicio metallico.

La riduzione del MgO deve avvenire sottovuoto.

Il metallo così ottenuto ha una maggiore purezza di quello ottenuto per via elettrolitica e come conseguenza presenta una maggiore resistenza alla corrosione.

La composizione media % è la seguente:

Mg 99.97 ; Al 0.004 ; Mn 0.02 ; Si 0.006 ; Cu < 0.001 ; Ni < 0.0005 ; Fe 0.001 ; Ca 0.006 ; Pb 0.001 ; Zn 0.001

#### 7) Classificazione del Mg e sue leghe

Non esiste per le leghe di Mg una classificazione, da parte della UNI, completa come per le leghe di alluminio.

Per offrire una panoramica esauriente di tutte le leghe industrialmente interessanti è quindi necessario ricorrere alle classificazioni, oltre che della UNI, degli enti delle altre nazioni, o alla loro designazione commerciale.

Le leghe di Mg, adatte alla tecnologia delle costruzioni, assumono in commercio varie denominazioni:

ATESIA in Italia.

ELEKTRON; MAGNEWIN in Germania.

DOW METAL in U.S.A.

Dal punto di vista della composizione chimica le leghe di Mg possono essere suddivise in due gruppi:

leghe Mg – Al – Zn

leghe Mg – Zn – Zr (con eventuale aggiunta di terre rare o di Torio).

Terre rare: gruppo di ossidi di 16 elementi (scandio, ittrio, lantanio, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, olmio, erbio, tulio, itterbio, butesia, cassiopeo).

## 8) Elenco e significato dei simboli UNI

### Contrassegno della lega

Come già avviene per le leghe di alluminio i simboli che indicano gli elementi di lega sono preceduti dalla lettera G quando si tratta di leghe per getti, dalla lettera P quando sono leghe da lavorazione plastica e dalle lettere GD quando sono leghe da utilizzare in pressofusione. La sigla G sarà inoltre seguita dalla lettera S nel caso di getti colati in sabbia e dalla lettera C nel caso di getti colati in conchiglia.

Dopo di che sono elencati il simbolo del Mg e successivamente i simboli chimici degli elementi che entrano a far parte della lega in ordine decrescente di concentrazione percentuale degli elementi più importante che entrano in lega.

Es. GD – Mg Al 8.5 Zn Mn UNI 6169-68.

### Simboli dello stato di impiego o di fornitura

Servono ad indicare sia il metodo di formatura dei pezzi (fusione o deformazione plastica) con i simboli sopra specificati sia gli eventuali trattamenti termici ai quali sono stati sottoposti. Le sigle indicanti i trattamenti termici sono uguali a quelle usate per le leghe di Al.

R = ricottura.

T = tempra di soluzione (in genere con raffreddamento in aria).

A = invecchiamento artificiale.

N = invecchiamento naturale.

T A = bonifica (tempra di soluzione seguita da invecchiamento artificiale).

Esiste in alternativa, una simboleggiatura dovuta all'AICMA (Associazione internazionale costruttori materiali aerospaziali) che prevede i seguenti simboli:

T 2 = ricottura (R secondo UNI).

T 4 = tempra di soluzione (T secondo UNI).

T 5= invecchiamento artificiale (A secondo UNI).  
T 6 = bonifica (T.A. secondo UNI).

## 9) Variazioni strutturali delle leghe di magnesio

### Leghe Mg – Al – Zn

È opportuno precisare come nelle leghe di Mg che si dovranno esaminare avvengano, durante i cicli termici, delle trasformazioni strutturali che sono analoghe a quelle esaminate a proposito delle leghe di alluminio. I diagrammi di stato specifici sono anche in questo caso fondamentali per una chiara percezione dei meccanismi che presiedono alle variazioni strutturali delle singole leghe mentre le teorie atomiche sulla struttura cristallina dei metalli sono valide anche in questo caso fondamentali per una spiegazione teorica delle risposte in termini di miglioramenti meccanici che le leghe danno quando sono sottoposte a trattamenti termici.

Si rimanda quindi a quanto detto su questo argomento a proposito dell'alluminio e sue leghe.

Esaminiamo ora i diagrammi di stato principali.

Per semplicità di lettura i diagrammi considerati saranno binari anche se, come abbiamo visto, le leghe sono sempre almeno ternarie.

Nelle leghe Mg – Al – Zn la concentrazione dell'alluminio è variabile dal 4 al 10% , lo zinco dal 0.3 % e il 3.3% mentre il Mn è presente in tenori dello 0.15%. L'alluminio è l'elemento determinante agli effetti dell'aumento delle caratteristiche meccaniche della lega sottoposta a bonifica. Lo zinco aumenta la duttilità, mentre il Mn migliora la resistenza alla corrosione. Esaminiamo quindi il diagramma di stato Mg – Al lato Magnesio visto che è l'alluminio che presenta variazioni notevoli di solubilità al variare della temperatura.

Anche se dal diagramma risulta che la solubilità dell'alluminio nel Mg diminuisce fino al 2.3% a temperatura ambiente, le leghe rispondono bene al trattamento quando hanno tenori di alluminio compresi fra il 7 e l'11% nel caso di leghe binarie; nel caso delle leghe ternarie Mg Al Zn il tenore di Zn + Al deve essere compreso fra 7 e 13% con un tenore minimo di Al del 5%.

I punti di particolare interesse del diagramma sono costituiti da:

- massima solubilità dell'Al nel Mg a 436°C con concentrazione dell'Al del 12.6 %.
- Formazione di un composto intermetallico rispondente alla formula  $Al_{12}Mg_{17}$  con concentrazione dell'Al del 46%.
- Formazione di un eutettico, costituito da soluzione solida satura di Al nel Mg e del composto intermetallico  $Al_{12}Mg_{17}$ , ad una temperatura di 436°C e ad una concentrazione del 32.2% di alluminio.

Alla soluzione solida di Al nel Mg si dà il nome di fase  $\alpha$  mentre al composto intermetallico  $Al_{12}Mg_{17}$  si dà il nome di fase eutettoide.

Esaminiamo ora il comportamento di una lega al 7% di alluminio nel raffreddamento da oltre il punto di fusione fino a temperatura ambiente in condizioni di equilibrio stabile, cioè con velocità di raffreddamento molto lenta (vedi fig.1). Quando la temperatura della lega arriva ad incontrare la linea AC cominceranno a formarsi i primi nuclei di cristallizzazione che avranno composizione chimica determinata dall'incontro della orizzontale a quel punto con la linea solidus (AB). I cristalli saranno quindi a concentrazione di Al molto bassa. Procedendo nel raffreddamento la composizione del liquido restante e del solido che si forma sarà data dall'incontro della orizzontale al punto indicante la temperatura con le linee rispettivamente AC e AB, per cui la concentrazione in Al e Mg liquido aumenterà progressivamente per avvicinarsi al punto C alla fine della solidificazione, mentre le dendriti tenderanno ad essere più concentrate in Al mano a mano che crescono le ultime parti di liquido che solidificheranno le più impure e formeranno una specie di reticolato intorno ai grani cristallini.

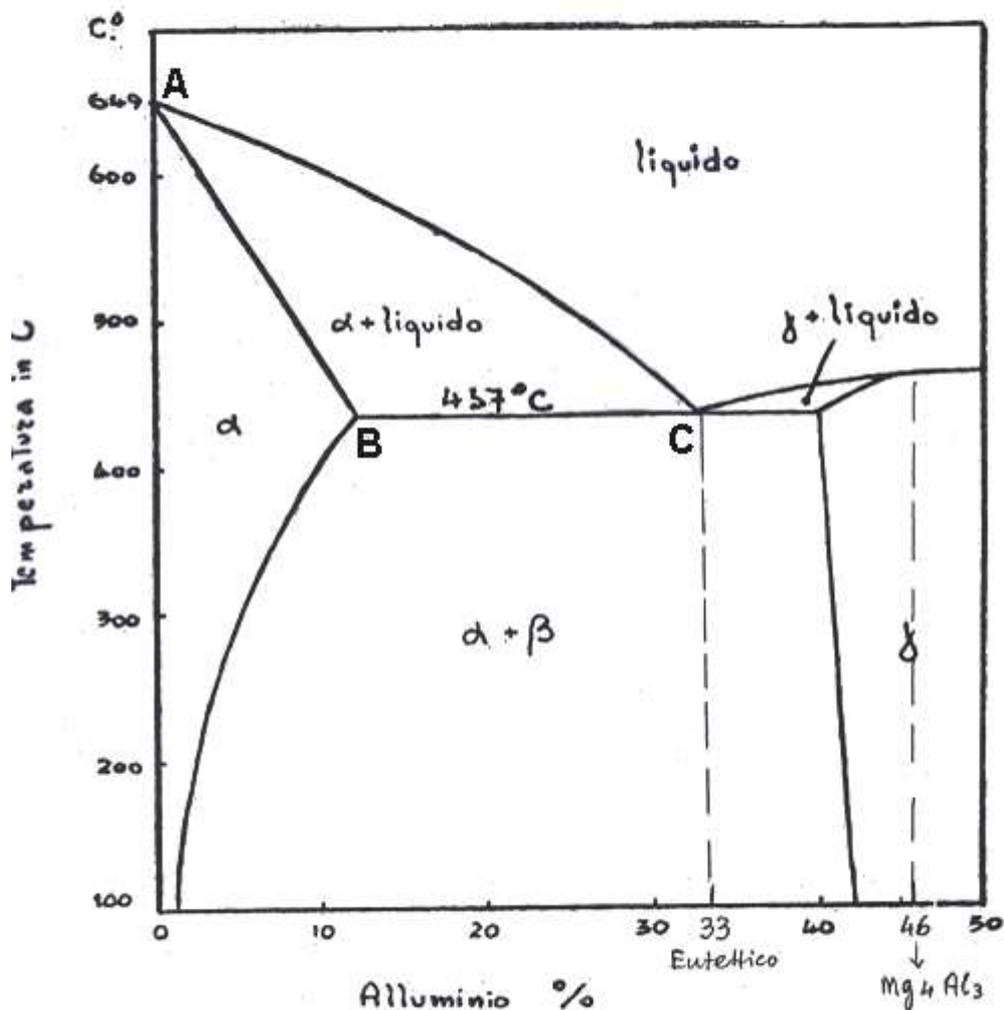
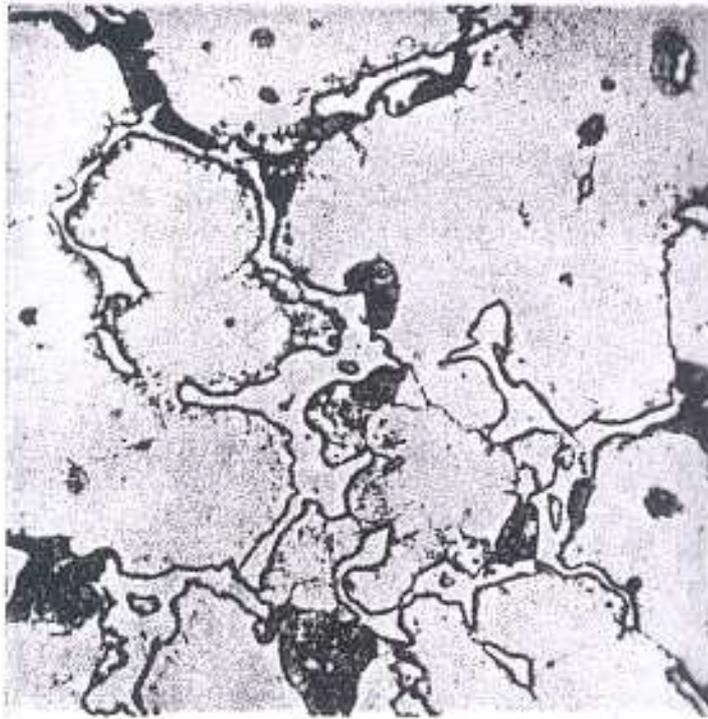


fig. 1 - Diagramma di stato magnesio-alluminio, secondo Raynor.

Le leggi della diffusione, se il raffreddamento sarà sufficientemente lento, renderanno però le concentrazioni in Al omogenee all'intorno della massa solida mentre i bordi dei grani risulteranno più visibili del resto della lega.

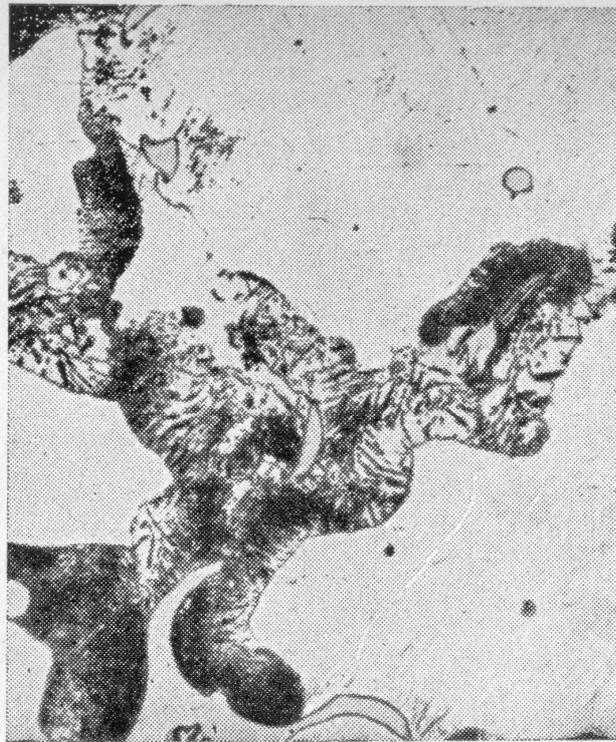
Procedendo ulteriormente nel raffreddamento la soluzione solida così ottenuta arriverà ad incontrare la linea BD che rappresenta il massimo della solubilità dell'Al nel Mg alle varie temperature. Ad ogni ulteriore raffreddamento la soluzione solida diventerà soprassatura ed espellerà dell'alluminio sotto forma di  $Al_{12}Mg_{17}$  seguendo la legge della curva BD. La nuova fase così generata tenderà a migrare verso i bordi dei grani ed a coagulare sotto forma di cristalli e di lamelle (vedi fig.2 e fig. 3).

Sia la genesi, sia la forma nella quale si presenta al microscopio questa struttura le hanno per analogia, guadagnato il nome di "struttura eutettoide" anche se evidentemente tale nome le è improprio.



250x

Fig. 2 - Campione di lega Atesia P colato in sabbia; grezzo di colata. Attacco: acido acetico al 2%.



200x

Fig. 3 - Micrografia della lega Atesia T colata in sabbia

A raffreddamento ultimato in condizioni di equilibrio stabile avremo quindi dei cristalli di Mg contenenti in soluzione concentrazioni massime di 2.1% di Al, e cristalli di  $Al_{12}Mg_{17}$  disposti ai bordi dei primi.

Si è già detto come in pratica solo le leghe con più del 6% di alluminio danno origine a cristalli di  $Al_{12}Mg_{17}$  lungo la linea BD e come quindi solo queste possono presentare interesse per i trattamenti termici. Si è anzi per molto tempo creduto che la solubilità dell'Al nel Mg a temperatura ambiente fosse del 6% anziché del 2.1%.

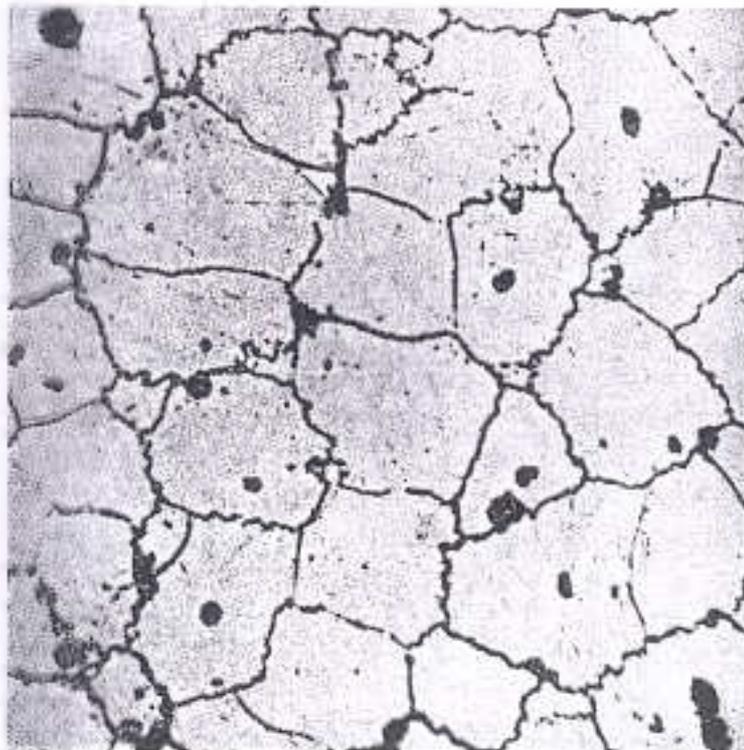
I cristalli di  $Al_{12}Mg_{17}$  influiscono negativamente sulla duttilità della lega per cui è necessario mandarli in soluzione con un opportuno trattamento termico (solubilizzazione) se si vogliono ottenere caratteristiche simili a quelle delle leghe con tenori di Al inferiori al 6%.

Al raffreddamento in condizioni di equilibrio fin qui esaminato si avvicina al raffreddamento dei getti colati in sabbia, mentre in genere un raffreddamento all'aria è sufficiente per generare strutture di equilibrio instabile. In questo caso infatti quando la lega nel suo raffreddamento incontra la linea BD non ha il tempo per espellere e coagulare l'Al in eccesso, per cui questo resta in soluzione nel Mg che diventa così soprassatura.

A temperatura ambiente la mobilità atomica è così bassa che tale soluzione non può modificarsi, e proprio in quanto soluzione solida possiede caratteristiche di tenacità e malleabilità molto elevate, e durezza molto bassa.

Esaminiamo ora il comportamento della lega ad un successivo riscaldamento.

Nel caso della lega raffreddata secondo l'equilibrio si verifica una progressiva solubilizzazione dell'Al precipitato che seguirà la legge della curva B D fino a raggiungere la temperatura alla quale l'Al si sarà tutto risolto (nel caso della lega al 0.7% di Al, circa 350°C). A questo punto se si effettuerà un raffreddamento rapido, anche all'aria si otterrà una soluzione solida soprassatura a temperatura ambiente (vedi fig.4).



× 250

Fig. 4 - Campione di lega Atesia P colato in sabbia; omogeneizzato.  
Attacco: acido acetico al 2%. STATO T4 (TN)

Nel caso di una lega raffreddata secondo l'equilibrio instabile ad un successivo riscaldamento già fin dalle basse temperature (120°C) l'alluminio che si trova in soluzione soprassatura precipita sottoforma di  $Mg_{17}Al_{12}$  dando origine a nuclei cristallini che inserendosi nel reticolo cristallino esagonale del Mg lo deformano in modo irreversibile.

Con l'aumento della temperatura e del tempo di permanenza, i nuclei cristallini di  $Mg_{17}Al_{12}$  tendono ad ingrossarsi ed a diventare dei veri e propri cristalli che perdono la coerenza reticolare con la matrice dalla quale si sono originati e quindi la liberano dalle tensioni che aveva accumulato al suo interno.

Ad un ulteriore incremento di temperatura comincerà a farsi sensibile il fenomeno di dissoluzione del precipitato  $Mg_{17}Al_{12}$  nel Mg secondo le leggi della curva DB.

In termini di caratteristiche meccaniche avremo quindi dapprima un sensibile aumento del limite allo snervamento della resistenza e della durezza accompagnato da un calo dell'allungamento, fino ad un limite oltre il quale, per l'ingrossamento dei nuclei precipitati, questi valori tenderanno a ritornare ai livelli originari.

Si è già detto come il raffreddamento dei getti colati in sabbia si avvicini alle condizioni di raffreddamento di equilibrio stabile, mentre il raffreddamento all'aria genera condizioni di equilibrio metastabile, anche se è evidente che i casi limite teorici siano ben lontani da queste condizioni. Va tuttavia notato come in pratica quasi sempre le strutture saranno di tipo intermedio e come possano variare anche nello stesso pezzo a seconda degli spessori e a seconda degli strati più o meno superficiali che si considerano.

### Leghe Mg – Zn – Zr

In queste leghe la concentrazione nominale dello Zn è del 4.5%.

Tenori elevati di Zn determinano un aumento del limite di snervamento ed una diminuzione dell'allungamento.

Le leghe Mg – Zn senza aggiunte di Zr presentano fragilità a caldo per cui nel raffreddamento di solidificazione si criccano facilmente.

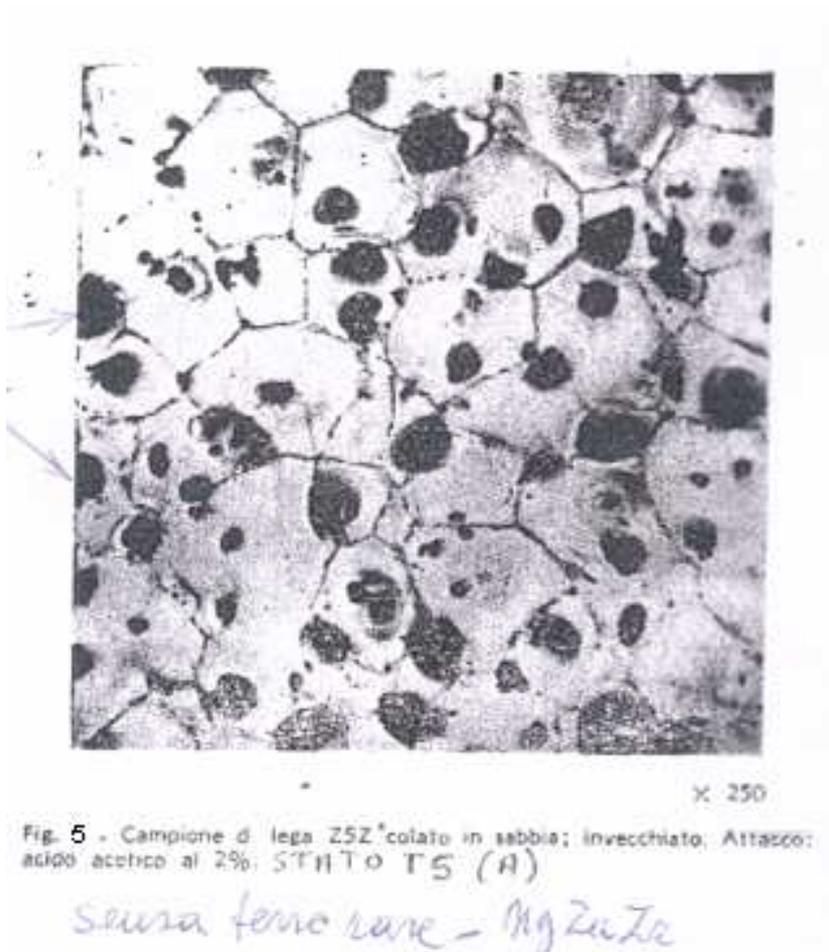
Lo Zr è presente in concentrazioni che vanno da 0.4% a 1%, e determina in queste leghe delle caratteristiche meccaniche superiori alle leghe Mg – Al – Zn. Questo miglioramento è dovuto all'effetto affinante dello zirconio che si esplica con la precipitazione di piccoli nuclei di tale metallo durante la solidificazione della lega. Tali nuclei funzionano da germi di cristallizzazione e si ritrovano infatti al centro dei cristalli della lega solidificata. Ai bordi dei grani si osservano, quando il contenuto di Zn è ai limiti superiori, delle zone più sane dovute alla precipitazione di una fase ricca di zinco (vedi fig.5).

Il diagramma di stato Mg – Zr, lato Mg, serve a dare una interpretazione corretta del fenomeno di affinamento del grano e dell'aumento delle caratteristiche meccaniche della lega sottoposta ad invecchiamento a 170 / 180°C.

Prendiamo in considerazione, per semplicità, una lega contenente 6% di Zr. Durante il raffreddamento di solidificazione tale lega incontrerà la linea AB che segna l'inizio della separazione dello zirconio dal liquido sottoforma di piccoli nuclei.

Il liquido si impoverirà di Zr con l'abbassarsi della temperatura se quando la linea AB è giunto alla temperatura di solidificazione (~ 650°C) cristallizzerà mantenendo in soluzione solida circa lo 0.5% di Zr.

Sempre proseguendo il raffreddamento in condizioni di equilibrio stabile, giunti alla temperatura di circa 400°C la solubilità dello Zr nel Mg comincerà a diminuire secondo la linea CD, per cui parte dello Zr precipiterà in grani molto fini. A temperatura ambiente avremo quindi una soluzione solida di Zr in Mg con concentrazione in Zr di circa 0.2%, e una fase costituita da cristalli più o meno grandi a seconda della temperatura di formazione, di Zr.



È chiaro che nelle condizioni di normale raffreddamento della lega non si raggiungeranno le condizioni di equilibrio stabile per cui a temperatura ambiente ritroveremo normalmente una soluzione solida soprassatura di Zr in Mg perché la velocità di raffreddamento troppo elevata ne impedisce la precipitazione secondo la legge della curva DC.

Come già esaminato per le leghe di Mg – Al, ad un successivo riscaldamento della lega la soluzione solida soprassatura tende a far precipitare il soluto è già a temperatura di 170°C si compie il fenomeno di “invecchiamento”, per cui alla formazione di nuclei cristallini di Zr corrisponde un aumento delle caratteristiche meccaniche di resistenza e limite allo snervamento.

Anche se in pratica raramente viene applicato, è possibile effettuare un trattamento di tempra di solubilizzazione riscaldando dapprima la lega ad una temperatura superiore al punto di solubilità della lega determinato dalla linea CD, mantenendola a tale temperatura il tempo necessario perché lo Zr entri in soluzione, è facendole seguire un raffreddamento all’aria che è in genere ritenuto sufficientemente veloce per mantenere in soluzione tutto lo Zr. La temperatura di riscaldamento sarà la più alta possibile, compatibilmente con la temperatura di inizio fusione, per diminuire il tempo di permanenza per la solubilizzazione dello Zr.

#### Leghe Mg – Zn – Zr – terre rare

In queste leghe con terre rare la concentrazione nominale dello Zn deve essere inferiore al 4% mentre per quelle senza terre rare lo Zn si aggira sul 4.5%.

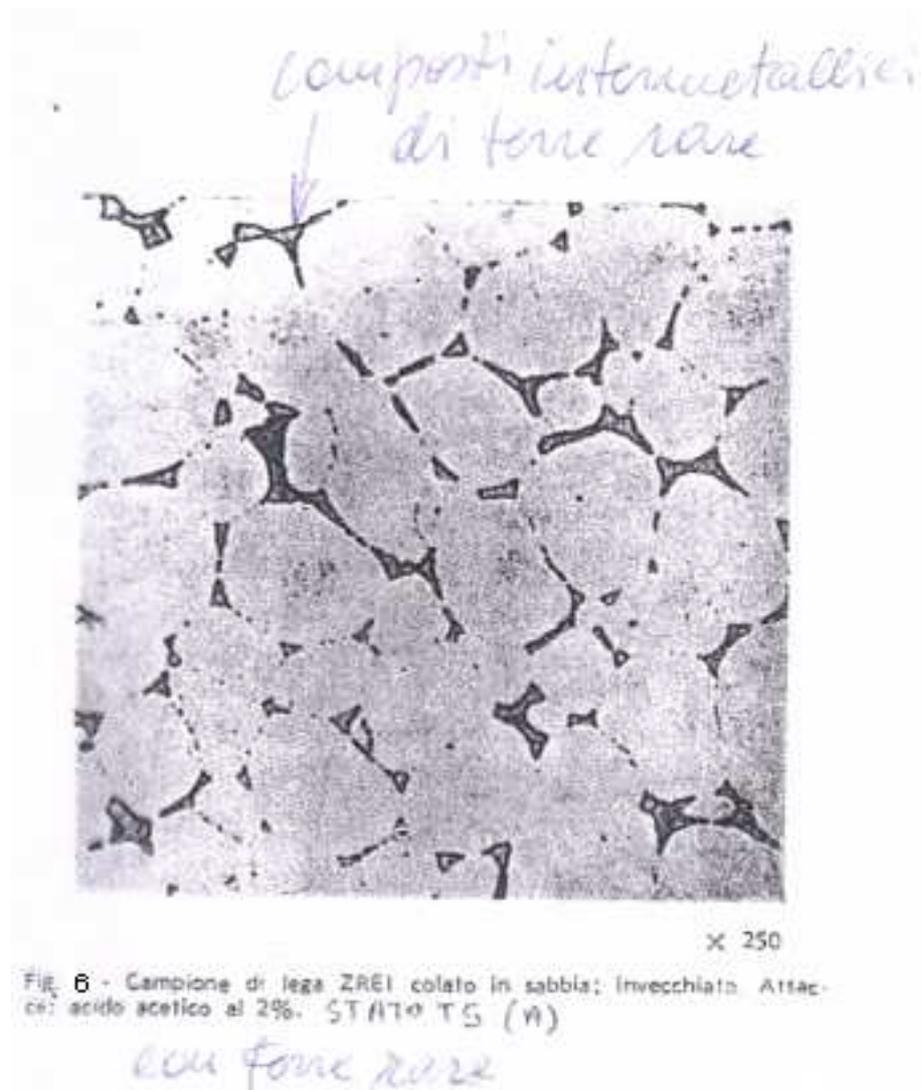
Anche in questo caso lo Zn in tenori elevati migliora il limite allo snervamento ma diminuisce l’allungamento e il carico di ricottura. Le terre rare sono presenti in tenori che vanno dall’1% al

4% ed aumentano la resistenza allo scorrimento a caldo. Tale fenomeno è ancor più accentuato dalla presenza di Torio anch'esso in concentrazioni che vanno dall'1% al 4%.

L'aumento della resistenza allo scorrimento a caldo è determinato dalla precipitazione, durante l'invecchiamento a 200°C, di composti intermetallici fra il magnesio e gli elementi delle terre rare o torio (quali ad esempio il composto  $Mg_9Ce$ ) ai bordi dei grani cristallini. Questi composti finemente dispersi con alto punto di fusione intralciano, anche ad alta temperatura, le dislocazioni, del reticolo cristallino del Mg sottoposto a sollecitazioni meccaniche. Ne deriva la diminuzione della velocità di scorrimento a caldo della lega.

Difficilmente queste leghe vengono sottoposte a tempra di solubilizzazione; generalmente il raffreddamento di solidificazione è sufficientemente veloce da mantenere in soluzione solida soprassatura i composti intermetallici che precipiteranno poi al successivo invecchiamento. L'invecchiamento in questo caso porta benefici quasi esclusivamente alla resistenza a caldo, mentre ben poca influenza ha sulla resistenza a trazione.

La microstruttura delle leghe con terre rare non mostra più con evidenza le particelle Zr, mentre ai bordi dei grani, anche prima del trattamento di invecchiamento, si notano composti intermetallici ricchi di terre rare (vedi fig.6).



## 10) Influenza degli elementi sulle leghe di Mg

Oltre agli elementi base che entrano a far parte in modo caratterizzante nelle leghe di Mg e dei quali sono state parte in risalto le influenze nelle pagine precedenti, possono essere presenti nelle stesse leghe, altri elementi che ne entrano a far parte sia perché portativi dalle impurezze presenti nelle materie prime, sia perché volutamente aggiunti per ottenere proprietà peculiari. Qui di seguito si accennerà brevemente alle influenze, positive o deteriori, che tali elementi esercitano sulla qualità delle leghe del Mg.

### Manganese

Il manganese è solubile nel magnesio fino ad un massimo del 3.4% alla temperatura eutettica di 645°C. A temperatura ambiente la solubilità è praticamente nulla, ma anche nelle condizioni più lente di raffreddamento (getti in sabbia) l'equilibrio non si raggiunge per cui il magnesio resta normalmente quasi tutto in soluzione soprassatura.

Una piccola parte si separa sotto forma di piccoli cristalli tondeggianti.

È già stato detto che il magnesio migliora la resistenza alla corrosione. Esercita inoltre un'influenza favorevole sulla diminuzione del tenore in ferro.

La resistenza alla corrosione si esplica con la formazione di una pellicola bruna costituita da idrossido di Mg e di Mn non più ulteriormente attaccabile, che si riforma rapidamente se viene meccanicamente asportata. Il massimo potere di passivazione viene ottenuto con tenori di Mn dell'ordine di 1.8% – 2.0%, ed è appunto con tale concentrazione che si fabbrica una lega Mg – Mn particolarmente adatta alla fabbricazione di lamiere e profilati saldabili, resistenti alla corrosione.

Nelle leghe contenenti zinco ed alluminio la massima quantità di Mn suscettibile di entrare nella lega è decisamente meno importante: tali leghe ne contengono in pratica 0.3% ÷ 0.5%.

### Rame

Il rame migliora la conducibilità termica, ma dal punto di vista della corrosione è uno degli elementi più dannosi. Si aggiunge quindi alle leghe destinate a parti interne di motori sottoposti a riscaldamento, ma contemporaneamente protette da un costante velo d'olio.

### Silicio

Il silicio diminuisce il coefficiente di dilatazione per cui entra a far parte delle leghe per pistoni di motori a scoppio, ma aumenta la fragilità e diminuisce la resistenza alla corrosione.

### Argento

Genera, al pari delle terre rare, soluzioni solide soprassature nel magnesio, che se opportunamente invecchiate creano per precipitazione notevoli indurimenti ed alti limiti di snervamento. Tali proprietà si mantengono anche ad alte temperature.

### Titanio-Cobalto

Agiscono come l'argento, ma il cobalto ha una azione dannosa nei confronti della corrosione.

### Alluminio

Aumenta le proprietà meccaniche che la fluidità allo stato fuso.

### Zinco

Migliora la duttilità.

## 11) Grano cristallino e proprietà meccaniche

È ben nota l'influenza del grano cristallino sulle caratteristiche meccaniche delle leghe.

Le leghe di magnesio, che possiedono un reticolo cristallino esagonale con tre soli piani di scorrimento, sono ancora più sensibili a questo effetto di quelle con elementi base che cristallizzano in sistemi con un numero molto più elevato di piani di scorrimento (es. cubico facce centrate).

Nel caso del Mg non è possibile affinare il grano cristallino come invece si effettua per l'acciaio, sottoponendolo a dei trattamenti termici. Le cause sono ancora quelle già descritte a proposito delle leghe di alluminio.

L'affinamento del grano può quindi avvenire solo secondo due procedimenti che agiscono l'uno sulla lega fusa prima della solidificazione, l'altro sulla lega solida con trattamenti termomeccanici (fucinatura, laminazione, estrusione).

È possibile ottenere leghe solide con grano cristallino molto fine agendo secondo vari processi sulla lega fusa. Il più antico consiste nel sottoporre ad un surriscaldamento fino a  $850 \div 900^{\circ}\text{C}$  la lega fusa e raffreddandola poi rapidamente fino alla temperatura di colata. Il meccanismo che presiede a questo miglioramento non è ancora ben chiaro anche se si è propensi a credere che in tale intervallo di temperatura si formino dei composti intermetallici che agiscono durante il raffreddamento come germi di cristallizzazione. Questa teoria potrebbe anche spiegare l'effetto di alcune sostanze, solo recentemente introdotte nella tecnica fusoria, che senza alcun bisogno di surriscaldamento generano un affinamento del grano cristallino ancora più efficace. Si tratta dell'esacloroetano e dell'esaclorobenzolo che oltre all'azione affinante esercitano anche, per lo sviluppo di cloro che generano per pirolisi, una energica azione di degassaggio. Si ottengono così due effetti che migliorano entrambe le caratteristiche meccaniche della lega. Anche i gas infatti creando delle microporosità e delle tensioni degradano le caratteristiche meccaniche della lega.

L'affinamento del grano e il degassaggio si possono anche ottenere separatamente con processi diversi: il degassaggio si può ottenere con flussi particolari o con cloro gassoso; l'affinamento con carbonio o con tetracloruro di carbonio.

L'influenza del grano cristallino sulle caratteristiche meccaniche è dimostrata dalla tabella sotto riportata nella quale sono messe a confronto due leghe di ATESIA T dopo trattamento di omogeneizzazione.

Dimensioni medie del grano in mm	Carico di rottura Kg/mm <sup>2</sup>	Allungamento %
0.076	28.6	10.6
0.635	21.9	4.5

L'affinamento del grano con trattamenti termomeccanici è riservato alle leghe che si prestano alle lavorazioni plastiche. E' necessario anzitutto premettere che il Mg e le sue leghe sono deformabili solo a caldo, è opportuno che permettano una continua ricristallizzazione del pezzo durante la deformazione.

Avviene così che la deformazione dei cristalli non avviene solo in direzioni preferenziali come avverrebbe per rapide sollecitazioni, ma si esercita in tutte le direzioni possibili di deformazione del cristallo evitando in tal modo tensioni che possono portare a cricche e fenditure.

Le lavorazioni plastiche avvengono a temperature dell'ordine di 320° – 400°C a seconda del tipo di lega e in tutti i casi sia gli stampi che le matrici devono essere portati alla stessa temperatura della lega da lavorare.

## 12) Trattamenti termici

Le leghe di magnesio con tenori di alluminio superiori al 6%, e quelle contenenti zirconio e terre rare possono essere assoggettate a cicli termici per il miglioramento di alcune loro caratteristiche meccaniche. Le altre leghe possono essere sotto poste a trattamenti di detensione o stabilizzazione per l'eliminazione di tensioni interne dovute al raffreddamento dei getti o alle lavorazioni meccaniche. Come già detto a proposito delle leghe di Mg, i trattamenti termici in tre grandi categorie:

### Trattamenti di ricottura

Hanno lo scopo di riportare la struttura del materiale in condizione di equilibrio stabile.

In questo trattamento si agisce sui parametri temperatura – tempo in modo da ottenere le migliori condizioni finali per cui si opera si parlerà quindi di:

1. ricottura di omogeneizzazione, quando si tendono a creare le condizioni di equilibrio chimico – fisico della lega, con la dissoluzione delle liquazioni e segregazioni delle strutture primarie di solidificazione e con la separazione e la fine dispersione delle varie fasi.
2. Ricottura di ricristallizzazione quando si vuole recuperare la struttura incrudita della lega in seguito a lavorazione plastica.
3. Ricottura di distensione quando si vogliono eliminare le tensioni di solidificazione e di lavorazioni meccaniche.
4. Ricottura di stabilizzazione dimensionale per quei pezzi che devono lavorare a temperature elevate e si vogliono evitare variazioni dimensionali già fin dal primo riscaldamento.

### Trattamento di tempra di soluzione

Consiste in un riscaldamento della lega a temperatura tale da mandare in soluzione nel Mg le altre fasi e successivamente nel raffreddare rapidamente (temprare) la soluzione così ottenuta in modo da mantenerla sia pure in condizioni di metastabilità, a temperatura ambiente.

La tempra di soluzione, nella pratica industriale è il processo di più larga applicazione per le leghe Mg – Al – Zn, mentre viene raramente applicata alle leghe Mg – Zn – Zr.

Nel caso delle leghe del Mg si tende a parlare di omogeneizzazione anche quando si tratta di tempra di soluzione estendendo il concetto che esprime il termine. In effetti per correttezza si dovrebbe parlare in questo caso di omogeneizzazione solubilizzante. La sovrapposizione dei termini può essere dovuta alle particolari modalità del raffreddamento di tempra delle leghe al Mg che è generalmente effettuato all'aria. Raramente il raffreddamento di tempra avviene nell'acqua come per le leghe di alluminio, per cui una ricottura di omogeneizzazione con raffreddamento all'aria diventa in pratica una tempra di soluzione.

### Invecchiamento

Per invecchiamento si intende un riscaldamento della lega da (170°C fino a 315°C) che ha lo scopo di far precipitare dalle soluzioni solide microscopiche gli elementi o i composti disciolti soprassature sottoforma di particelle. Nel caso delle leghe di Mg l'invecchiamento può essere successivo alla tempra di soluzione, oppure, particolarmente nel caso delle leghe Mg – Zn – Zr, può essere effettuato direttamente dopo il raffreddamento di solidificazione.

Le leghe di Mg non subiscono un invecchiamento naturale come alcune leghe di alluminio, per cui questa trasformazione avverrà esclusivamente in forno a temperature stabilite.

### Ricottura di omogeneizzazione

La ricottura di omogeneizzazione viene eseguita portando la lega alle massime temperature consentite, prossime alla linea solidus, per tempi generalmente lunghi, comunque tali di portare in soluzione nel Mg le fasi precipitate, rendere omogenea la soluzione solida, e globulizzare eventuali impurezze insolubili. A questa permanenza dovrà seguire un raffreddamento lento tale da non creare tensioni e soluzioni soprassature.

Il risultato della ricottura di omogeneizzazione dovrà quindi essere una lega in equilibrio stabile, priva di tensioni con microstruttura costituita da soluzione solida omogenea, priva di liquazioni e segregazioni interdendritiche, nella quale sono finemente e uniformemente distribuite le fasi riprecipitate durante il raffreddamento lento (vedi fig.7).

Si è già accennato come il trattamento di omogeneizzazione tenda per le leghe di Mg ad essere assimilabile al trattamento di tempra di soluzione per cui nella pratica industriale sui getti si eseguirà sempre la tempra di soluzione, mentre per le leghe di lavorazione plastica il trattamento di omogeneizzazione assume un significato diverso, in funzione della loro deformabilità che può avvenire esclusivamente a caldo, rispetto alle leghe di alluminio.

Nel caso delle leghe di alluminio infatti il trattamento di omogeneizzazione che avviene a temperature molto più alte di quelle normali di lavorazione plastica a caldo, ha la funzione di preparare la lega al fine di ottenere un miglioramento della plasticità, dell'aspetto superficiale ed un aumento delle caratteristiche meccaniche. Nel caso delle leghe di Mg la lavorazione plastica avviene a temperature relativamente più alte e con basse velocità di deformazione per cui è meno sensibile l'effetto migliorante della omogeneizzazione, mentre non è evidentemente possibile prenderlo in considerazione nel caso della lavorazione a freddo.

Anche agli effetti della corrodibilità la struttura omogeneizzata, pur presentando alcuni vantaggi su quella grezza, non è ancora tale da garantire i risultati della struttura di tempra di soluzione; solo quest'ultima infatti, garantendo una perfetta omogeneità della lega, dà la sicurezza della assenza di pile e quindi di corrosione elettrochimica. Concludendo si può affermare che nel caso delle leghe di magnesio non è di grande interesse il trattamento di omogeneizzazione inteso nel senso corretto del termine.

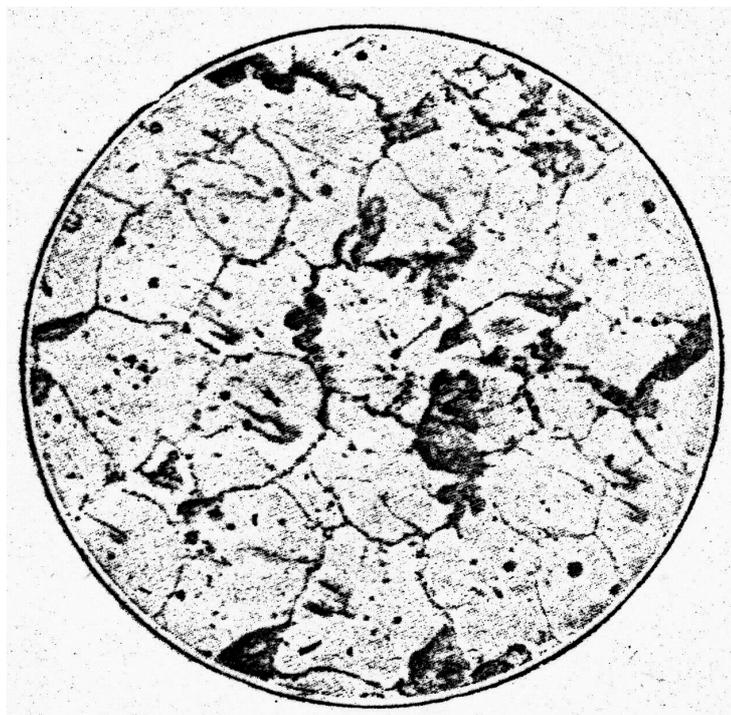


Fig.7 – Ricottura di omogeneizzazione.

#### Ricottura di ricristallizzazione

Non essendo possibile deformare a freddo le leghe di magnesio, se non entro limiti assai ristretti di deformazione, è evidente come sia di scarsa applicazione pratica il trattamento di ricristallizzazione.

A titolo orientativo si può dire ad esempio che per la lega ATESIA E il raggio di curvatura a freddo sopportabile senza formazione di cricche, varia da 5 a 10 volte lo spessore della lamiera. Per i tubi con rapporto diametro esterno "D" e spessore "E"  $\cong 8$ , il raggio di curvatura minimo è circa 5 D.

Quasi sempre quindi le deformazioni plastiche saranno effettuate a caldo a temperature tali da garantire una rapida ricristallizzazione, in modo da permettere un ripristino immediato del reticolo cristallino che si frantuma sotto l'effetto della deformazione.

Le temperature di ricristallizzazione possono quindi identificarsi con le temperature di stampaggio a caldo secondo la seguente tabella:

ATESIA L M	360° - 400°C
ATESIA E	340° - 380°C
ATESIA L	330° - 380°C
ATESIA C	320° - 360°C.

### Ricottura di distensione

Riguarda soprattutto i getti di fonderia quando hanno dimensioni notevoli, spessori diversi e soprattutto forme complicate per cui durante il raffreddamento di solidificazione che avverrà a velocità diverse, saranno soggetti a tensioni di ritiro. Tali tensioni, comunque dannose, diventano compromettenti l'utilizzazione del pezzo quando questo debba essere lavorato meccanicamente con strette tolleranze dimensionali. È necessario in questo caso sottoporre i pezzi a un trattamento di distensione consistente in un riscaldamento da 200°C a 300°C per durate molto lunghe, comunque non inferiori a 16 ore per le temperature più basse. È preferibile effettuare il trattamento dopo una prima lavorazione di soprassatura che oltre a liberare probabili altre tensioni, tende a crearne essa stessa di nuove soprattutto quando si tratta di asportazioni notevoli di materia.

### Ricottura di stabilizzazione

È un processo che ha come scopo l'ottenimento di una dimensione non più variabile in pezzi che dovranno lavorare a temperature più alte di quella ambiente (es. pistoni di motori a scoppio). Si tratta quindi essenzialmente di portare i pezzi a temperatura di qualche grado superiore a quella di esercizio, per durate sufficienti affinché tutte le trasformazioni strutturali e le coazioni fisiche assumono una condizioni di equilibrio.

Nel caso delle leghe da bonifica la stabilizzazione può coincidere con il trattamento di invecchiamento se la temperatura di utilizzo è inferiore a questa, altrimenti si può arrivare a temperature superiori a scapito naturalmente di alcune caratteristiche meccaniche. D'altronde la diminuzione delle caratteristiche meccaniche si avrebbe comunque durante l'esercizio dei pezzi, per cui il trattamento conserva ancora tutti i vantaggi che con esso ci si propone. Analoghe considerazioni valgono per le leghe Mg – Zn – Zr con terre rare che sono generalmente sottoposte al solo trattamento di invecchiamento e che sono particolarmente adatte per impieghi ad alte temperature.

### Tempra di soluzione

Per l'esatta interpretazione di questo processo è necessario rifarsi ai diagrammi di stato relativi ai due grandi gruppi di leghe del Mg.

Per le leghe Mg – Al è già stato detto come la temperatura di soluzione interessi solo le leghe con tenori di Al > 6%, in quanto la precipitazione dell'alluminio per soprassaturazione da una soluzione solida che lo contenga in concentrazioni minori ha tempi lunghissimi. È solo con l'impiego dei raggi X nell'analisi cristallografica delle leghe che si è potuto rettificare il diagramma di stato delle leghe Mg – Al.

L'esecuzione della tempra di soluzione richiede innanzi tutto la massima solubilizzazione delle fasi e delle impurità presenti nella lega grezza di fusione o di deformazione plastica. A tale scopo è necessario raggiungere una temperatura che si trovi al di sopra della linea BD nel punto della concentrazione di alluminio considerata. I tempi di permanenza per una buona solubilizzazione saranno funzione delle temperature raggiunte, per cui si tenderà sempre ad operare alle massime temperature compatibili con la necessità di evitare il pericolo delle deformazioni fusioni del reticolo eutettico. A titolo di esempio si possono citare le permanenze necessarie per la lega ATESIA T al fine di ottenere una buona solubilizzazione:

- riscaldamento a 380°C permanenza 72 ore;
- riscaldamento a 410°C permanenza 24 ore.

Risulta quindi evidente come nella pratica industriale si tenderà sempre a lavorare, per ragioni di economia, a temperature assai prossime alla fusione dell'eutettico. Questa condotta comporta una serie di cautele e di rischi. L'avvicinamento alla temperatura di riscaldamento si effettuerà gradualmente al fine di avere una perfetta omogeneità della temperatura all'interno della carica per evitare oscillazioni, sia pur lievi, dovute all'inerzia termica del forno, anche se collegate a strumenti precisi e sensibili, tendono a misurare la media delle temperature fra le resistenze, l'esterno e l'interno della carica, per cui è facile che ad esse ottengono eventuali sovratemperature all'esterno della carica quando l'interno è ancora relativamente freddo. Queste note hanno valore naturalmente solo per questi casi, in cui oscillazioni anche minime possono compromettere la riuscita del trattamento.

Per evitare spiacevoli sorprese si procede allora per tappe nel riscaldamento, con soste più o meno lunghe per permettere l'omogeneizzazione della temperatura.

Il trattamento della lega GA9 a 410°C sarà allora effettuato, in pratica, come segue:

- 8 ore di permanenza a 390°C;
- 10 ore di permanenza a 400°C;
- 6 ore di permanenza a 410°C.

L'operare a temperature assai prossime al limite inferiore di fusione comporta degli inconvenienti. Il più deleterio è la possibilità di "bruciare" il materiale con la perdita irreversibile del medesimo.

Qualora si superino anche di pochi gradi, le temperature stabilite gli eutettici fondono, tendono ad fuoriuscire attraverso la rete di cavalletti che essi rappresentano all'interno della lega e a contatto con l'ossigeno dell'aria si ossidano. L'aspetto della lega in questo caso diventa caratteristico: numerose goccioline appaiono alla superficie del pezzo che assume un colore scuro e frequentemente compaiono piccole fessurazioni a forma di ragnatela.

Il secondo inconveniente che si manifesta quando si opera a temperature prossime al punto di fusione è la necessità di lavorare in atmosfera non ossidante per evitare fenomeni di ossidazione superficiale notevoli. Infatti per temperature superiori a 400°C, la lega si ossida rapidamente all'aria, e questa ossidazione tende a penetrare all'interno della lega assai profondamente alterando le caratteristiche meccaniche dei pezzi. La protezione quindi se non è ad esempio essenziale nel caso del trattamento della lega già citata GA9 alla temperatura di 380°C per durate di 72 ore, diventa imperativa quando la omogeneizzazione della lega avviene a 410°C. Quali mezzi protettivi si usano comunemente i gas SO<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>, che devono essere perfettamente secchi per evitare reazioni dell'acqua con la lega. L'anidride solforosa è da preferire essendo inerte rispetto al Mg fino a temperature di 700°C mentre l'anidride carbonica tende già a 350° ÷ 400°C a provocare la formazione superficiale di una pellicola di carburi di Mg. La concentrazione della SO<sub>2</sub> necessaria nell'atmosfera del forno per una buona protezione della carica e dell'ordine del 2% circa, mentre quella della CO<sub>2</sub> è del 10% circa.

Tali concentrazioni possono variare a seconda della carica da trattare e del tipo di forno a disposizione. Entrambe i gas possono essere introdotti nel forno decomprimendoli da bombole del commercio, ed in questo caso deve essere prevista una circolazione dei gas in entrata e uscita dal forno per il ricambio della atmosfera con relativo controllo della concentrazione; oppure la SO<sub>2</sub> può essere prodotta all'interno del forno stesso caricando con la lega da trattare della pirite o dello zolfo puro in ragione di circa 5 – 10 Kg di pirite in m.c. di capacità del forno, oppure di 2.5 Kg di pirite per 100 Kg di pezzi caricati.

Nel caso dello zolfo si caricano circa 7 Kg di zolfo per ogni 100 Kg di materiale; lo zolfo in eccesso non brucia e lo si ritrova allo stato liquido nel recipiente di ferro che lo contiene.

Particolarmente nel caso della combustione interna della pirite o dello zolfo è necessaria una perfetta tenuta dell'atmosfera da parte del forno per evitare fughe che oltre danneggiare la carica costituirebbero pericolosi inquinamenti dell'ambiente di lavoro.

Il gas CO<sub>2</sub> è impiegato quasi esclusivamente in quei casi in cui le resistenze elettriche del forno non sono di composizione tale da sopportare la SO<sub>2</sub>.

Ottenuta con tutte le cautele e le osservazioni esposte, la solubilizzazione più o meno spinta delle fasi nel Mg e la globulizzazione di eventuali fasi insolubili, è necessario portare tale struttura a temperatura ambiente con l'operazione di tempra. Nel caso delle leghe del Mg è già stato detto come in genere il raffreddamento all'aria sia sufficiente a garantire una buona struttura di tempra, anche se a volte per getti massivi non è da escludere un raffreddamento in acqua calda tenuta alla temperatura di 80°C circa. Anche nel caso di getti massivi è però generalmente sufficiente effettuare il raffreddamento in aria soffiata. Una buona tempra di soluzione, chiamata anche impropriamente omogeneizzazione, ha da un punto di vista pratico notevole importanza: aumentano infatti notevolmente alcune caratteristiche meccaniche della lega quali la resistenza a trazione e l'allungamento ed in alcune leghe aumenta notevolmente il limite di fatica per cui a tale trattamento verranno sottoposte le leghe soggette a forti vibrazioni ed a funzioni alterne come i blocchi motori.

Restano invece pressoché invariati i valori della durezza e dello snervamento.

E' già stato detto come raramente le leghe Mg – Zn – Zr vengono sottoposte al trattamento di tempra di soluzione, resta comunque evidente come anche per queste leghe sia necessario ottemperare a tutte le precauzioni che sono state elencate.

### Invecchiamento

Le leghe di Mg non sono soggette ad invecchiamento naturale come avviene invece per alcune leghe di alluminio.

Mentre questo trattamento viene normalmente praticato senza la preventiva tempra di soluzione alle leghe Mg – Zn – Zr, alle leghe Mg – Zn – Zr viene quasi sempre applicato solo dopo la tempra di soluzione.

Il fenomeno dell'invecchiamento, già analizzato dal punto di vista strutturale inizia a temperatura molto bassa. Anche se occorrono tempi molto lunghi, già a 120°C si può ottenere la precipitazione delle fasi instabili con il relativo indurimento della lega, mentre a temperature più alte il fenomeno avverrà in tempi più corti.

Bisogna tener presente però che per permanenze molto lunghe a temperature alte le caratteristiche meccaniche privilegiate dell'invecchiamento tenderanno a deteriorarsi.

Esistono quindi temperature e permanenze da rispettare scrupolosamente.

Il raffreddamento dalla temperatura di invecchiamento non ha molta importanza, è comunque preferibile non effettuarlo in forno per evitare prolungamenti di permanenza dovuti all'inerzia termica del forno.

L'invecchiamento produce più alti valori del limite di snervamento mentre la resistenza non cambia o aumenta solo leggermente. L'allungamento diminuirà rapidamente tanto da arrivare a volte a valori inferiori a quelli del grezzo.

### 13) Controllo del trattamento termico

L'ottenimento delle caratteristiche ottimali a seguito del trattamento di bonifica può essere controllato direttamente a mezzo di provette di trazione oppure indirettamente con l'esame microstrutturale della lega trattata. Nel primo caso si tratta di operare su saggi ricavati direttamente, quando sia possibile, da getti o spezzoni della lega, oppure colati a parte ma contemporaneamente e dallo stesso crogiolo dal quale si è colata la partita, e trattati contemporaneamente a questa.

Molto più semplicemente, ma anche più approssimativamente è possibile controllare la durezza Brinell di alcuni pezzi della partita che può dare per comparazione il valore delle altre caratteristiche meccaniche.

L'esame microstrutturale, anche se meno diretto nell'esplicare l'idoneità delle caratteristiche meccaniche che il trattamento ha sviluppate, dà però un quadro più completo della riuscita del trattamento e rivela immediatamente le cause di eventuali insuccessi. Non è tanto il caso del surriscaldamento o delle bruciature, già visibili dall'aspetto esteriore del pezzo, ma piuttosto della mancata permanenza o della insufficiente temperatura di solubilizzazione che sono evidenziati in questo esame.

(Vedi le micro di fig.8).

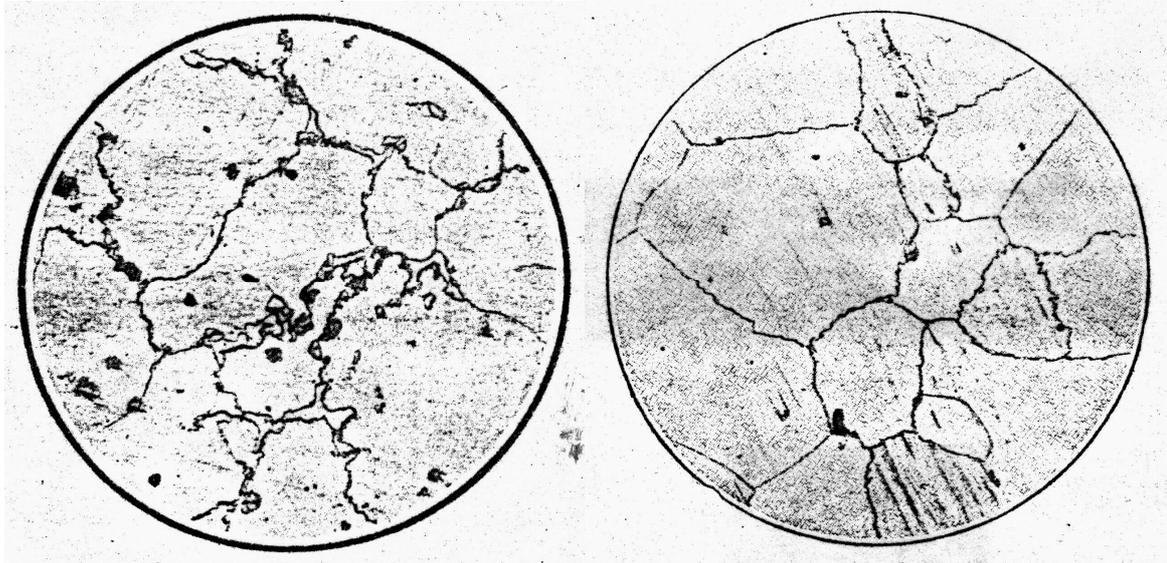


Fig.8

#### 14) Forni per trattamento termico

##### Bagni di sale

Anche nel caso delle leghe del Mg, come per le leghe di Al, i forni a bagno di sale sono quelli che dal punto di vista della precisione e soprattutto dalla omogeneità della temperatura danno maggiori garanzie di una buona riuscita del trattamento. Naturalmente anche in questo caso il costo di esercizio, le difficoltà di conduzione e la impossibilità di operare su grossi quantitativi e soprattutto su pezzi voluminosi, costituiscono grosse limitazioni al suo impiego.

La miscela dei sali è costituita da tre parti di bicromato sodico, una parte di bicromato potassico e 1 ÷ 3% di cromato di sodio. La miscela ha carattere di sicurezza mentre nei confronti del Mg per cui l'unica precauzione da adottare è di evitare l'introduzione dei pezzi di lega umidi nel bagno di sali per evitare le violente reazioni che l'acqua può provocare. Resta ancora l'inconveniente della tossicità dei vapori del bagno che devono essere allontanati ed abbattuti in appositi siti, e della rimozione dei sali che restano aderenti alla superficie dei pezzi dopo il loro raffreddamento all'aria. Anche questa rimozione, che viene effettuata a mezzo d'acqua calda, presenta l'inconveniente della necessità del recupero dei cromati dalle acque di lavaggio perché altamente inquinanti.

##### Forni a gas

Sono generalmente quindi i forni muffolati che vengono utilizzati per il trattamento termico delle leghe del Mg. I forni di questo tipo possono essere suddivisi in forni a camera o a tunnel

orizzontali, oppure in forni a pezzo. Per entrambi le caratteristiche dovranno rispondere a determinate e irrinunciabili esigenze.

Data la delicatezza del trattamento è preferibile il riscaldamento elettrico a tutti gli altri, anche se è più oneroso. Quando si tratta di forni molto grandi è conveniente suddividere il forno in zone, tutte autoregolate, alimentate con circuiti indipendenti. L'omogeneità della temperatura è ulteriormente garantita da grossi ventilatori che agitano l'atmosfera del forno e che ruotano periodicamente in senso alternato. Le resistenze dovranno essere costruite in lega adatta a sopportare l' $\text{SO}_2$ ; generalmente si adottano leghe al Ni – Cr.

Si è già detto inoltre come il forno debba essere a tenuta d'atmosfera sia per contenere la  $\text{SO}_2$  prodotta in loco per combustione di S o di pirite, sia per evitare perdite e miscele con l'aria qualora l'atmosfera venga introdotta nel forno da bombole del commercio.

Tutti i supporti e i contenitori delle leghe nel forno dovranno essere di ferro e dovrà essere impiegata la massima cura per evitare che durante le pause di lavorazione possano accumulare umidità. Ugualmente dannosi sono i rivestimenti di rame e di zinco ai contenitori, perché questi elementi a contatto col Mg possono entrare facilmente in lega alla temperatura del trattamento termico.

L'impianto pirometrico dovrà essere della massima sensibilità e precisione. I giunti freddi delle termocoppie dovranno essere tenuti a temperatura costante a mezzo di termostati. Il controllo delle termocoppie e dei pirometri dovrà essere eseguito almeno ogni 15 giorni e per ragioni di sicurezza tutta la strumentazione pirometrica dovrà essere doppia.

La precisione della temperatura all'interno della camera dovrà essere di  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

#### 15) Efficacia dei trattamenti termici

Le leghe ultraleggere trattate termicamente offrono delle caratteristiche meccaniche che possono essere tranquillamente paragonate a quelle delle leghe di alluminio.

L'efficacia del trattamento termico, anche se condotto a regola d'arte, può però essere inficiata da una serie di imperfezioni sia di carattere dimensionale che di ordine tecnologico. A proposito delle prime si può osservare come pezzi progettati con variazioni di spessori notevoli raccordate con angoli vivi, oltre a creare difficoltà in ordine alla formazione del pezzo sia con la tecnica di fonderia che con la deformazione plastica lasciano spazio notevole alle possibilità di rotture locali per concentrazioni degli sforzi. Sarà quindi necessario tener conto che, oltre ad eliminare qualsiasi angolo vivo, è preferibile adottare a volte sezioni maggiori di quelle calcolate pur di non avere diversità troppo notevoli al fine di avere una maggiore tranquillità di rispondenza del pezzo alle caratteristiche richieste. Il maggior peso derivante sarà ancor sempre di gran lunga più vantaggioso del peso che avrebbero altre leghe, e nel medesimo tempo si usufruirà di una maggiore sicurezza.

I difetti di ordine tecnologici più dannosi sono costituiti dalle microcricche e dalle porosità dovute al ritiro dei getti.

Quasi sempre questi difetti sono localizzati nei punti di maggior sforzo e, concentrazioni di sforzi che non possono essere tollerati dal pezzo.

E' necessario in questo caso agire innanzi tutto sul processo di progettazione del pezzo al fine di evitare i difetti, ed in un secondo tempo controllare con procedimenti non distruttivi l'omogeneità dei pezzi così ottenuti. Il controllo può essere effettuato sia con i mezzi tradizionali (immersione e verniciatura con "blank de Mendon" che trasudano l'olio) che con l'esame ai raggi x.

Dalle poche osservazioni elencate risulta evidente come il trattamento termico delle leghe del Mg non è l'epilogo di tutta una serie di accorgimenti adottati per ottenere da queste leghe il massimo delle caratteristiche meccaniche. E' necessario quindi che la progettazione dei pezzi

sia eseguita in funzione del trattamento termico finale, e che tutte le fasi precedenti il trattamento siano oggetto di collaudi scrupolosi prima di procedere alla sua esecuzione.

## 16) Influenza dei trattamenti termici sulla corrosione

Della teoria elettrolitica sulla corrosione è già stato detto a proposito delle leghe di alluminio e ad essa si rimanda prima di esaminare l'aspetto particolare delle leghe di Mg.

Un aspetto della corrosione è quello che riguarda l'attacco chimico che possono esercitare acidi o basi sulla lega.

La corrosione elettrochimica può manifestarsi in alcune forme tipiche:

### Corrosione di contatto

Dovuta alla sovrapposizione delle leghe del Mg con altri metalli in presenza di un elettrolita che può anche essere semplicemente costituito da umidità atmosferica. Si eviterà questo tipo di corrosione interponendo fra i due metalli un materiale isolante elettrico ed evitando il contatto del liquido con l'assemblaggio.

### Corrosione intercristallina

E' dovuta alla eterogeneità della lega per cui lungo i bordi dei grani cristallini si separano delle fasi con potenziali elettrolitici diversi dal cuore dei cristalli. Si formeranno quindi alla superficie dei pezzi, delle pile fra bordi e cuore dei grani cristallini che saranno particolarmente dannose nel caso in cui i bordi siano più elettronegativi e quindi preferenzialmente attaccati dall'elettrolita.

### Corrosione sotto tensione o trans cristallina

Riguarda soprattutto le leghe da deformazione plastica con alti tenori di zinco o di alluminio che lavorano vicino al limite elastico in presenza di umidità atmosferica.

Si manifesta sotto forma di cricche che attraverseranno i cristalli e solo raramente seguono i limiti dei grani.

La protezione dalla corrosione delle leghe del Mg può essere esplicitata con vari processi che agiscono:

- Sulla lega
- Sul mezzo che circonda la lega
- Sulla superficie che separa la lega dall'ambiente che la circonda

Dal punto di vista dei trattamenti termici ci occuperemo quindi solo degli interventi sulla lega.

Bisogna ancora sottolineare come anche in questo caso il trattamento termico non è che un intervento finale, per cui è necessario, per ottenere risultati apprezzabili, già intervenire fin dal momento dall'elaborazione della lega nel crogiolo prima della colata, sia con l'eliminazione spinta delle impurezze metalliche e non, sia con la successiva aggiunta di elementi di addizione. Nel caso della corrosione di contatto, alla quale sono particolarmente sensibili le leghe del Mg per la posizione fortemente elettronegativa, nella scala elettrochimica degli elementi, del Mg, i trattamenti termici non possono apportare alcun miglioramento.

Nel caso invece della corrosione intercristallina i trattamenti termici sono fondamentali.

Allo stato grezzo infatti le leghe sono costituite da due fasi, la soluzione solida e l'entettico per cui i relativi potenziali di carbonio di dissoluzione sono diversi. Sottoponendo al trattamento di omogeneizzazione o tempra di soluzione la lega si ottiene una fase unica con l'eliminazione dalla possibilità di corrosione intercristallina. Al successivo invecchiamento, specialmente se condotto alla temperatura più alta, l'entettico riprecipita ricreando le due fasi. In questo caso il fenomeno diventa particolarmente negativo, se per le temperature e i tempi di permanenza, la riprecipitazione avviene in forma continua lungo i bordi dei grani, creando la possibilità di una corrosione fino a cuore dei pezzi.

Un aspetto particolare presentano le leghe al manganese durante la lavorazione plastica. L'attitudine alla corrosione aumenta ad ogni passata al laminatoio in quanto il manganese primitivamente sciolto nel magnesio, precipita. Ad ogni operazione ultimata si eseguirà una ricottura ad alta temperatura che riscogliendo il Mn precipitato ripristina alla lega le sue proprietà anticorrosione.

La corrosione intercristallina dovuta ad incrudimento della lega potrà essere eliminata ovviando alla causa che la produce. Sarà necessario in questo caso sottoporre la lega ad un trattamento di distensione condotto con cura e per tempi molto lunghi.

**MAGNESIO**  
**TABELLA DEI TRATTAMENTI TERMICI E CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE LEGHE DA LAVORAZIONE**  
**PLASTICA**

DESIGNAZIONE ATESIA	DESIGNAZIONE ASTM	STATO DI FORNITURA	TRATTAMENTO TERMICO	CARATTERISTICHE MECCANICHE			
				Limite di snervamento 0,2% Kg /mm <sup>2</sup>	Carico di rottura Kg /mm <sup>2</sup>	Allungamento %	DUREZZA BRINELL
C	AZ 80 A	ESTRUSO	-	21 - 24	29 - 33	6 - 9	65 - 70
E	A Z 31 B	ESTRUSO	-	18 - 22	24 - 29	10 - 16	55 - 60
		LAMINATO RICOTTO	RICOTTURA 300°C PER 3 - 10 ORE	13 - 20	23 - 28	12 - 25	50
		LAMINATO CRUDO		20 - 25	27 - 32	4 - 20	60
L	A Z 61 A	ESTRUSO		20 - 23	27 - 32	9 - 14	62 - 65
L M	M I A	ESTRUSO		13 - 16	22 - 28	4 - 10	42 - 48
		LAMINATO		8 - 13	19 - 23	5 - 12	39 - 45
Z W 3		ESTRUSO		19 - 22	28 - 31	10	65 - 75
		LAMINATO RICOTTO		16 - 17	25 - 27	7 - 8	60 - 70
Z W 1		ESTRUSO		16 - 17	25 - 27	10	
		LAMINATO		14 - 16	23 - 25	8	
Z W 6	Z K 60 A	ESTRUSO		20	30	10	65 - 80
		ESTRUSO INVECCHIATO	INVECCHIAMENTO 180°C PER 10-16 ORE	22	31	8	65 - 80

## MAGNESIO

### TABELLA DEI TRATTAMENTI TERMICI E CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE LEGHE PER GETTI

DESIGNAZ. ATESIA	DESIGNAZ. ASTM	STATO DI FORNITURA	TEMPRA			INVECCH		CARATT. MECCANICHE			DUREZZA BRINELL
			°C TEMP	ORE A REG.	MEZZO TEMPR.	°C TEMP	ORE A REG.	Limite di snervamento 0,02 Kg / mm <sup>2</sup>	Carico di rottura Kg /mm <sup>2</sup>	Allungamento% Su 5 d	
D	AZ63A	(GS) grezza	-	-	-	-	-	7-10	16-20	3-6	58-62
		A	-	-	-	220-260	2-5	8-11	17-20	2-5	
		TN	340 370 390	2 2 8-16	ARIA ARIA ARIA	-	-	7-10	24-28	7-12	58-62
		TA	C.S.	C.S.	ARIA	175-220	6-18	11-14	24-28	3-5	58-62
T	AM80A	GS – G c grezza	-	-	-	-	-	7 - 9	16 - 20	2-6	55-60
		T N	380-390 400 415	8 12 4	ARIA ARIA ARIA	-	-	9 - 13	24 - 28	8 - 12	55-60
		T A	C.S.	C.S.	ARIA	200	10	14 - 17	24 - 28	2 - 6	75 - 90
P	AZ91C	G c grezza	-	-	-	-	-	7 - 10	14 - 17	2 - 5	55 - 70
		A	-	-	-	220	5	8 - 12	14- 20	1 - 3	
		T N	380 – 390 410 415	8 12 4	ARIA ARIA ARIA	-	-	7 - 10	24 - 28	6 - 10	55 - 70
		T A	C.S.	C.S.	ARIA	200	10	11 - 14	24 - 28	2 - 4	65 – 90
2 P	AZ92A	Gs – Gc grezza	-	-	-	-	-	7 - 10	14 - 17	2 - 5	50 - 70
		A	-	-	-	220	5	8 - 12	14 - 17	2 - 4	-
		T N	380 – 390 410 - 412	8 18	ARIA ARIA	-	-	7 - 10	24 - 28	2 - 10	50 - 70
		T A	c.s.	c.s.	ARIA	175 - 220	6 - 18	12 - 15	24 - 28	1 - 2	65 - 85
Z 5 Z	ZK51A	GS – G c grezza	-	-	-	-	-	12 - 15	20 - 25	7 - 15	

		A	-	-	-	170 - 180	10 - 16	14 - 18	24 - 28	5 - 12	65
R Z 5	Z E 41 A	GS - G c grezza	-	-	-	-	-	9 - 11	17 - 19	3 - 6	

### MAGNESIO

#### TABELLA DEI TRATTAMENTI TERMICI E CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE LEGHE PER GETTI

DESIGNAZ. ATESIA	DESIGNAZ. ASTM	STATO DI FORNITURA	TEMPRA			INVECCH		CARATT. MECCANICHE			DUREZZA BRINELL
			°C TEMP	ORE A REG.	MEZZO TEMPR.	°C TEMP	ORE A REG.	Limite di snervamento 0,02 Kg / mm <sup>2</sup>	Carico di rottura Kg /mm <sup>2</sup>	Allungamento% Su 5 d	
		A				170-180	10-16	14 - 16	20 - 23	3 - 5	70
		TA	565	18	ARIA	205	16				
Z R E 1	E Z 33 A	A	-	-	-	170-180	10-16	8 - 10	14 - 17	3 - 6	55
M C Z	E K 31	A	-	-	-	170 - 180	10 - 16	8 - 10	14 - 16	3 - 6	
T Z 6	Z H 62A	A	-	-	-	170-180	10-16	8-10	26-31	5-15	70
Z T 1	H Z 32A	A	-	-	-	315	16	16 - 19	19 - 22	5 - 10	55
M. T Z	H K 31	A	565	8-16	-	200	16	> 8,6	> 20,5	> 5	

**MAGNESIO**  
**LEGHE DA FONDERIA**  
**LEGHE Al – Zn**

SIGLA *AICMA	SIGLA AITESIA	SIGLA UNI	SIGLA ASTM	Al %	Zn%	Mn%	Zr%	Terre rare %	Th%	SIGLA ATNOR
-	<b>D</b>		AZ 63A	5,0-6,5	2.3-3.3	0.15-0.5	-	-	-	<b>G -A 623</b>
-	<b>T</b>		AM 80 A	7,5-8,5	0.3-0.8	0.15-0.5	-	-	-	<b>G -A 9</b>
-	<b>P</b>		AZ 91 C	8,5-9,5	0.3-0.8	0.15-0.5	-	-	-	<b>G-A 921</b>
-	<b>2P</b>		AZ 92 A	8,0-9,5	1.7-2.3	0.10-0.5	-	-	-	-

**LEGHE Zn – Zr**

SIGLA •AICMA	SIGLA AITESIA	SIGLA UNI	SIGLA ASTM	Al %	Zn%	Mn%	Zr%	Terre rare %	Th%
MG-C-42	<b>Z 52</b>		Z K 51 A		3.5-5.5	-	0.4-1.0	-	-
MG-C-43	<b>RZ 5</b>		Z E 41 A		3.5 - 5	-	0.4-1.0	0.75-1.75	-
MG-C-91	<b>Z R E1</b>		E Z 33 A		< 3.5	-	0.4-1.0	2.5-4	-
-	<b>Z R E 0</b>				< 0.5	-	0.4-1.0	2.5-4	-
-	<b>M C Z</b>		E K 31	-	-	-	0.4-1.0	2.5-3.5	-
MG – C-41	<b>T 26</b>		ZH 62A		1.7-2.5		0.4-1.0		1.5-2.0
MG-C-81	<b>Z T 1</b>		H 2 32A		1.7-2.5		0.4-1.0		2.0-3.0

	<b>MTZ</b>		HK 31				0.5-1.0		2.5-4.0
	<b>MSR-A</b>						0.4-1.0	1.2-2.0	Ag 2 - 3
	<b>MSR-B</b>						0.4-1.0	2.0-3.0	Ag 2 - 3

\* AICMA = Associazione Internazionale costruttori materiali aerospaziali.

**MAGNESIO**  
**LEGHE DA LAVORAZIONE PLASTICA**

LEGHE Al – Zn

Sigla AICMA	Sigla ATESIA	Sigla UNI	Sigla ASTM	Al %	Zn %	Mn %	Zr %	T %	Th %	Sigla AFNOR
MG.P.61	C		AZ 80 A	7,5 – 8,5	0,3 – 0,8	0,1 – 0,5	-	-	-	
MG. P.62	E		AZ 31 B	2,5 – 3,5	0,5 – 1,5	0,1 – 0,4	-	-	-	G – A3Z1
MG.P.63	L		AZ 61A	5,5 – 6,5	0,5 – 1,5	0,1 – 0,4	-	-	-	G – A6Z1

LEGHE Mg – Mn

Sigla AICMA	Sigla ATESIA	Sigla UNI	Sigla ASTM	Al %	Zn %	Mn %	Zr %	T %	Th %	Sigla AFNOR
-	L M		M 1 A	-	-	1,2 – 2	-	-	-	G – M2

LEGHE Zn – Zr

Sigla AICMA	Sigla ATESIA	Sigla UNI	Sigla ASTM	Al %	Zn %	Mn %	Zr %	T %	Th %	Sigla AFNOR
	Z W3				2,5 – 4,0	< 0,15	0,5 – 1,0	-	-	
	Z W1				0,75 – 1,5	< 0,15	0,5 – 1,0	-	-	
MG-P-41	Z W6		Z K 60A		4,8 – 6,2	< 0,15	0,5 – 1,0	-	-	

**MAGNESIO  
LEGHE DA PRESSO FUSIONE**

LEGHE Al – Zn

Sigla AICMA	Sigla ATESIA	Sigla UNI	Sigla ASTM	Al %	Zn %	Mn %	Zr %	T %	Th %	<b>Sigla</b> AFNOR
	T be	GD – Mg Al 8,5 Zn 0,6 Mn 0,2		7,5 – 8,5	0,3 – 0,8	0,15 – 0,5	-	-	-	G A9
	P be	GD – Mg Al 8,5 Zn 0,6 Mn 0,2		8,5 – 9,5	0,3 – 0,8	0,15 – 0,5	-	-	-	G A9Z1
-	-	8705:1987	-	6	-	0,2	-	-	-	-

**MAGNESIO E SUE LEGHE**  
**COMPOSIZIONE E CORRISPONDENZA FRA LE SIGLE ITALIANE E STRANIERE**

**MAGNESIO PRIMARIO NON LEGATO IN LINGOTTI (UNI 5537:1995 )**

Desugnazione convenzionale	Mg% min.	Al% max.	Mn max.	Si% max.	Cu% max.	Fe% max.	Ni% max.	Pb% max.	Sn% max.	Cu+Fe+Ni% max.	Al+Mn+Si+Cu+Fe+Ni % max.
Mg P 99,80 UNI5537:95	99,8	0,05									0,20
Mg P 99,90 UNI5537:95	99,9	0,02									0,10
Mg P 99,95 UNI5537:95	99,95	0									N.C.

**MAGNESIO – LEGHE DA FONDERIA Al Zn**

ASTM	AICMA *	UNI	AFNOR	ATESIA	Al%	Zn%	Mn%	Zr%	Terre rare	Th%
AZ63A	-	-	G.A623	D						
AM80A	-	-	G.A9	T						
AZ91C	-	6169:87	G.A9Z1	P						
AZ92A	-	-	-	2P						

\* AICMA: Associazione Internazionale Costruttori Materiali Aerospaziali

**MAGNESIO PRIMARIO NON LEGATO IN LINGOTTI ( UNI 5537 – 1995 ).**

Designazione convenzionale	Max Mg %	Max Al %	Max Mn %	Max Si %	Max Cu %	Max Fe %	Max Ni %	Max Pb %	Max	Max Cu +Fe +Ni %	Max Al + Mn + Si + Cu + Fe + Ni	Max Al + Mn + Si + Cu + Fe + Ni + Pb + Sn .	Max %
Mg P 99,80 UNI 5537 : 1995	99,8	0,05	0,1	0,05	0,02	0,05	0,002	N.C.	N.C.	N.C.	0,20	-	0,05
Mg P 99,90 UNI 5537 : 1995	99,9	0,02	0,07	0,01	0,005	0,005	0,001	N.C.	N.C.	N.C.	0,10	-	0,02
Mg P 99,95 UNI 5537 : 1995	99,95	0,01	0,01	0,01	0,002	0,003	0,001	0,005	0,001	0,005	N.C.	0,05 %	0,01

TABELLA I - Composizione chimica delle principali leghe di magnesio da fonderia.

Designazione ASTM	Al %	Zn %	Mn %	Zr %	Terre rare %	Th %
AZ 63 A	5,0 - 6,5	2,3 - 3,3	0,15 - 0,5			
AM 80 A	7,5 - 8,5	0,3 - 0,8	0,15 - 0,5			
AZ 91 C	8,5 - 9,5	0,3 - 0,8	0,15 - 0,5			
AZ 92 A	8,0 - 9,5	1,7 - 2,3	0,10 - 0,5			
ZK 51 A		3,5 - 5,5		0,4 - 1,0		
ZE 41 A		3,5 - 5,0		0,4 - 1,0	0,75 - 1,75	
EK 33 A		max - 3,5		0,4 - 1,0	2,5 - 4,0	
EK 31				0,4 - 1,0	2,5 - 3,5	
ZH 62 A		5,2 - 5,8		0,4 - 1,0		1,5 - 2,0
HZ 32 A		1,7 - 2,5		0,4 - 1,0		2,0 - 3,0
HK 31				0,5 - 1,0		2,5 - 4,0

Mg Al Zn

Mg Zn Zr

TABELLA III - *Trattamento termico delle principali leghe di magnesio da fonderia.*

signazione « Atesia »	Designazione « ASTM »	Stato di fornitura	Trattamento termico	
			Tempra di soluzione	Invecchiamento
D	AZ 63A	—T5 —T4 —T6	— 2 ore a 340 °C; 2 ore a 370 °C; 10-16 ore a 390 °C idem	2-5 ore a 220-260 °C  6-18 ore a 175-220 °C
T	AM 80A	—T4  —T6	8 ore a 380-390 °C 12 ore a 400 °C 4 ore a 415 °C idem	10 ore a 200 °C
P	AZ 91C	—T5 —T4  —T6	— 8 ore a 380-390 °C 12 ore a 410 °C 4 ore a 415 °C idem	5 ore a 220 °C  10 ore a 200 °C
2P	AZ 92A	—T5 —T4  —T6	— 8 ore a 380-390 °C 18 ore a 410-412 °C idem	5 ore a 220 °C  6-18 ore a 175-220 °C
Z5Z	ZK 51A	—T5	—	10-16 ore a 170-180 °C
RZ5	ZE 41A	—T5 —T6	— 18 ore a 565 °C	10-16 ore a 170-180 °C 16 ore a 205 °C
ZRE1	EK 33A	—T5	—	10-16 ore a 170-180 °C
MCZ	EK 31	—T5	—	10-16 ore a 170-180 °C
TZ6	ZH 62A	—T5	—	10-16 ore a 170-180 °C
ZT1	HZ 32A	—T5	—	16 ore a 315 °C
MTZ	HK 31	—T6	8-16 ore a 565 °C	16 ore a 200 °C

Nota: Per tutti i tipi di trattamento il raffreddamento viene effettuato in aria.

TABELLA IV - Proprietà meccaniche delle leghe di magnesio da fonderia:

Designazione « Atesia »	Stato di fornitura	Limite allo snervamento a 0,2% kg/mm <sup>2</sup>	Carico di rottura kg/mm <sup>2</sup>	Allungamento % $\sigma_{0.2}(\delta = 5 d)$
D	Grezza di colata (Gs)	7 - 10	16 - 20	3 - 6
	Omogeneizzata (T4)	7 - 10	24 - 28	7 - 12
	Bonificata (T6)	11 - 14	24 - 28	3 - 5
	Invecchiata (T5)	8 - 11	17 - 20	2 - 5
T	Grezza di colata (Gs-Gc)	7 - 9	16 - 20	2 - 6
	Omogeneizzata (T4)	9 - 13	24 - 28	8 - 12
	Bonificata (T6)	14 - 17	24 - 28	2 - 6
	Pressofusa (Gp)	14 - 16	20 - 24	1 - 2
P	Grezza di colata (Gc)	7 - 10	14 - 17	2 - 5
	Omogeneizzata (T4)	7 - 10	24 - 28	6 - 10
	Bonificata (T6)	11 - 14	24 - 28	2 - 4
	Invecchiata (T5)	8 - 12	14 - 20	1 - 3
	Pressofusa (Gp)	15 - 17	20 - 24	0,5 - 1,5
2P	Grezza di colata (Gs-Gc)	7 - 10	14 - 17	2 - 5
	Omogeneizzata (T4)	7 - 10	24 - 28	2 - 10
	Bonificata (T6)	12 - 15	24 - 28	1 - 2
	Invecchiata (T5)	8 - 12	14 - 17	2 - 4
Z5Z	Grezza di colata (Gs-Gc)	12 - 15	20 - 25	7 - 15
	Invecchiata (T5)	14 - 18	24 - 28	5 - 12
R5Z	Grezza di colata (Gs-Gc)	9 - 11	17 - 19	3 - 6
	Invecchiata (T5)	14 - 16	20 - 23	3 - 5
ZRE1	Invecchiata (T5)	8 - 10	14 - 17	3 - 6
MCZ	Invecchiata (T5)	8 - 10	14 - 16	3 - 6
TZ6	Invecchiata (T5)	8 - 10	26 - 31	5 - 15
ZT1	Invecchiata (T5)	16 - 19	19 - 22	5 - 10
MTZ	Invecchiata (T5)	8,6 min.	20,5 min.	5 min.