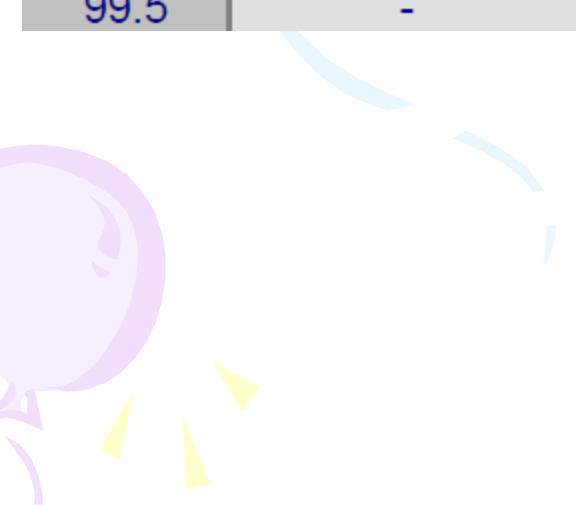
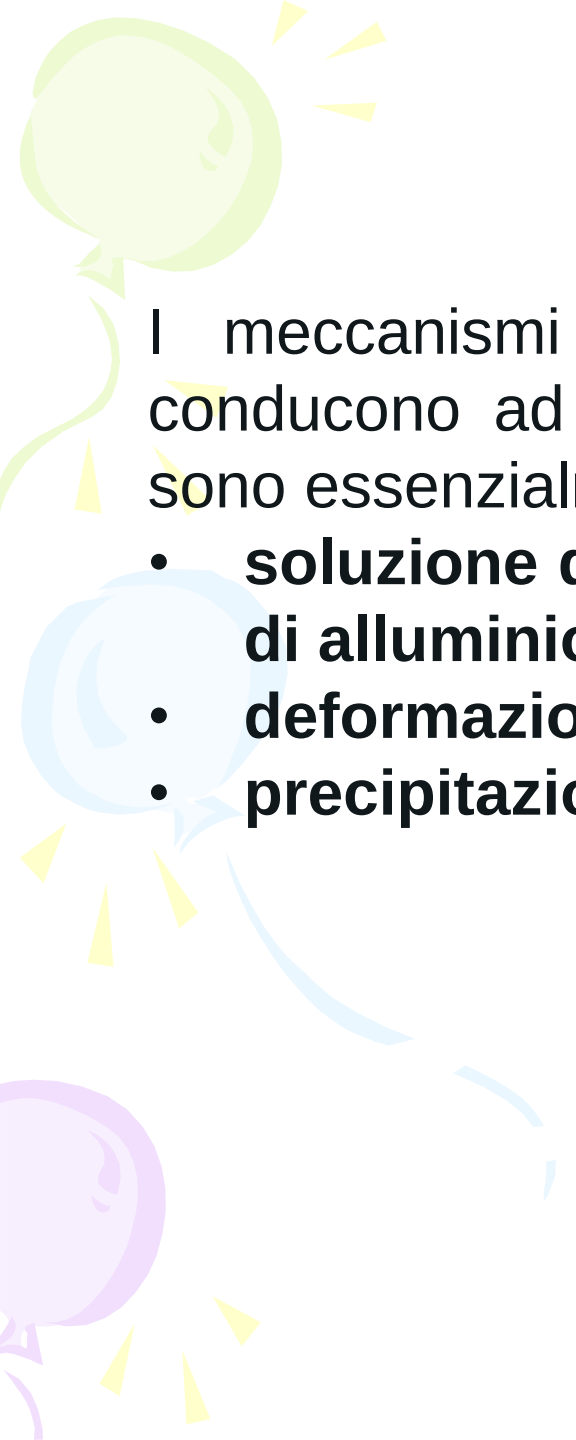




Proprietà meccaniche dell'alluminio puro.

Purezza [%]	Tensione di snervamento 0,1 %L ₀ [MPa]	Tensione di snervamento 0,2 %L ₀ [MPa]	Tensione di rottura [MPa]	Durezza Brinell	Allungamento [% in 5,04 mm]
99.99	27	58	118-129	12-16	50-65
99.8	55	65	158-163	19	45-55
99.7	-	68	172	-	-
99.6	73	-	181	19	43
99.5	-	73	181	18-25	45



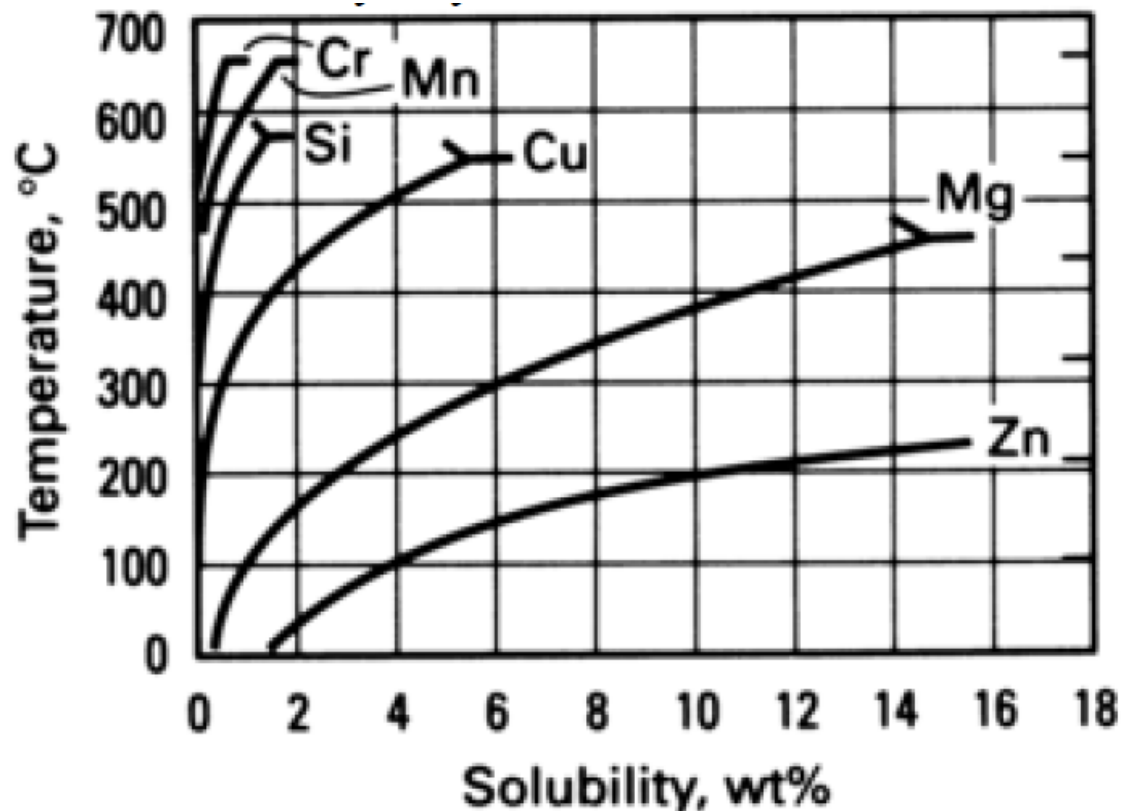


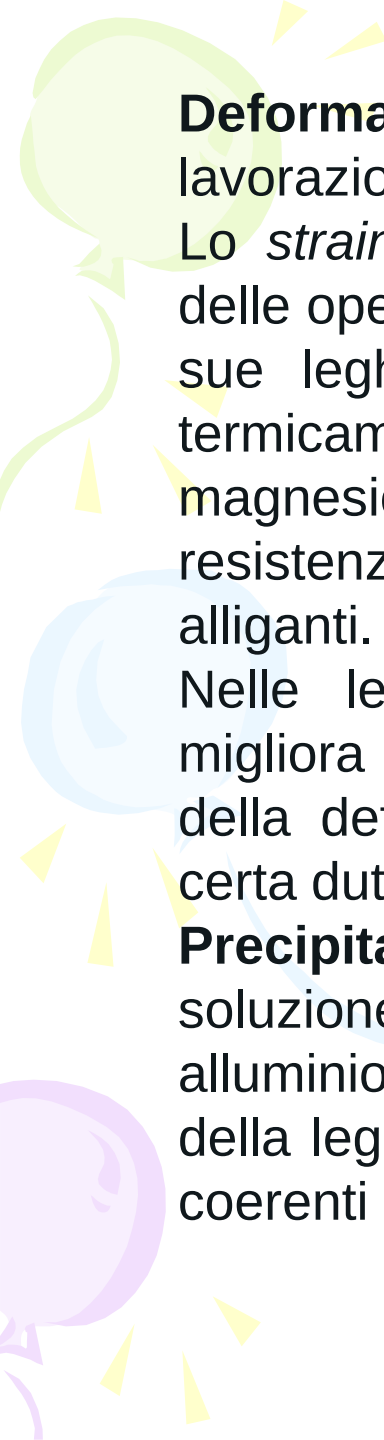
I meccanismi che, dal punto di vista metallurgico, conducono ad un rafforzamento delle leghe di alluminio sono essenzialmente:

- **soluzione di elementi allo stato solido nella matrice di alluminio.**
- **deformazione plastica a freddo.**
- **precipitazione.**

Soluzione di elementi allo stato solido nella matrice di alluminio:

mentre la totalità dei metalli ha una completa miscibilità allo stato liquido con l'alluminio nessun elemento ha una totale solubilità allo stato solido.



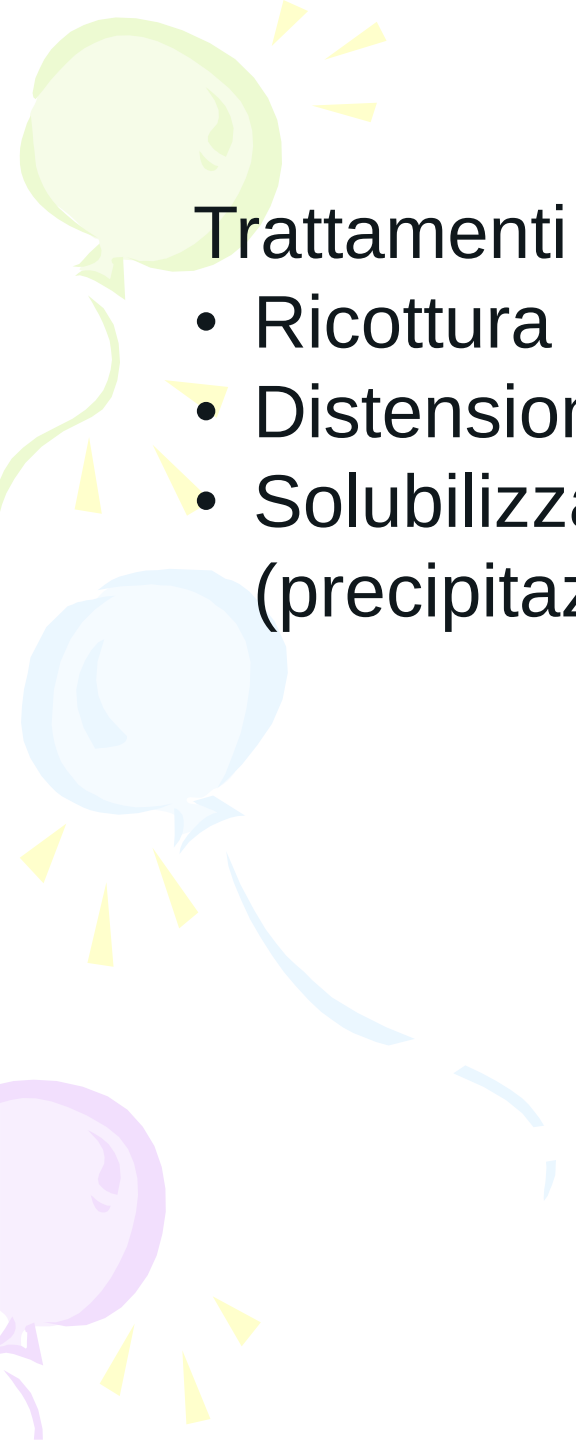


Deformazione plastica a freddo: l'indurimento tramite lavorazione a freddo.

Lo *strain hardening* è la conseguenza della maggiore parte delle operazioni di lavorazione e formatura nell'alluminio e nelle sue leghe. Nell'alluminio puro e nelle leghe non trattabili termicamente come le leghe alluminio-manganese e alluminio-magnesio, l'indurimento per deformazione aumenta la resistenza dovuta alla soluzione solida e alla dispersione di alliganti.

Nelle leghe trattabili termicamente, invece, l'incrudimento migliora la risposta all'invecchiamento. Molto spesso i prodotti della deformazione a freddo sono ricotti per riprendere una certa duttilità e per eliminare le tensioni interne.

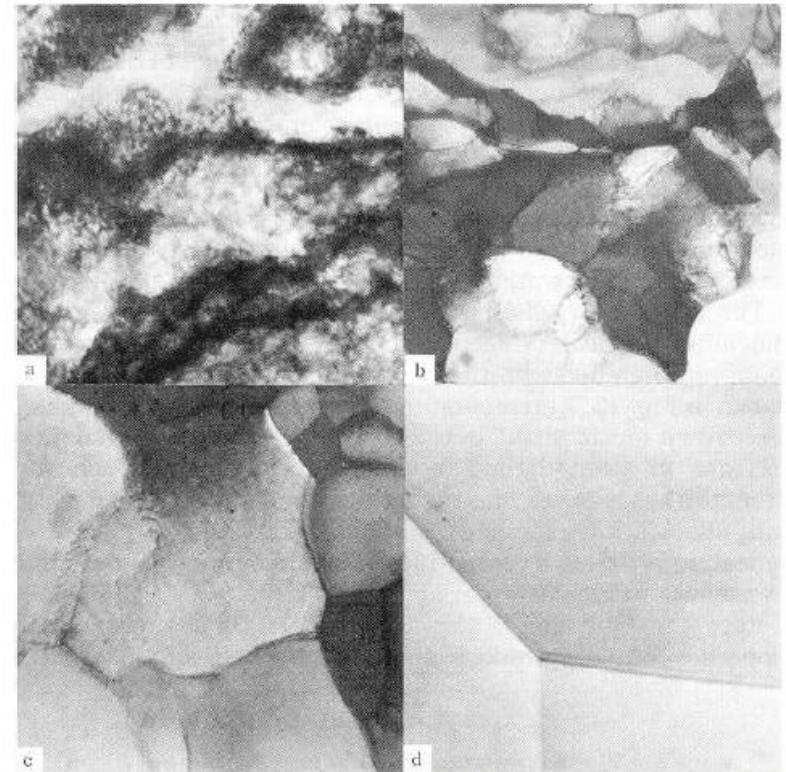
Precipitazione: meccanismo successivo ad una tempra di soluzione; l'indurimento e il rafforzamento della lega di alluminio sono dovute all'*invecchiamento*, naturale o artificiale della lega, durante il quale avviene la formazione di precipitati coerenti nella soluzione solida.



Trattamenti termici delle leghe di Alluminio:

- Ricottura
- Distensione
- Solubilizzazione-tempra-invecchiamento (precipitazione)

Ricottura: eseguita sulle leghe di Al incrudite e consiste in un trattamento termico al di sopra delle T di ricristallizzazione (circa 350°C). Durante questo trattamento la struttura incrudita ricristallizza in nuovi grani privi di sforzi interni, ripristinando la struttura originale duttile.



Transmission electron micrographs of Al-5 Mg alloy sheet cold rolled 75% and annealed for various time at 345°C . (a) As-rolled; (b) 1 min at 345°C ; (c) 5 min; (d) 1 hr (21,000X).

Distensione: è raccomandata per i giunti saldati di grande dimensione per modificarne lo stato di sforzo interno. Si riscalda il materiale a T di circa 230°C per alcune ore, seguito da raffreddamento in aria o acqua.

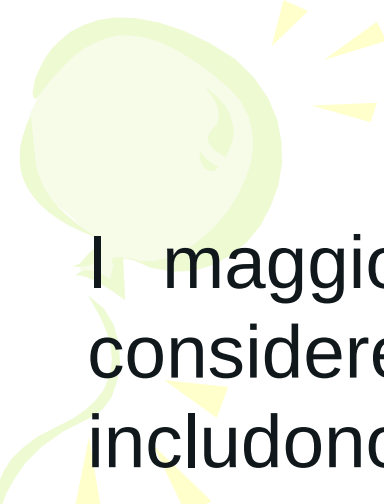
Il trattamento termico tipico consiste in due stadi noti come solubilizzazione ed invecchiamento

Il trattamento termico si riferisce a tutte quelle operazioni di raffreddamento e di riscaldamento che sono eseguite con l'intento di cambiare proprietà meccaniche, struttura metallurgica o lo stato di stress residuo di un prodotto metallico. Comunque, quando il termine è applicato alle leghe in Alluminio, il suo uso è spesso ristretto alle specifiche operazioni impiegate per incrementare la durezza e la resistenza delle leghe suscettibili di indurimento per precipitazione.

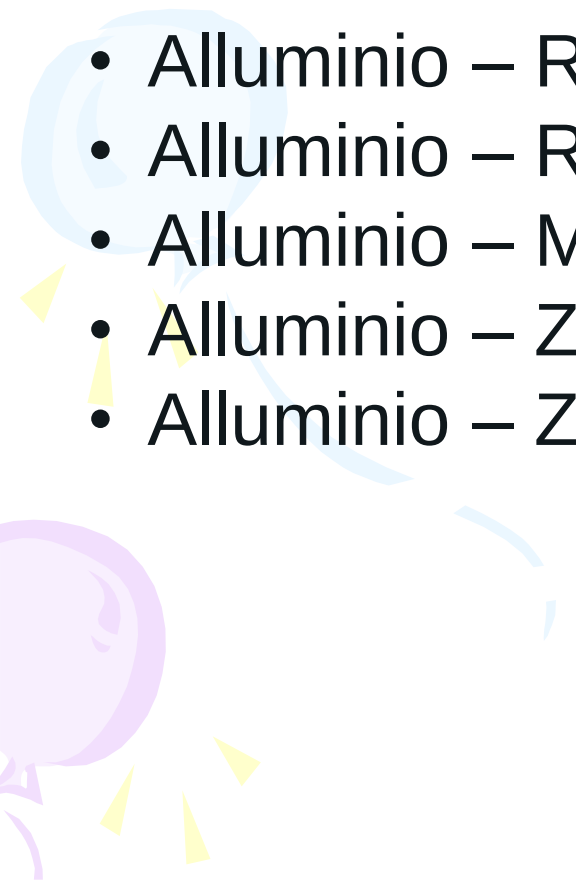
Queste sono generalmente indicate come le “heat treatable alloys” per distinguerle da quelle leghe nelle quali alcun rilevante indurimento può essere ottenuto scaldando o raffreddando. Per queste ultime, generalmente dette “non heat treatable alloys”, l'indurimento è ottenuto per lavorazione a freddo.

Un essenziale attributo affinché una lega indurisca per precipitazione è che il suo diagramma di fase presenti la curva di solubilità che aumenta con la temperatura.

Sebbene molti dei sistemi binari a base di alluminio presentino questo attributo, molti mostrano un indurimento per precipitazione poco rilevante, queste leghe non sono quindi considerate “heat treatable”.



I maggiori gruppi di leghe che presentano un considerevole indurimento per precipitazione includono:

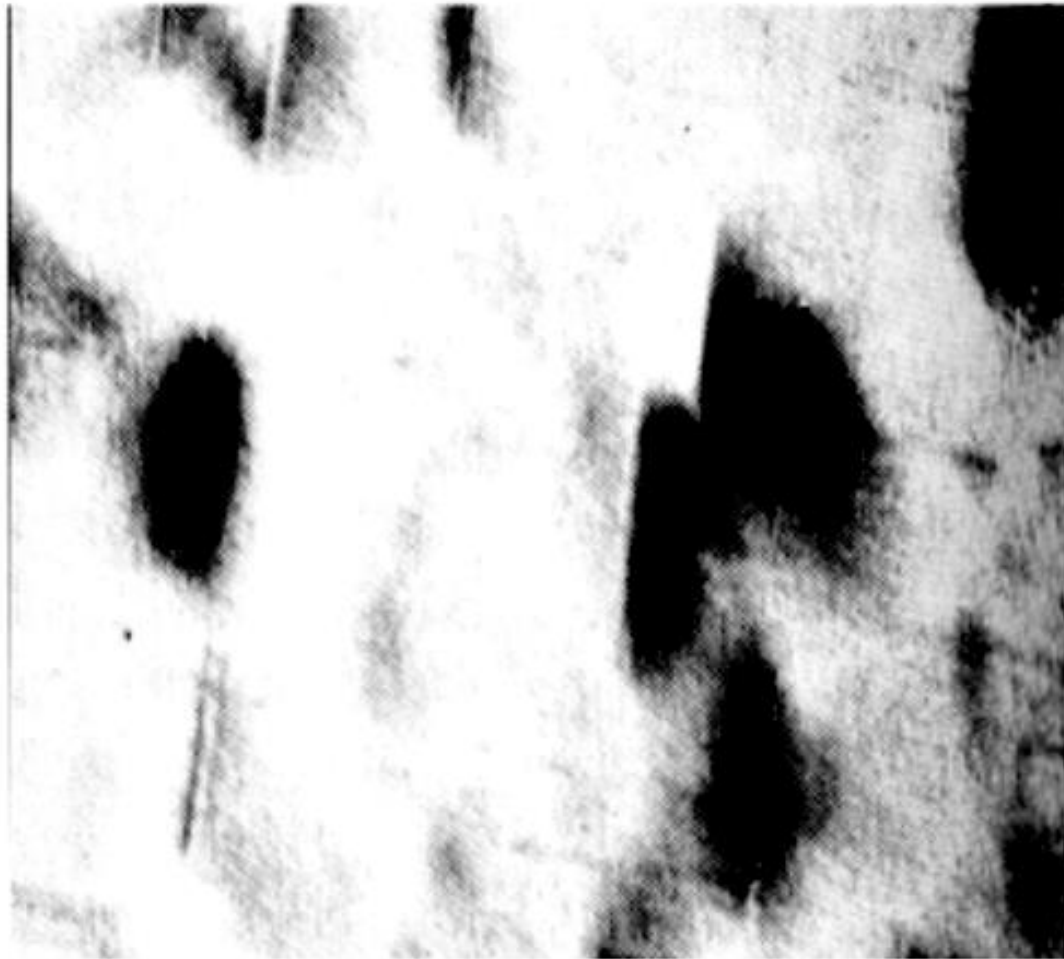
- Alluminio – Rame
 - Alluminio – Rame – Magnesio
 - Alluminio – Magnesio – Silicio
 - Alluminio – Zinco – Magnesio
 - Alluminio – Zinco – Magnesio – Rame
- 

Al-4%Cu



540°C temprato ed invecchiato 16 h a 130°C. Le zone GP1 sono parallele ai piani {100} della matrice in fcc. (1.000.000 X)

Al-4%Cu



540 °C temprato in acqua ed invecchiato a 130°C per 1 giorno
Si notano le tensioni (in nero) dovute alla fase coerente GP2
(8000.000 X)

Al-4%Cu



540°C temprato in acqua ed invecchiato per 3 giorni a 200°C.
Si notano le fasi metastabili θ' formate per nuclea zione e
crescita (25.000 X)

Invecchiamento

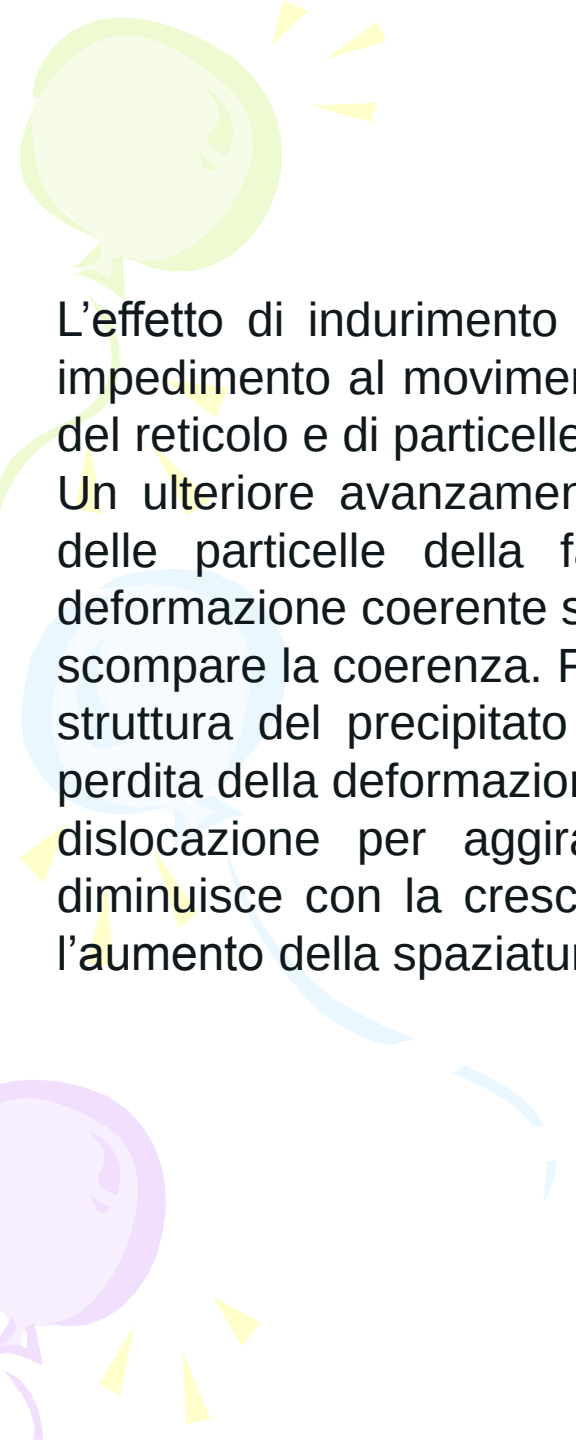
Un metodo usato per sviluppare le proprietà delle leghe è quello di condurre una precipitazione controllata di particelle molto fini sia a temperatura ambiente (natural aging) sia elevata (artificial aging). In genere, la precipitazione non comincia immediatamente ma richiede un cosiddetto “incubation time” per formare dei nuclei sufficientemente grandi e stabili; dopo di che può avere inizio il processo di crescita.

La velocità alla quale avviene la precipitazione varia con la temperatura. A temperature molto basse la velocità di reazione è controllata dalla velocità alla quale gli atomi possono migrare. A temperature appena al di sotto la “solvus line” la velocità di precipitazione è molto bassa, poiché la velocità di nucleazione è bassa essendo la soluzione solo leggermente sovrassatura quindi in questo caso la precipitazione è controllata dalla velocità con cui i nuclei possono formarsi.

A temperature intermedie tra i due appena menzionati estremi, la velocità di precipitazione aumenta sino a raggiungere un massimo e quindi il tempo per completare la precipitazione è molto corto.

Sperimentalmente è possibile ottenere la tipica “hardening curve”, mostrando l'effetto del tempo sulla durezza.

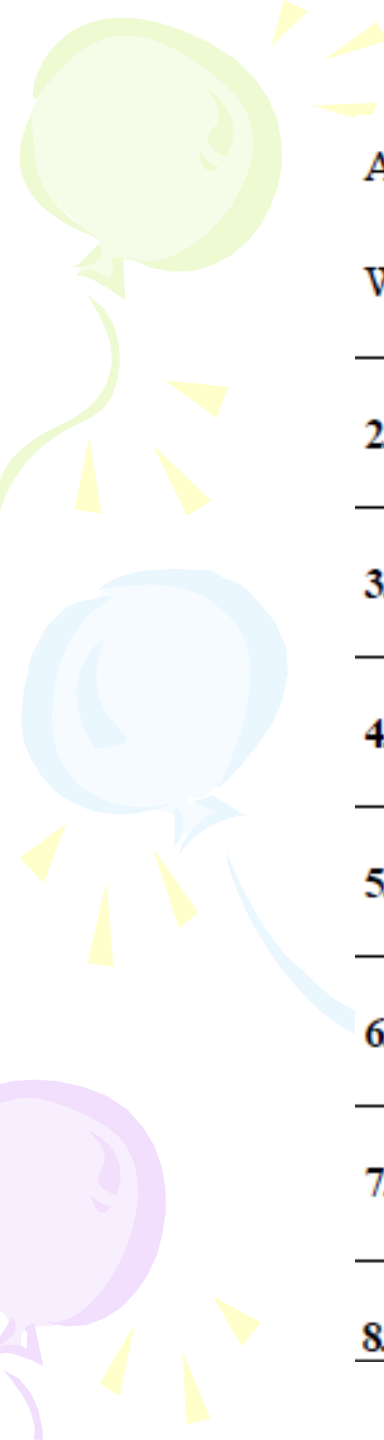
La forma della curva di invecchiamento, dipende primariamente da due variabili, la temperatura e la composizione della lega.



Invecchiamento

L'effetto di indurimento dato da queste strutture è dovuto alla produzione di un impedimento al movimento delle dislocazioni dovuto alla presenza di deformazioni del reticolo e di particelle di precipitato.

Un ulteriore avanzamento della reazione di precipitazione produce una crescita delle particelle della fase di transizione, accompagnata da un aumento di deformazione coerente sino a quando la forza del legame interfacciale è superata e scompare la coerenza. Frequentemente questo coincide con un cambiamento della struttura del precipitato dalla forma di transizione a quella di equilibrio. Con la perdita della deformazione coerente, l'indurimento è dovuto allo sforzo richiesto alla dislocazione per aggirare il precipitato. La forza richiesta progressivamente diminuisce con la crescita in dimensioni delle particelle della fase di equilibrio e l'aumento della spaziatura interparticellare.



Alloy	Temperature range	
	Solution annealing °C	Aging °C
Wrought alloys		
2xxx (Cu)	495–530	160–205
3xxx (Mn)	...	...
4xxx (Si)	...	...
5xxx (Mg)	...	...
6xxx (Mg + Si)	515–570	160–205
7xxx (Zn)	465–515	120
8xxx (other elements)	530–540	190

Sigla Elementi di lega (%) AA	Caratteristiche meccaniche								
	R MPa	Rs MPa	A %	HB	Stato	R MPa	Rs MPa	A %	HB
Leghe Al 10xx-11xx:									
1050 Al>99,5	0	76	28	-	-	H14	110	105	-
	H16	130	125	-	-	H18	160	145	-
1060 Al>99,6	0	69	28	43	19	H12	83	76	16
	H14	97	90	12	26	H16	110	105	8
	H18	130	125	6	35				
1100 Al>99,0 Cu=0,12	0	90	34	35	23	H12	110	105	12
	H14	125	115	9	32	H16	145	140	6
	H18	165	150	5	44				

Sigla Elementi di lega (%)		Possibilità Stato placcatura	Caratteristiche meccaniche									
AA			R MPa	Rs MPa	A %	HB	Stato	R MPa	Rs MPa	A %	HB	
Leghe Al-Cu 2xxx:												
2014	Al=93,5 Si=0,8 Cu=4,4 Mn=0,8 Mg=0,5	P	0	185	97	18	45	T4	425	290	20	105
			T6	485	415	13	135					
2017	Al=95,0 Cu=4,0 Mn=0,5 Mg=0,5		0	178	69	-	22	T4, T451	425	274	-	22
2024	Al=93,5 Cu=4,4 Mn=0,6 Mg=1,5	P	0	185	76	20	47	T3	485	345	18	120
		T4, T351	470	325	20	120	T361	495	395	13	130	
2218	Al=92,5 Cu=4,0 Mg=1,5		T61	405	305	13	115	T71	345	275	11	105
			T72	330	255	11	95					
Leghe Al-Mn 3xxx:												
3003	Al=98,6 Cu=0,12 Mn=1,2	P	0	110	42	30	28	H12	130	125	10	35
			H14	150	145	8	40	H16	180	170	5	47
			H18	200	185	4	55					
3004	Al=97,8 Mn=1,2 Mg=1,0	P	0	180	69	20	45	H32	215	170	10	52
			H34	240	200	9	63	H36	260	230	5	70
			H38	285	250	5	77					
Leghe Al-Si 4xxx:												
4032	Al=85,9 Si=12,2 Cu=0,9 Mg=1,0		T6	380	315	9	120					
4043	Al=94,8 Si=5,2		0	145	69	22	-	H18	285	270	0,5	-
Leghe Al-Mg 5xxx:												
5005	Al=99,2 Mg=0,8		0	125	41	25	28	H12	140	130	10	-
			H14	160	150	6	-	H16	180	170	5	-
			H18	200	195	4	-	H32	140	115	11	36
			H34	160	140	8	41	H36	180	165	6	46
			H38	200	185	5	51					
5052	Al=97,2 Mg=2,5 Cr=0,25		0	195	90	25	47	H32	230	195	12	60
			H34	260	215	10	68	H36	275	240	8	73
			H38	290	255	7	77					
5C	Al=95,0 Mn=0,12 Mg=5,0 Cr=0,12		0	290	150	35	65	H18	435	405	10	105
			H38	415	345	15	100					
5083	Al=94,7 Mn=0,7 Mg=4,4 Cr=0,15		0	290	145	22	-	H112	305	195	16	-
			H113	315	230	16	-	H321	315	230	16	-
		H323, H32	325	250	10	-	H343, H34	345	285	9	-	
5456	Al=93,9 Mn=0,8 Mg=5,1 Cr=0,12		0	310	160	24	-	H111	325	230	18	-
			H112	310	165	22	-	H321, H116	350	255	16	90

Sigla AA	Elementi di lega (%)	Possibilità Stato placcatura	Caratteristiche meccaniche								Stato	R MPa	Rs MPa	A %	HB
			R	Rs	A	HB									
			MPa	MPa	%										
Leghe	Al-Mg-Si 6xxx:														
6061	Al=97,9 Si=0,6 Cu=0,28 Mg=1,0 Cr=0,2	P	0 125	55	25	30	62			T4, T451	240	145	22	25	97
			T6, T651	310	275	12	17	97							
6063	Al=98,9 Si=0,4 Mg=0,7		0 90	48	-	25	55			T1	150	90	20	42	62
			T4	170	90	22	-	-		T5	185	145	12	60	69
			T6	240	215	12	73	69		T83	255	240	9	82	-
			T831	205	185	10	70	-		T832	290	270	12	95	-
Leghe	Al-Zn 7xxx:														
7005	Al=93,3 Mn=0,45 Mg=1,4 Cr=0,13 Zn=4,5 Ti=0,04 Zr=0,14		0 193	83	20	-	-			T53	393	345	15	-	140
			T6, T63	372	315	12	-	125							
7975	Al=90,0 Cu=1,6 Mg=2,5 Cr=0,23 Zn=5,6	P	0 230	105	17	60	-			T6, T651	570	505	11	150	160
			T73	505	435	13	-	-							
7078	Al=89,0 Cu=0,6 Mn=0,2 Mg=3,3 Cr=0,17 Zn=6,7		T6, T651	535	466	14	-	-							
7178	Al=88,1 Mg=2,7 Cr=0,26 Zn=6,8	P	0 226	103	15	-	-			T6, T651	604	535	10	-	-
7475	Al=90,3 Si=1,5 Mg=2,3 Cr=0,22 Zn=5,7		T61	525	460	12	-	-		T651	-	-	-	-	-
			T7351	-	-	-	-	220							