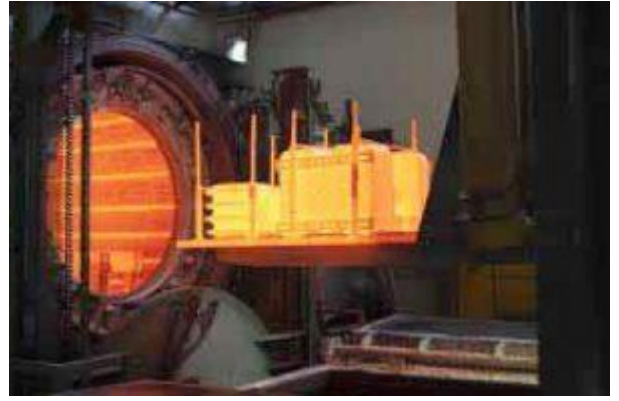


## PRINCIPI di TRATTAMENTI TERMICI -

Per **trattamento termico** si intende il ciclo termico di riscaldamento effettuato in predeterminate condizioni e temperature a cui devono seguire raffreddamenti, più o meno lenti, con lo scopo di fare assumere ad un metallo o ad una lega metallica quelle strutture cristalline che gli conferiscono determinate caratteristiche meccaniche e/o tecnologiche. Per comprendere l'effetto dei trattamenti termici sulla struttura di una lega metallica, è necessario conoscere il diagramma di stato della lega stessa. Tale conoscenza non è tuttavia sufficiente, difatti i diagrammi di stato definiscono le strutture di equilibrio di un metallo o una lega ad una determinata temperatura. Le relative curve sono quindi ricavate applicando riscaldamenti e raffreddamenti molto lenti (tali da consentire il raggiungimento dell'equilibrio ad ogni temperatura). Per questo motivo, un importante ruolo è svolto dalla velocità di raffreddamento o di riscaldamento della trasformazione. Tale velocità non solo influisce sulle temperature di transizione (che in genere saranno diverse da quelle ricavate dai diagrammi di stato), ma anche sulla natura stessa della struttura ottenuta, con la possibilità di ottenere costituenti metastabili (quali ad esempio la martensite negli acciai) assenti nel diagramma di stato.



## I PRINCIPALI TRATTAMENTI TERMICI

### Ricottura

La **ricottura** di una lega metallica è un trattamento termico che consiste nel riscaldamento ad una temperatura solitamente inferiore a quella di fusione, seguito dalla permanenza di durata opportuna e da un lento raffreddamento solitamente in forno.[1] Deve conseguire uno o più dei seguenti obiettivi: – *equilibrio chimico*: riduzione della segregazione minore; – *equilibrio strutturale*: trasformazione delle fasi metastabili; – *equilibrio meccanico*: riduzione delle tensioni residue interne, incrudimento compreso.

Si utilizza prevalentemente su acciai e su rame per prepararli alle fasi successive della lavorazione, rendendo il materiale più dolce e più omogeneo. Nel caso dell'acciaio, si riscalda sino ad una temperatura poco superiore a quella di austenitizzazione e si mantiene a tale temperatura per un tempo sufficiente a trasformarlo completamente in austenite; segue poi un lento raffreddamento in forno. Tramite la ricottura viene alterata la microstruttura del materiale, causando mutamenti nelle sue proprietà quali la flessibilità e la durezza. Il risultato tipico è la rimozione dei difetti della struttura cristallina. Può avere anche lo scopo di uniformare la composizione chimica dell'acciaio, in tal caso il riscaldamento è eseguito ad una temperatura più elevata e per tempi più lunghi. I processi che portano alle modifiche del reticolo cristallino durante la ricottura hanno ispirato in informatica la tecnica della **ricottura simulata** (o *simulated annealing*), che è una metaeuristica simile agli algoritmi genetici.

### Normalizzazione

In metallurgia la **normalizzazione** è un trattamento termico che consiste nel riscaldamento del materiale ad una temperatura poco superiore a quella di austenizzazione ( $Ac_3 + 50-70\text{ °C}$ ), nella permanenza per 15 minuti circa a questa temperatura tale da raggiungere l'equilibrio microstrutturale e nel raffreddamento in aria calma. Tale processo è simile alla ricottura, ma in questo caso il raffreddamento è più rapido. L'obiettivo principale è affinare la grana cristallina dell'acciaio, uniformare la microstruttura e attenuare l'estensione di bande stratificate di fasi differenti (struttura che rischia di sottolineare il comportamento della fase più debole. Generalmente si ottengono strutture simili a quelle di un materiale che ha subito ricottura: la perlite che si ottiene con la normalizzazione è però costituita da cristalli più minuti (a causa del raffreddamento più veloce). Ne consegue il miglioramento della resistenza e lo spostamento della transizione duttile – fragile. Di solito tale processo è eseguito come ultima operazione; può costituire il rimedio a un surriscaldamento della grana. Dovrebbe sempre essere effettuata su getti d'acciaio al carbonio e basso legati e su quelli già sottoposti a ricottura d'omogeneizzazione, per affinare la struttura grossolana. È utile per annullare qualsiasi trattamento termico o meccanico (ad esempio tempra e incrudimento). L'affinazione della grana che ne consegue è un'utile preparazione a successiva tempra e carbocementazione. Per acciai da usare a basse temperature conviene la **doppia normalizzazione**: una prima a più alta temperatura per meglio omogeneizzare, una seconda a più bassa temperatura per affinare la grana. Viene eseguito di preferenza sugli acciai ipoeutectoidici.

## Rinvenimento

È un trattamento termico consistente in un riscaldamento seguito da raffreddamento a velocità controllata, cui possono venire sottoposti acciai e leghe leggere per ridurre la fragilità indotta dalla tempra, a scapito però di parte della durezza. Il rinvenimento è suddiviso in diversi stadi a seconda della temperatura alla quale è portato l'acciaio, e all'aumentare di questa si ottiene una struttura con proprietà meccaniche sempre migliori (a parte la citata diminuzione della durezza). Di solito il trattamento di rinvenimento viene effettuato subito dopo la tempra. Il trattamento di tempra più rinvenimento al 4° stadio prende il nome di "bonifica". Si applica a materiali martensitici e porta alla formazione di bainite. Si passa da una struttura bct ad una ferrite cubica e cementite.

## Distensione

È un riscaldamento a 150-180 °C che provoca una leggera riduzione delle tensioni interne, senza diminuire troppo la durezza. In pratica è un particolare tipo di rinvenimento

## Bonifica

Con il termine **bonifica** si intende un insieme di trattamenti termici che si effettuano a particolari tipi di acciai e che consiste in una tempra seguita da un rinvenimento.[1] Nel corso della tempra degli acciai si ha formazione di martensite, una struttura ad elevata durezza e notevole carico di rottura, ma con una resilienza piuttosto bassa che può dar luogo a rotture in seguito a urti. Data la pericolosità di questi fenomeni, che comportano un collasso praticamente istantaneo della struttura, si sottopone l'acciaio ad un trattamento termico di rinvenimento, per trasformare parte della martensite in martensite rinvenuta.

Infatti la martensite è una fase metastabile, cioè si forma solo perché gli atomi di carbonio non riescono a fuoriuscire dal reticolo a causa dell'elevata velocità di raffreddamento che impedisce i moti diffusivi. Dato che la martensite, in assenza di elementi leganti, si forma solo con una percentuale di carbonio superiore allo 0,2%, sotto questo limite gli acciai praticamente non possono essere temprati, quindi non ha senso effettuare un trattamento di bonifica che è tanto più utile quanto più alta è la percentuale di carbonio. In genere gli acciai destinati a questo trattamento hanno lo 0,4-0,6% di C e sono appunto detti acciai da bonifica. Viene definita bonifica questa sequenza di trattamenti solo nel caso in cui il rinvenimento avvenga ad una temperatura maggiore di 550 °C (salvo nel caso degli acciai per molle che vengono rinvenuti a circa 450 °C). Portando la martensite a questa temperatura essa rinviene, trasformandosi in sorbite, una struttura che combina una buona resistenza a trazione, anche se inferiore a quella della martensite, ad una maggiore tenacità.

## Tempra

Il trattamento di **tempra o tempera**[1] in generale consiste nel brusco raffreddamento di un materiale dopo averlo portato a temperatura di austenizzazione. L'elevata velocità di raffreddamento inibisce l'azione diffusiva atta al ripristino dell'equilibrio e il numero di vacanze (e quindi di cluster, cioè raggruppamenti di difetti puntuali) che compete alla temperatura di tempra è conservato a temperatura ambiente. Più in generale si può dire che la tempra, inibendo i processi diffusivi necessari alla stabilizzazione termodinamica, trasferisce a temperatura ambiente uno stato termodinamicamente competente a temperatura maggiore. Un monocristallo così trattato ha resistenza meccanica maggiore rispetto al monocristallo raffreddato lentamente. Grazie alla tempra, per esempio, si trasforma la struttura perlitica dell'acciaio in martensitica: si porta la lega da temprare a una temperatura di circa 50 °C sopra quella di austenizzazione e lo si raffredda molto rapidamente fino a temperatura ambiente (non necessariamente essa viene raggiunta); non avendo così il tempo per diffondere, il carbonio rimane intrappolato all'interno della cella gamma, che si trasforma in cella alfa a temperatura ambiente; ciò porta ad avere una struttura tetraedrica, che è appunto la martensite. Anticamente la tempra veniva effettuata, oltre che in acqua o olio, in urine varie, che erano in grado di fornire una certa quantità di nitrati e nitriti per avere anche una diffusione di atomi di azoto (parziale nitrurazione).

## Note sugli acciai legati

L'acciaio con concentrazione di carbonio superiore allo 0,3-0,5% presenta un alto livello di rischio di cricature. La presenza di elementi leganti rallenta la dissoluzione dei carburi durante l'austenizzazione. L'uso di acciai legati in organi sollecitati a fatica o a flessione può essere pericoloso per il rischio di cricature ed è quindi sconsigliato se non indispensabile.

## Tempra di soluzione o solubilizzazione

Si consideri una lega formata dal soluto B disciolto nella matrice A. Se la si riscalda fino a completa dissoluzione di B e poi la si raffredda bruscamente, di solito in acqua o olio, fino a temperatura ambiente, si paralizzano gli atomi di B in condizioni metastabili, ottenendo una lega più tenera e plastica. È applicata agli acciai inossidabili austenitici (ad esempio: AISI 304 o X5CrNi1810, AISI 316 o X5CrNiMo1712) per migliorare la resistenza alla corrosione: un raffreddamento lento, infatti, provocherebbe la separazione dei carburi di cromo ai giunti dei grani, con conseguente impoverimento sotto al 12% (limite per la passivazione) e *corrosione intercristallina*. Nell'acciaio austenitico il manganese migliora la tenacità. La tempra di soluzione si fa anche su leghe di alluminio da trattamento termico, prima di avviare il processo d'invecchiamento. Su una lega di alluminio, procedere con un trattamento di invecchiamento, sia naturale che artificiale, migliora notevolmente le caratteristiche meccaniche, perché si vanno a formare finissimi precipitati che bloccano il movimento delle dislocazioni. Le leghe d'alluminio sottoposte a invecchiamento vengono riconosciute dalla sigla T6 (invecchiamento artificiale) o T4 (invecchiamento naturale). Per esempio AA-2xxx-T6 (lega d'alluminio della serie 2000 Alluminio+rame da trattamento termico, invecchiata artificialmente)

## Tempra di durezza

È un trattamento termico che sopprime la trasformazione eutettoidica e conduce alla formazione di martensite per raffreddamento continuo. Considerando il grafico delle curve CCT, la curva della velocità di raffreddamento in ogni punto del pezzo non deve incrociare le curve CCT, così che si arrivi alla sola formazione di martensite. Si deve quindi tenere presente che la curva di raffreddamento dipende da – *bagno di tempra – caratteristiche termiche dell'acciaio – caratteristiche geometriche del pezzo trattato mentre le curve CCT dipendono da – composizione dell'acciaio (ad esempio il carbonio le sposta a destra) – dimensioni del grano – inclusioni non metalliche, carburi, azoturi o segregazioni*. La “profondità di tempra” è rilevabile mediante due metodi, basati sul principio che la durezza dipende unicamente dalla quantità di martensite e dal tenore di carbonio. – “Diametro ideale”. Si misura il diametro critico (diametro della barra che dopo tempra ha 50% di martensite al centro), ricavandolo dal diametro ideale di una barra temprata in un bagno ideale di tempra, con indice di drasticità H infinito, grazie al diagramma proposto da Grossmann. – “Curva di Jominy”. Un provino cilindrico viene temprato e raffreddato secondo un metodo standard, segue quindi la misurazione della durezza Rockwell C lungo il suo asse e la costruzione di un grafico durezza – distanza dall'estremo; quest'ultimo consente di valutare e confrontare la temprabilità di diversi acciai (ad esempio il 40CrMo4 è più temprabile del C40); la penetrazione di tempra è ricavabile nel momento in cui si conosce la durezza corrispondente al 50% di martensite. È possibile ricavare i risultati del primo metodo da quelli del secondo, grazie a correlazioni standard codificate in normative ISO.

**Ambiente di riscaldamento** Bisogna evitare l'ossidazione e la decarburazione del pezzo temprato. Si può quindi proteggerlo con: olio balsamico – *sostanze solide* (trucioli di ghisa grigia, carbone), adatte in forni elettrici, per acciai al carbonio, basso-legati fino a 0,6% di C, ad alto cromo (ad esempio X210Cr13) e temperatura di tempra inferiore a 1050 °C; – *sostanze liquide* (sali fusi) per pezzi pregiati, ad esempio utensili da taglio o parti di macchine, in cui si richieda uniformità e precisione del riscaldamento; – *sostanza gassose* (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, gas inerti) per trattamenti economici su larga scala; un caso particolare è il vuoto.

## Velocità di riscaldamento

È necessaria gradualità per evitare criccate e tensioni termiche.

## Temperatura di tempra

Bisogna porre attenzione ad alzare eccessivamente la temperatura (per aumentare la velocità di austenitizzazione) in quanto si rischiano surriscaldamento della grana cristallina, bruciatura dei bordi dei grani per l'infiltrazione di ossigeno, ossidazione, decarburazione, eccessiva fragilità della martensite ottenibile, austenite residua. Ciò premesso, la temperatura è di 30 °C, 50 °C, 70 °C maggiore di Ac<sub>3</sub> a seconda che il mezzo di raffreddamento sia acqua, olio, aria, o bagni di sali.

## Permanenza in temperatura

Il tempo di permanenza dipende dal grado desiderato di dissoluzione dei carburi: – acciai da costruzione, al carbonio e basso-legati: pochi minuti – acciai da costruzione medio legati: almeno 15 minuti – acciai per utensili al carbonio e

bassolegati: 0,5 minuti per mm di spessore, con un massimo di un'ora – acciai alto-legati al cromo: 0,8 minuti al mm, con un massimo di un'ora – acciai per lavorazioni a caldo: mezz'ora al massimo, data la scarsa quantità di carburi – acciai rapidi: essi sono riscaldati alla più alta temperatura, quindi occorre limitare la permanenza al minimo (tempo dipendente dallo spessore)

**Mezzo di tempra** Il fluido ottimale deve assicurare:

– elevata velocità di raffreddamento nell'intervallo A1 – Ms per evitare la formazione di perlite o bainite; – modesta velocità nell'intervallo Ms – Mf (comunque non troppo bassa per non creare eccessiva austenite residua); questa proprietà è proporzionale alla differenza tra la temperatura del fluido e il suo punto di ebollizione; – il fluido non deve decomporsi al contatto con il metallo rovente. I mezzi più usati sono acqua, olio, sali fusi e aria e sono classificati in base all'*indice di drasticità H*. Si distinguono 3 stadi di raffreddamento per liquidi soggetti a ebollizione: **1** – al primo contatto del mezzo col pezzo si forma una pellicola di vapore (calefazione), con raffreddamento relativamente lento; **2** – nel momento in cui essa si rompe, nuovo liquido tocca il pezzo, assorbe il calore latente di evaporazione e si raggiunge così la massima asportazione di energia; **3** – con il passaggio sotto alla temperatura di ebollizione, si ha un calo nell'asportazione di calore. L'acqua è il mezzo di spegnimento più diffuso, soprattutto per acciai al carbonio e alcuni bassolegati, ma non è il fluido ideale. La sua azione può essere migliorata con l'aggiunta di sostanze che ne innalzino il punto di ebollizione, per esempio con NaCl o NaOH. L'olio minerale è adatto ad acciai basso e medio legati, cioè suscettibili di formare austenite stabile e quindi trasformabile con bassa velocità critica di tempra. Si avvicina maggiormente al fluido ideale, riducendo le tensioni interne e i difetti di tempra. L'aria è consigliata per acciai alto legati e quelli basso e medio legati in pezzi complessi. I sali fusi, adatti a pezzi non troppo grossi e di acciaio ben temprabile, eccellono soprattutto nei trattamenti isoteromici sostitutivi della tempra.

### **Tempra ad induzione**

Un corpo buon conduttore di elettricità, posto entro un campo magnetico alternato, si riscalda per effetto Joule grazie alle correnti indotte: questo fenomeno permette di portare ad alta temperatura, e quindi austenitizzare, un oggetto di acciaio. A causa dell'effetto pelle della corrente alternata lo spessore dello strato riscaldato varia con la frequenza della corrente (ma dipende anche dalla conducibilità del materiale); industrialmente si utilizzano generatori a bassa frequenza (inferiore a 5 kHz), media frequenza (da 5 a 30 kHz) e alta frequenza (200 kHz); lo strato di materiale interessato dal riscaldamento è inversamente proporzionale alla frequenza generata (bassa frequenza corrisponde a strati più profondi). Segue la fase di raffreddamento, che può avvenire per immersione o spruzzamento; esempi di "tempra localizzata" sono: lame per forbici o falciatrici, taglienti di pinze troncatrici, vomeri, denti di ingranaggi e soprattutto pezzi ruotabili durante il riscaldamento. La "tempra progressiva" comporta invece lo scorrimento del pezzo rispetto alla bobina e immediato raffreddamento della superficie in uscita. Il metodo è usato per guide di bancali, lame per seghetti, denti di ingranaggi di grandi dimensioni, alberi di trasmissione, steli per attuatori pneumatici, cuscinetti a rotolamento... Ultima fase del processo è il rinvenimento ad induzione, a 160-200 °C. Per evitare cricature gli acciai sottoponibili a tale trattamento sono gli acciai al carbonio o poco legati (39NiCrMo3) con C = 0,30-0,50% (classificabili negli acciai da bonifica) (eccezione: se la tempra deve raggiungere il cuore del pezzo, possono essere usati il 100Cr6 e il 100CrMn4, ad esempio nei cuscinetti a rotolamento). La bonifica serve ad ottenere una struttura di partenza con carburi fini, che si disciolgano presto nell'austenite durante il veloce riscaldamento, e un cuore tenace; per motivi inversi si escludono gli acciai ricotti (carburi grossolani e cuore scarsamente tenace).

### **Tempra bainitica (austempering)**

Essa rientra nei trattamenti di tempra isotermica. In breve, la sosta nel bagno termale, ad una temperatura poco superiore a Ms (temperatura di inizio trasformazione della martensite), porta alla completa trasformazione dell'austenite in bainite inferiore, ottenendo un materiale più tenace, meno tensionato e senza necessità di rinvenimento. Si può dire che la bainite inferiore che si ottiene da questo processo è la struttura dalle migliori caratteristiche meccaniche rispetto a tutte le altre strutture ottenibili dai diversi trattamenti termici. Ovviamente questo è anche un concetto relativo, infatti dipende da cosa richiede il progetto. Comunque se ci mettessimo nella logica di potere e volere classificare le caratteristiche meccaniche ottenibili dalle diverse strutture, la bainite inferiore sarebbe sul primo gradino del podio. Tuttavia il processo termico per ottenerla deve essere obbligatoriamente isoterma e, data la complessità, diventa costoso e quindi ancora poco diffuso. Si va spesso sull'alternativa più vicina alla bainite inferiore, ovvero la sorbite che si ottiene da un rinvenimento (generalmente a

$T \approx 550 \text{ }^\circ\text{C} - 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) preceduto, ovviamente, da una tempra di durezza (si ricordi che tempra + rinvenimento = bonifica).

### **Patentamento**

È una variante dell'austempering, consistente nel far passare con movimento continuo un filo di acciaio armonico all'interno di un bagno termale di piombo fuso a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si ottiene perlite fine, adatta alla trafilatura.

### **Martempering**

Il rinvenimento a bassa temperatura non elimina sempre adeguatamente cricche e distorsioni. Conviene ricorrere allora al martempering, cioè alla pausa isoterma a temperatura leggermente superiore a  $M_s$ , in un bagno di sali, per il tempo strettamente necessario a uniformare la temperatura del pezzo ma non sufficiente alla formazione di bainite. Segue il raffreddamento in aria e il rinvenimento.

**Vantaggi:** formazione contemporanea di martensite, nessuna ossidazione o decarburazione se il raffreddamento finale avviene in atmosfera protettiva, maggiore tenacità a scapito di un po' di durezza.

**Svantaggi:** maggiori costi di impianto, più austenite residua

Da ricordare che il martempering è spesso utilizzato nei casi in cui sia necessario temprare pezzi di grosse dimensioni (ad esempio ingranaggi di motori marini, stampi per le materie plastiche) che arrivano ad occupare volumi nell'ordine dei metri cubi. Dato le dimensioni del pezzo, è immediato immaginare come la differenza di temperatura fra superficie e cuore del pezzo possa assumere valori molto elevati qualora venga effettuato un trattamento di tempra tradizionale (senza la pausa isoterma del martempering). Gli stati tensionali quindi assumerebbero valori molto elevati e di conseguenza pericolosi per l'integrità del pezzo.

**Stato tensionale di un oggetto temprato** Le tensioni residue sono dannose in quanto possono provocare la cricatura e variazioni geometriche. Causa ne è sempre il gradiente termico.

### **Tensioni termiche**

Sono determinate dalla contrazione non contemporanea di strato interno e strato esterno di un pezzo. Sono proporzionali alla drasticità del raffreddamento, alla temperatura di tempra e allo spessore, mentre sono inversamente proporzionali alla resistenza del metallo; particolarmente evidenti sono nei metalli privi di trasformazione di fase solida, come acciai al carbonio extradolci, inossidabili ferritici e austenitici.

### **Tensioni strutturali**

La trasformazione dell'austenite in martensite, bainite o perlite comporta l'aumento del volume; dato che cuore e superficie non si trasformano contemporaneamente, nascono delle tensioni di trazione e compressione. La situazione più favorevole vede la sollecitazione a compressione del guscio esterno e a trazione del cuore, attuando una sorta di "deformazione sferica" che non solo non presenta motivi di pericolo, ma anzi favorisce la resistenza a fatica e a flessione (dato che si sommano algebricamente ai carichi esterni). Si considerino gli acciai legati: le loro curve CCT sono molto spostate a destra rispetto alle curve di raffreddamento e questo facilita la creazione di tensioni elastiche residue non adeguatamente distribuite. Pertanto il loro uso nel caso di organi sollecitati a fatica o a flessione deve essere adeguatamente valutato. Di solito migliore distribuzione delle tensioni residue risulta negli acciai al solo carbonio. Si pone infine l'attenzione su ulteriori elementi da valutare al fine del contenimento delle tensioni di tempra: velocità di riscaldamento, percentuale di carbonio superiore allo 0,3 – 0,5%, ambiente di riscaldamento che possa provocare ossidazione o decarburazione, temperatura di tempra eccessiva che renda fragile la martensite prodotta, velocità di raffreddamento, austenite residua, bagno di tempra che non assicuri uniformità di temperatura (per gli acciai alto legati si consiglia l'aria calma).

<https://www.sim-cdm.it/it/principali-trattamenti-termici/>