



37° Convegno nazionale AIM  
Bologna, 12-14 Settembre 2018

# **OTTIMIZZAZIONE DEL TRATTAMENTO TERMICO DI SOLUBILIZZAZIONE ED INVECCHIAMENTO DELLA LEGA TI-6AL-4V**

V.Pasello - Pasello Trattamenti Termici srl  
A.Morri - DIN Alma Mater Studiorum, Università di Bologna  
L.Ceschini - DICAM Alma Mater Studiorum, Università di Bologna

[www.pasello.com](http://www.pasello.com)



# Ottimizzazione del trattamento termico di solubilizzazione ed invecchiamento della lega Ti-6Al-4V

A. Morri<sup>1</sup>, L. Ceschini<sup>2</sup>, V.Pasello<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dip. di Ingegneria Industriale (DIN) – Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, [alessandro.morri4@unibo.it](mailto:alessandro.morri4@unibo.it)

<sup>2</sup> Dip. di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) - Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, [lorella.ceschini@unibo.it](mailto:lorella.ceschini@unibo.it)

<sup>3</sup> Pasello Trattamenti Termici S.r.l. Calderara di Reno (BO), [vittorio.pasello@pasello.com](mailto:vittorio.pasello@pasello.com)

## Introduzione

La lega Ti-6Al-4V è ampiamente utilizzata nel settore aerospaziale e automotive per la sua elevata resistenza specifica. I componenti per i quali sono richieste elevate prestazioni sono sottoposti al trattamento di solubilizzazione ed invecchiamento (STA), in grado di garantire un incremento della resistenza meccanica compresa fra il 20 e 30% rispetto al materiale ricotto, ma a spese dell'allungamento a rottura che può ridursi fino al 50%.

I risultati dello STA sono fortemente influenzati dalle velocità di raffreddamento della lega in fase di tempra e dalle condizioni d'invecchiamento. Questa sensibilità del materiale ai parametri di trattamento richiede, quindi, una loro ottimizzazione in funzione delle dimensioni dei componenti da trattare e delle proprietà richieste dall'utilizzatore [1-4], al fine di ottenere le proprietà meccaniche richieste.

## Obiettivi

Lo studio è stato quindi volto a valutare gli effetti di:

1. diversi **mezzi di tempra**
2. diverse **temperature di invecchiamento**

su **microstruttura**, **resistenza** a trazione e **allungamento** a rottura della lega **Ti-6Al-4V** sottoposta a trattamento STA.

## Materiali e Metodi

I test di trattamento termico sono stati eseguiti su barre cilindriche (diametro 16mm, lunghezza 110 mm) di lega **Ti-6Al-4V** allo stato ricotto.

I **trattamenti termici** sono stati eseguiti utilizzando i seguenti parametri:

- **Solubilizzazione: 970°C per 1 ora** in un forno industriale a bassa pressione ( $10^{-2}$  mbar)
- **Tempra** in: (a) **acqua** a temperatura ambiente, (b) **flusso di azoto** a 10 e 20 bar in camera per tempra ad alta pressione, (c) **olio** a 3° Engler, a temperatura ambiente, a 60°C e 120°C
- **Invecchiamento: a 470, 500, 550 e 600°C per 6 ore.**

Le **analisi microstrutturali** sono state eseguite in microscopia ottica dopo preparativa metallografica e attacco chimico con reagente Kroll.

Le **prove di trazione** sono state eseguite secondo EN ISO 6892-1:2009, utilizzando provini cilindrici (tratto utile di diametro 5 mm e lunghezza 25 mm).

## 1 - Effetto di diversi mezzi di tempra

La microstruttura della barra ricotta è costituita da grani di fase  $\alpha$  e fase  $\beta$  in corrispondenza dei punti tripli dei grani  $\alpha$  (Fig. 1).

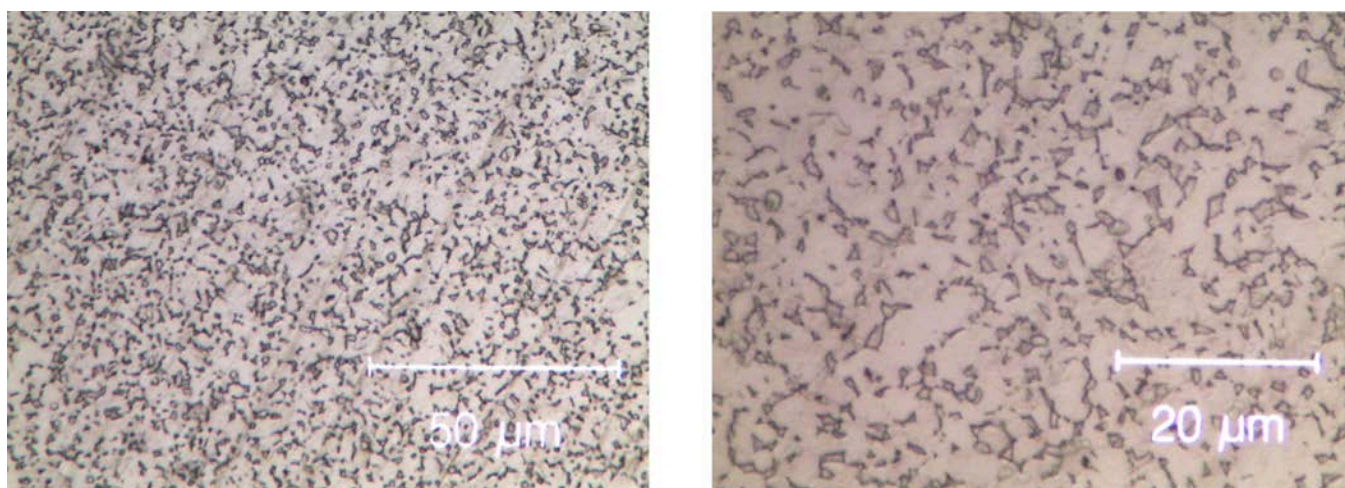


Figura 1. Micrografie ottiche a diversi ingrandimenti della lega Ti-6Al-4V allo stato ricotto

Dopo trattamento STA è possibile osservare diverse microstrutture in funzione della velocità di raffreddamento durante la fase di tempra. Nel caso di raffreddamento con azoto, indipendentemente dalla pressione con cui è iniettato nella camera del forno, si ha lo sviluppo di una microstruttura bimodale (Fig. 2), con grani di fase  $\alpha$  primaria in una matrice costituita da fasi  $\alpha$  e  $\beta$  con morfologia di Widmstätten [1,4].

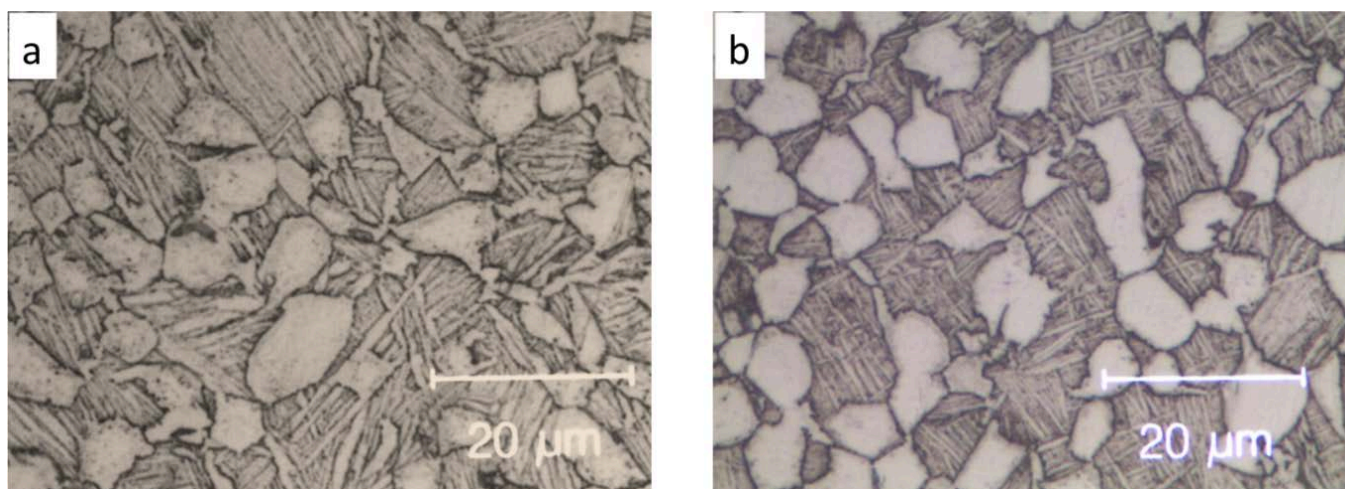
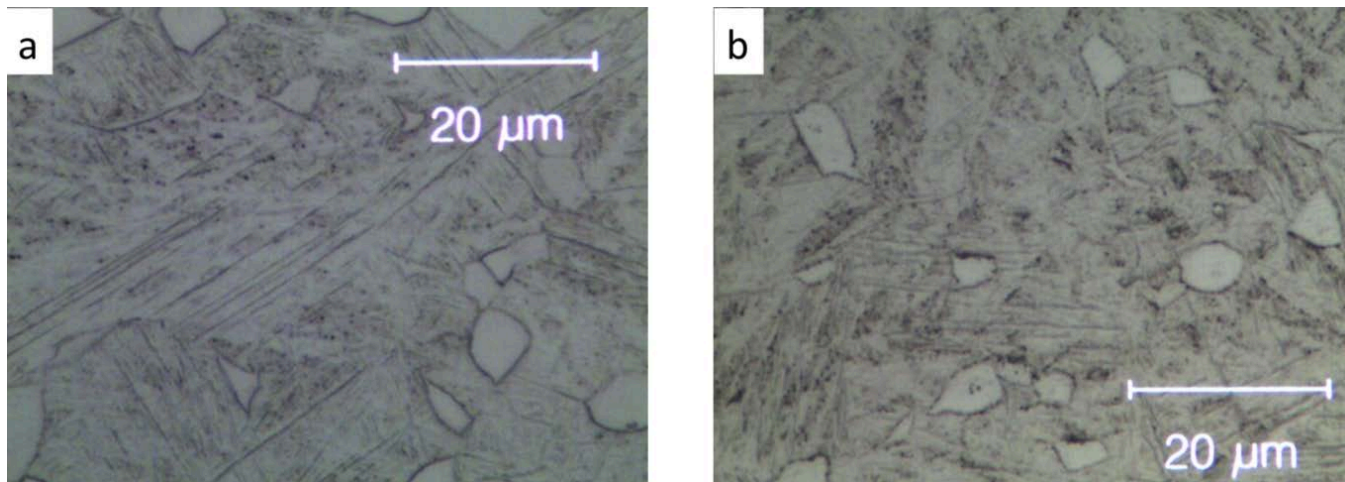


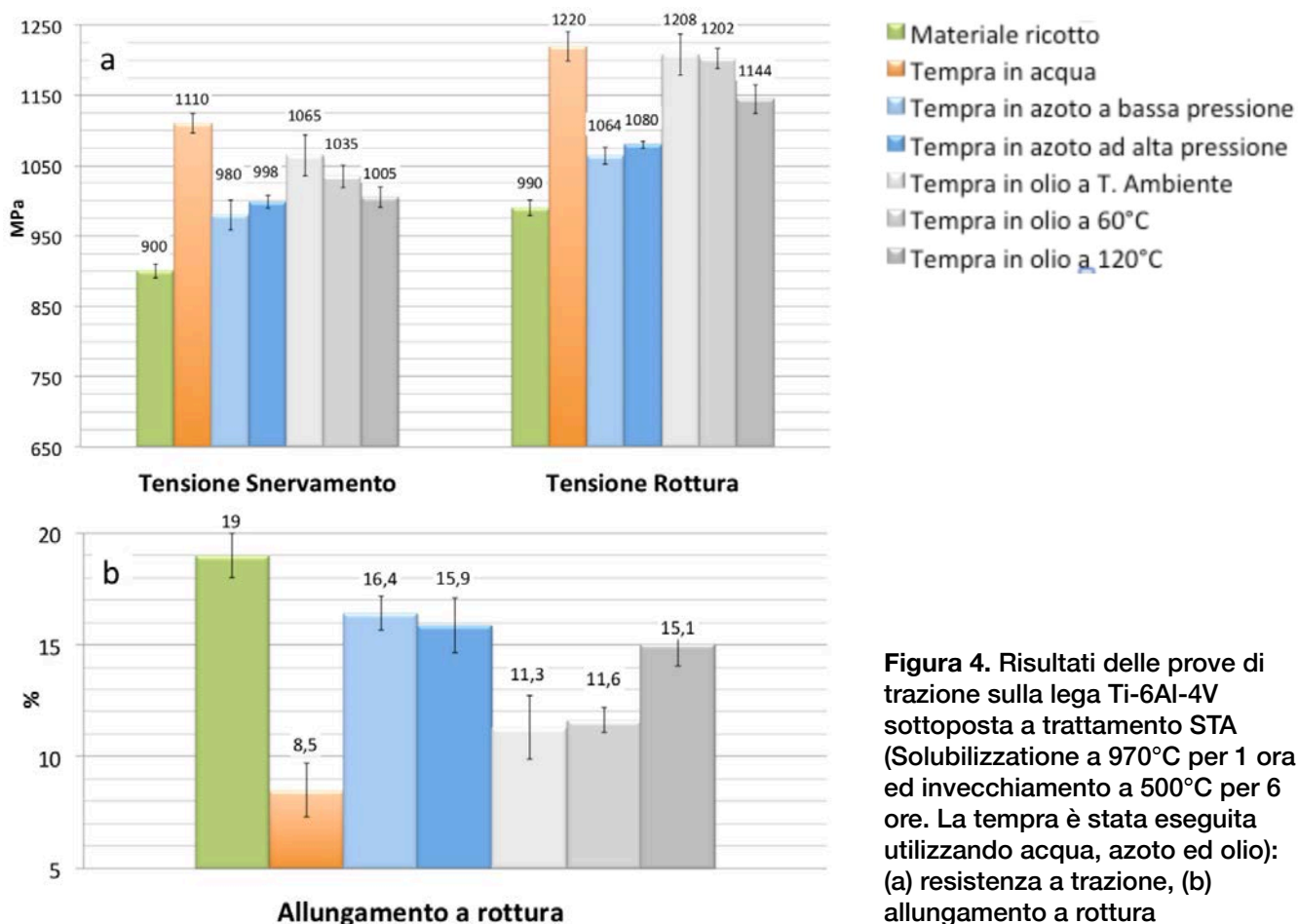
Figura 2. Micrografie della lega Ti-6Al-4V dopo trattamento STA. Tempra eseguita in: (a) flusso di azoto a 10 bar, (b) flusso di azoto a 20 bar

L'utilizzo di acqua od olio come mezzi tempranti determina sempre la formazione di una microstruttura bimodale (Fig. 3), ma in questo caso i grani di fase  $\alpha$  primaria sono all'interno di una matrice di martensite trasformata [1,4].



**Figura 3.** Micrografie della lega Ti-6Al-4V dopo trattamento STA. Tempra eseguita in: (a) olio a temperatura ambiente, (b) olio a 60°C

Correlate alle suddette variazioni microstrutturali, la drasticità del mezzo temprante ha un'una chiara influenza sulle proprietà meccaniche della lega. L'aumento della velocità di raffreddamento determina, infatti, un incremento della resistenza a trazione ed una riduzione dell'allungamento a rottura della lega (Fig. 4).



**Figura 4.** Risultati delle prove di trazione sulla lega Ti-6Al-4V sottoposta a trattamento STA (Solubilizzazione a 970°C per 1 ora ed invecchiamento a 500°C per 6 ore. La tempra è stata eseguita utilizzando acqua, azoto ed olio): (a) resistenza a trazione, (b) allungamento a rottura

## 2 - Effetto di diverse temperature d'invecchiamento

Le modifiche indotte dalla diversa temperatura d'invecchiamento sulla microstruttura duplex ottenuta dopo tempra in olio, non sono apprezzabili in microscopia ottica (Fig. 5)

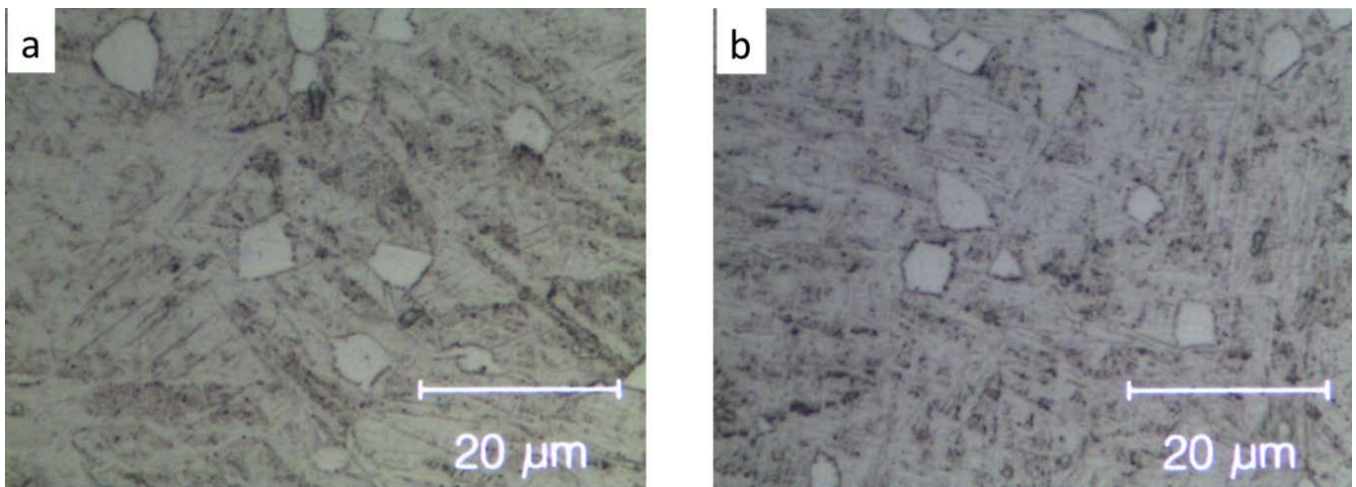


Figura 5. Micrografie della lega Ti-6Al-4V dopo trattamento STA, solubilizzazione in olio 970°C 1 ora e tempra in olio a 60° seguite da invecchiamento a: (a) 470°C, (b) 550°C per 6 ore

I dati delle prove di trazione (Fig.6) evidenziano, invece, come la temperatura d'invecchiamento abbia effetti sulle proprietà meccaniche. La tensione di snervamento, infatti, risulta insensibile a variazioni delle temperature d'invecchiamento nell'intervallo 470-550°C, mentre si riduce a 600°. La tensione di rottura tende invece a ridursi in maniera continua per temperature di invecchiamento superiori a 500 °C. L'allungamento a rottura, invece, aumenta all'aumentare della temperatura d'invecchiamento.

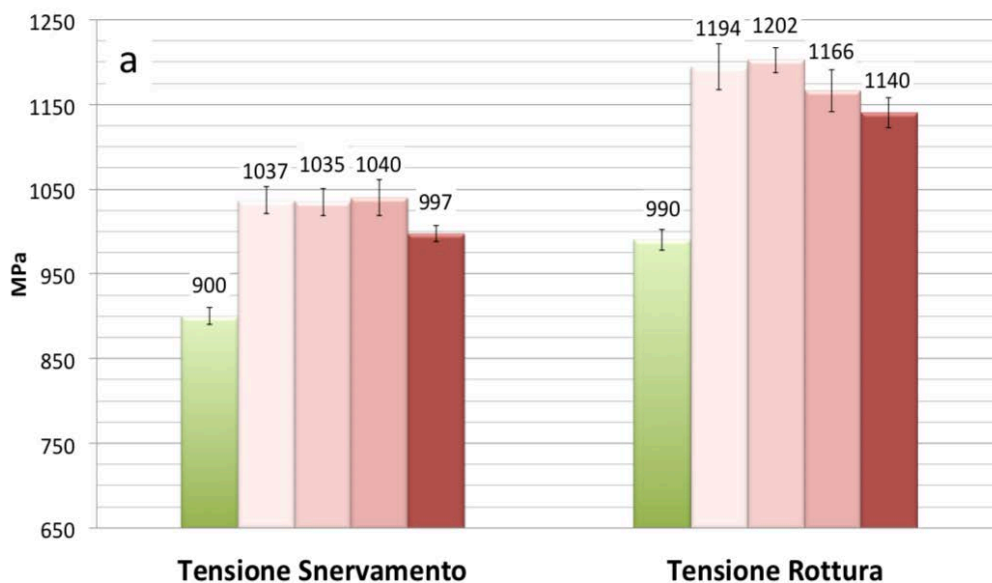
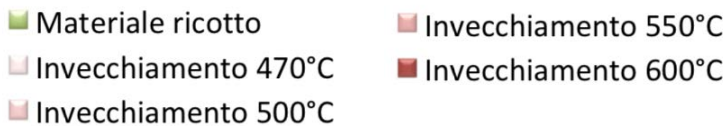
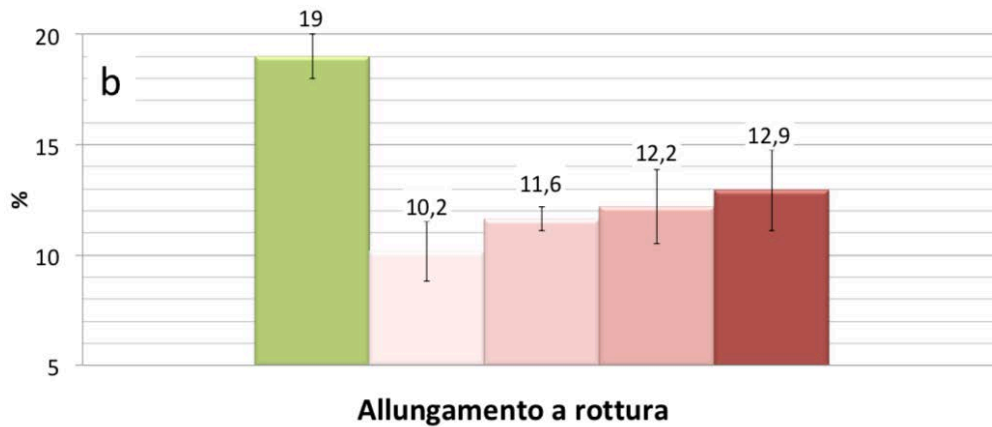


Figura 6. Risultati delle prove di trazione sulla lega Ti-6Al-4V sottoposta a trattamento STA (solubilizzazione a 970°C per 1 ora, tempra in olio a 60°C ed invecchiamento a diverse temperature per 6 ore): (a) resistenza a trazione, (b) allungamento a rottura.

- Materiale ricotto
- Invecchiamento 470°C
- Invecchiamento 500°C
- Invecchiamento 550°C
- Invecchiamento 600°C



## Conclusioni

- La tempra in acqua determina nella lega Ti-6Al-4V un forte incremento di resistenza a trazione ma una marcata riduzione dell'allungamento a rottura; la tempra in azoto, pur garantendo un'elevata duttilità, non incrementa le proprietà resistenziali in maniera sensibile.
- La tempra in olio, a temperatura ambiente o a 60°C, seguita da un trattamento di invecchiamento nell'intervallo ottimale 470°-500°C permette di ottenere il miglior compromesso fra resistenza a trazione e allungamento a rottura.

## Bibliografia

1. G.Lütjering, J.C.Williams, "Titanium", Springer-Verlag (2003), BerlinGermany.
2. R.K.Gupta, V. Anil Kumar, Sumit Chhangani, JMEPEG 25 (2016) pp. 1492–1501
3. P.E.Markovskya, S.L.Semiatin, Mat.Sci.Eng. A528 (2011) pp. 3079–3089
4. A.Morri, La metallurgia Italiana, 100(10) (2008), pp.19-28