

## TEMPRA LASER DELLE ROTAIE: STUDI PRELIMINARI

*A. Bracciali<sup>a\*</sup>, F. Piccioli<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali - Università di Firenze v. Santa Marta, 3 - 50139 Firenze. E-mail: bracciali@ing.unifi.it

<sup>b</sup> Borsista presso: Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali - Università di Firenze v. Santa Marta, 3 - 50139 Firenze. E-mail: fabio.piccioli@unifi.

### Sommario

L'usura delle ruote e delle rotaie è un fenomeno intrinseco nel trasporto ferroviario. Raramente, infatti, si riescono a realizzare in curva le condizioni di rotolamento puro e gli inevitabili strisciamenti portano ad asportazioni di materiale che modificano la geometria del contatto. Al di sopra di certe usure è necessario procedere ad operazioni di ripristino del profilo od a sostituzione delle parti. Nel presente lavoro vengono presentati alcuni risultati preliminari di un trattamento termico da effettuare in linea su rotaie esistenti allo scopo di prolungarne la vita utile. Vengono analizzati i vantaggi e gli svantaggi del procedimento che appare particolarmente promettente.

### Abstract

Wheel and rail wear is a phenomenon intrinsic in rail transportation. Perfect rolling conditions can in fact very rarely be reached in curves, leading to inevitable sliding and the consequent material removal that modify the geometry of the wheel/rail contact. Beyond certain limits it is necessary to reshape worn profiles or to change the parts. In this paper some preliminary results obtained with a thermal treatment to be done on rails in service to increase their useful life are shown. Advantages and drawbacks of this very promising treatment are discussed.

**Parole chiave:** : rotaia, temprata, laser, elementi finiti

### 1. INTRODUZIONE

La guida dei veicoli ferroviari, con ruote solidalmente collegate da un assile, viene ottenuta mediante una opportuna profilatura della tavola di rotolamento delle ruote che interagisce con la testa della rotaia. La tavola di rotolamento e la rotaia hanno, a nuovo, un profilo opportunamente studiato che garantisce un buon autocentramento della sala montata durante la marcia in rettilineo grazie all'effetto bicono, studiato nell'Ottocento da Klingel. Purtroppo la conicità risultante, derivante dalla differenza dei raggi di rotolamento delle ruote in funzione dello spostamento laterale della sala, non è sufficiente a generare l'effetto "differenziale" necessario per percorrere lunghezze diverse sulle rotaie esterna ed interna in curve di raggio anche non particolarmente ridotto. In tali circostanze la guida viene assicurata dal bordino delle ruote che, ovviamente, interagisce con la testa della rotaia in maniera cinematicamente non corretta generando strisciamenti.

Come conseguenza di questi strisciamenti si hanno usure notevoli delle rotaie in curva. Questo è un fenomeno del tutto naturale ove le condizioni di esercizio impongano o consiglino di affrontare le curve con elevati valori di accelerazione non compensata. Tale circostanza di esercizio si verifica assai spesso nei tracciati ferroviari ed è tipica delle linee percorse a velocità medie ove singolarità non troppo frequenti, ossia le curve di raggio particolarmente stretto, non consiglino di abbassare la velocità.

In generale quasi tutte le curve di piena linea con raggio inferiore ai 600 m sono soggette a notevoli fenomeni di usura di profilo trasversale. Queste usure sono talmente elevate che in alcuni casi è necessario ricorrere alla sostituzione delle rotaie ogni 4-5 anni, con costi esorbitanti e potenziali soggezioni all'esercizio.

Particolarmente interessante è la problematica relativa alla modalità di crescita dell'usura di profilo. Profili nuovi, applicati in rettilineo, tendono ad usurarsi pochissimo in quanto l'effetto differenziale è sufficiente a garantire il centramento della sala. In queste circostanze il bordino e la testa della rotaia non entrano in contatto, per cui non è raro trovare in rettilineo rotaie in servizio da oltre trent'anni con scarsissima usura e, conseguentemente, con un profilo assolutamente idoneo al servizio.

Al fine di garantire una buona dinamica di marcia, il gioco laterale ammesso dalla sala in rettilineo con profili nuovi è particolarmente ridotto, dell'ordine di  $\pm 6$  mm. Si ha inoltre una variazione particolarmente repentina del punto di contatto, nel senso che il passaggio dal contatto sulla tavola di rotolamento/testa della rotaia al contatto sul bordino/fianco della rotaia avviene improvvisamente. Questa condizione di "doppio contatto" si rivela essere particolarmente gravosa ai fini dell'usura.

Ovviamente le usure tendono a modificare i profili al fine di meglio ridistribuire le pressioni di contatto e, fin quando non si raggiunge una condizione relativamente stabile, esse sono relativamente elevate. Universalmente noti sono i problemi tipici successivi al cambio rotaie in curva, tant'è che in letteratura si cita il fenomeno del *rerailing wheel wear peak*, ossia del manifestarsi di usure abnormi sulle ruote dei veicoli che possono richiedere la riprofilatura dopo percorrenze particolarmente brevi, anche inferiori ai 20.000-30.000 km. Questo fenomeno è aggravato dall'uso, ormai generalizzato, di rotaie prodotte con acciai di caratteristiche migliori in termini di durezza e resistenza a trazione rispetto agli acciai usati in passato (dallo *steel grade 700A* si è passati al *900A*). Di per sé l'uso di materiali più duri è decisamente vantaggioso in quanto limita l'usura ma, purtroppo, la fase di transitorio si allunga drasticamente ed il numero di ruote destinate a farne le spese cresce in maniera spesso inaccettabile.

Nella pratica ferroviaria si sono, ovviamente, individuate alcune pratiche operative, che non verranno qui discusse, al fine di ridurre le usure nelle ruote e nelle rotaie, quali la lubrificazione del bordino delle ruote e del fianco attivo della rotaia, l'uso di materiali globalmente più duri ed una gestione migliore dei profili e delle condizioni di contatto.

Un approccio alternativo ai classici trattamenti termici per ridurre le usure consiste nell'ottenimento di uno strato superficiale indurito utilizzando materiale di base tenace, quindi mantenendo buon comportamento in termini di meccanica della frattura. Questo strato superficiale può essere ottenuto per riscaldamento superficiale mediante fascio laser e successiva tempra per raffreddamento rapido dovuto alla conduzione di calore nel materiale sottostante. Il grande vantaggio di questo trattamento, detto "tempra laser", è che non richiede un mezzo di raffreddamento classico (acqua o altro) e quindi, oltre ad essere assolutamente ecologico, può essere effettuato direttamente sul campo. Uno degli svantaggi è che il processo è relativamente lento e quindi non è adatto alle grandi produzioni dell'industria meccanica.

La tempra laser delle rotaie pare particolarmente promettente in quanto consente di “congelare” lo stato di usura del materiale in una certa condizione drasticamente riducendo la velocità di usura successiva al trattamento.

Al fine di valutare la pratica applicabilità della tempra laser alle rotaie è stato messo a punto e tarato un semplice modello agli elementi finiti in campo termico il cui scopo è la determinazione degli andamenti temporali della temperatura durante il processo di riscaldamento e successivo raffreddamento per conduzione. Il modello è stato sviluppato tenendo conto delle non linearità del materiale (coefficiente di conducibilità termica) con la temperatura ed è stato tarato grazie a numerose prove condotte su provini prismatici; successivamente è stata sviluppata la modellazione di spezzoni di rotaie prelevati dall'esercizio con diversi gradi di usura.

Il presente lavoro descrive il modello e le procedure svolte per la sua taratura; inoltre descrive i suoi attualmente numerosi limiti ed indica le linee guida per gli sviluppi futuri sia in termini di processo tecnologico per la pratica applicazione linea sia per il miglioramento della modellazione numerica.

## **2. CARATTERISTICHE DEL PROCESSO DI TEMPRA LASER**

Nei processi di tempra tradizionali degli acciai il riscaldamento può essere massivo (riscaldamento in forni) o ristretto a zone relativamente limitate (fiamma, induzione ad alta frequenza); in ogni caso il raffreddamento deve essere fornito esternamente al processo stesso tranne in casi molto particolari.

Nella tempra laser si riscalda solo un sottile strato di materiale superficiale, lasciando praticamente inalterato il materiale al suo interno; grazie alla selettività del riscaldamento della superficie pezzo e all'elevata potenza specifica del fascio, non sono richiesti mezzi esterni di raffreddamento e la tempra avviene per conduzione quando la parte non direttamente riscaldata dal laser produce un rapido raffreddamento della zona riscaldata.

Quando il fascio laser colpisce la superficie del pezzo parte della sua energia viene assorbita dal pezzo stesso sottoforma di calore. Se la densità di potenza del fascio è sufficientemente alta, il calore trasferito alla superficie sarà più alto di quello, che per conduzione, si trasmette dall'esterno verso l'interno del pezzo e di conseguenza la temperatura superficiale aumenterà rapidamente. Questo comporta che, in breve intervallo di tempo, un sottile strato di materiale raggiunga la temperatura di austenizzazione, mentre il cuore del pezzo è ancora freddo ed è responsabile del successivo raffreddamento.

Mentre per i processi di taglio al laser vengono impiegati fasci laser operanti nella zona prossima al punto di massima focalizzazione per aumentare la potenza specifica, nei trattamenti termici vengono solitamente usati fasci laser con una distribuzione di energia al suo interno il più uniforme possibile; inoltre per allargare la zona trattata il fascio laser è opportunamente defocalizzato. Tra i principali parametri di processo vi sono la densità di potenza, la velocità di avanzamento e forma e dimensione (spot) del fascio; selezionando opportunamente tali parametri il materiale sarà temprato con una desiderata profondità. I maggiori vantaggi del trattamento di tempra superficiale al laser sono lo stretto controllo della potenza in ingresso in funzione del materiale da trattare, la possibilità di concentrare elevate densità di energia in determinate aree, quindi alta selettività e precisione di trattamento, e le ridottissime distorsioni termiche.

Negli ultimi anni la tecnologia laser ha trovato numerosi sbocchi in campo industriale, incluso i trattamenti termici; tuttavia sono emersi alcuni svantaggi che possono limitarne gli impieghi pratici, quali la necessità di equipaggiare la macchina laser di un insieme di sistemi ottici particolari in modo da ottenere un fascio laser di opportune geometrie e caratteristiche, la necessità di trattare o rivestire la superficie del pezzo in modo tale da aumentare il coefficiente di assorbimento del fascio laser da parte

degli acciai, in quanto gli acciai sono fortemente riflettenti, e la relativamente bassa velocità di trattamento.

### 3. MODELLAZIONE FEM DEL PROCESSO

Una delle principali problematiche relative alla modellazione del processo di tempra laser è quella della determinazione del campo di temperatura che si ottiene nei vari istanti temporali all'interno del materiale sottoposto al trattamento. Conoscendo infatti l'evoluzione temporale della temperatura nei diversi punti del volume è possibile stabilire se in tali punti sono soddisfatti i requisiti, in termini di temperatura raggiunta e velocità di riscaldamento / raffreddamento, che portano alla formazione della martensite e di conseguenza alla effettiva tempra del materiale.

Sono stati pertanto realizzati una serie di modelli agli elementi finiti in grado di fornire come risultato finale l'evoluzione temporale del campo di temperatura interno ad una serie di geometrie di provino. Lo scopo di tali modelli è quello di ottenere una stima ragionevolmente precisa del campo di temperatura interno al pezzo, in particolar modo della rotaia, sottoposto al processo di tempra al variare dei parametri caratteristici (velocità, potenza del laser, ecc.); il risultato finale è una stima della profondità e della larghezza della zona effettivamente indurita.

I modelli FEM realizzati si basano tutti sulla simulazione del transito del fascio laser, rappresentato come una potenza termica variabile in ingresso, sulla superficie del pezzo da temprare; le superfici libere del pezzo hanno la possibilità di cedere il calore all'ambiente attraverso uno scambio termico per convezione. Il problema si riconduce quindi alla determinazione in regime non stazionario del campo di temperature interno ad un corpo in presenza di scambio termico variabile nel tempo. L'intervallo di tempo considerato nella simulazione è in generale relativo al transito dello spot laser sulla sezione di riferimento.

Tutti i modelli realizzati presentano una serie di caratteristiche comuni: la distribuzione di temperatura è considerata bidimensionale; il materiale ha caratteristiche variabili in funzione della temperatura; il modello è transitorio; l'input attraverso file log con parametrizzazione delle principali caratteristiche geometriche e di processo. Gli output consistono in files di testo contenenti i principali risultati.

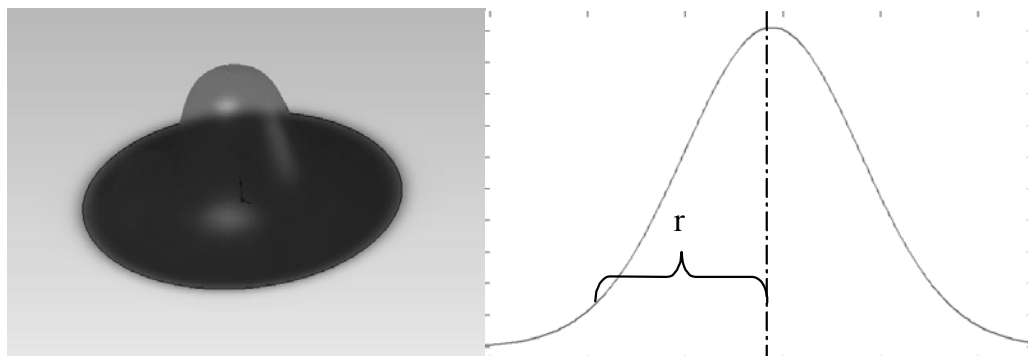
L'ipotesi di campo di temperatura bidimensionale, che trova conferma nella letteratura specifica, consente una notevole semplificazione del modello ed una sensibile diminuzione dei tempi di calcolo senza compromettere sensibilmente l'attendibilità della soluzione, mentre l'utilizzo di caratteristiche del materiale, quali il calore specifico e la conducibilità termica, variabili con la temperatura non è risultato fondamentale ai fini della accuratezza della soluzione nei casi esaminati, però la differenza in termini di tempo di calcolo non è tale da imporre di rinunciare ad una tale caratteristica del modello.

I modelli parametrici sono interamente costruiti attraverso files log di Ansys che contengono la sequenza dei comandi necessari a generare la geometria, applicare i carichi (velocità di avanzamento, potenza del laser, ampiezza del fascio), definire i parametri caratteristici e le condizioni al contorno (coefficienti di assorbimento e di convezione, calore specifico e conducibilità termica del materiale), lanciare la soluzione ed infine ottenere i files di testo contenenti i risultati.

#### 3.1. Determinazione delle grandezze caratteristiche del fascio

L'andamento della densità di potenza all'interno dello spot laser non è costante, ma ha una distribuzione che dipende dal "modo" di emissione del laser; nel presente lavoro si è sempre utilizzato al modo di emissione TEM<sub>00</sub>. Con tale modo di emissione la potenza  $p(r)$  all'interno dello spot ha un andamento di tipo gaussiano (Figura 1), completamente individuato quando siano noti il valore del parametro  $\sigma$  e il valore della costante  $K$  (Eq. 1), dove  $r$  rappresenta la distanza dal centro del fascio di un generico punto. Il valore della costante  $K$  viene calcolato in modo che il volume sotteso alla curva

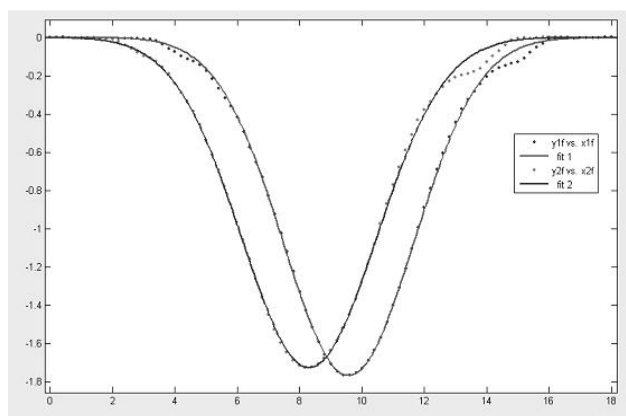
sia pari alla potenza totale del fascio, mentre il valore di  $\sigma$  è un parametro caratteristico del fascio che indica quanto la potenza sia più o meno concentrata verso il centro dello spot.



**Figura 1** Distribuzione di potenza con il fascio in modo TEM<sub>00</sub> e relativa sezione.

$$p(r) = \frac{K_p}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (1)$$

Durante il confronto tra le simulazioni ed i valori misurati si è osservata una notevole dipendenza dei risultati dal valore di  $\sigma$ , per questo motivo si è cercato di valutare sperimentalmente il valore di quest'ultimo parametro nelle condizioni di prova. A questo scopo si sono marcati con delle tracce rettilinee alcune lastre in plexiglas. Supponendo, sulla base dell'esperienza, che con questo materiale la forma della traccia sia molto simile a quella della effettiva distribuzione di potenza del fascio, si è proceduto a misurare l'andamento del profilo in modo da ottenere una stima di  $\sigma$ . La misura delle tracce è stata effettuata utilizzando un tastatore di altezze di precisione, il valore di  $\sigma$  è stato ricavato interpolando ai minimi quadrati i punti ottenuti.



**Figura 2** Punti rilevati e curve interpolanti per tracce ottenute con laser TEM<sub>00</sub> potenza 1000W (*defocus* di 200 mm, dimensione dello spot circa 12 mm).

Nei casi sperimentali per i quali è stata poi effettuata anche la simulazione numerica si sono ottenuti i valori di  $\sigma$  riportati in Tab. 1.

**Tabella 1:** Valori del parametro  $\sigma$  per diversi valori di defocalizzazione

Defocus	$\sigma$ [mm]
+100 mm	1.63
+200 mm	2.58
+250 mm	3.00

### 3.2. Modello di tempra di un provino cilindrico

Il primo dei modelli realizzati nell'ambito del presente lavoro è quello relativo ad una geometria semplice quale quella cilindrica, trattata con il laser in defocalizzazione semplice (senza scansione). Poiché il modello è bidimensionale la geometria si riduce ad un rettangolo, in questo modo trascurando gli effetti di bordo nel momento in cui il laser arriva ed esce dalla superficie superiore del provino. Su un lato del rettangolo viene applicato il carico, sotto forma di potenza termica variabile in funzione della posizione e del tempo; su tre lati, compreso quello sul quale è applicato il carico, viene applicata una convezione con i valori tipici dell'aria ferma, mentre sul quarto lato, vista la geometria del problema, viene imposto un vincolo di simmetria.

In ogni passo di soluzione (load step) il carico viene generato come segue:

1. calcolo della distanza del centro del fascio rispetto alla linea dove giacciono i punti da caricare, questa distanza giace sul piano perpendicolare a quello del modello. Tale distanza cambia ad ogni passo in funzione della durata del passo stesso e della velocità di avanzamento del fascio.
2. calcolo della distanza di ciascun punto da caricare dal centro del fascio.
3. in base alla distanza calcolata al punto 2 si determina, assegnati i parametri  $K$  e  $\sigma$ , il valore della potenza da assegnare a ciascun punto.

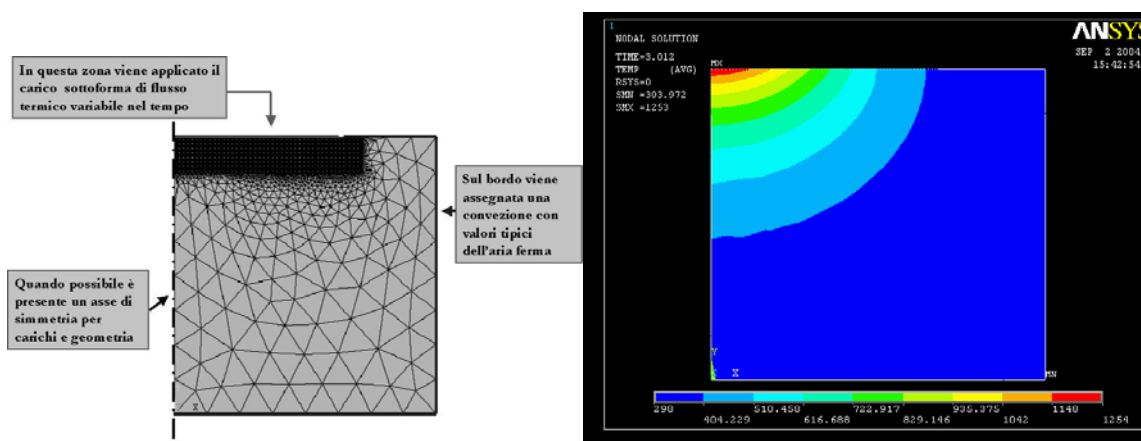
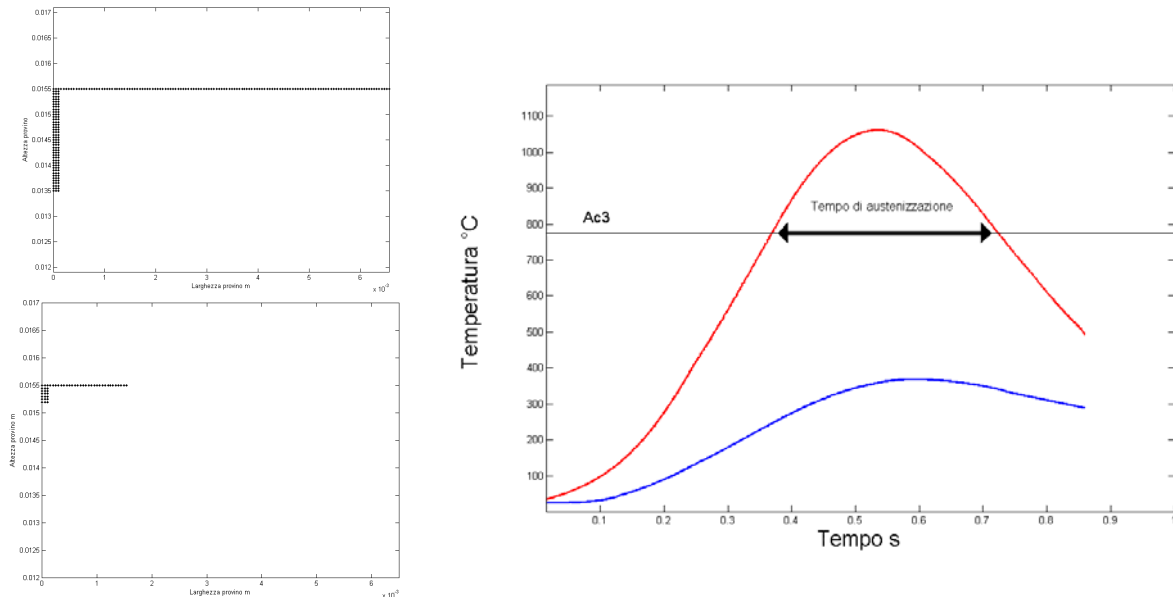


Figura 3 Modellazione e campo di temperatura istantaneo all'interno del provino cilindrico

L'output principale del modello è costituito da tre files di testo che contengono le informazioni necessarie alla stima della profondità di tempra, cioè l'andamento temporale della temperatura in un certo numero di punti del modello scelti in modo da poter stimare la profondità e la larghezza della zona temprata.

Nello stimare le dimensioni della zona temprata si è fatta l'ipotesi che i cambiamenti di fase all'interno del materiale avvengano sempre in modo completo e con velocità tali da garantire l'effettiva formazione di martensite. Questa ipotesi si basa sulla normale esperienza relativa ai processi di tempra laser e tiene conto del fatto che comunque l'andamento delle curve caratteristiche dei processi di tempra laser è sostanzialmente molto diverso da quello dei processi classici.

In base a quanto esposto precedentemente il processo di stima delle dimensioni può essere riassunto nella ricerca dei punti più distanti dalla superficie e dall'asse del profilo in prova che superano la temperatura  $A_{c3}$  di austenitizzazione. In pratica, partendo da un insieme di punti definiti a priori, per ognuno di questi si controlla che durante il tempo del processo la temperatura risulti maggiore di  $A_{c3}$  (Figura 4). In figura 4 viene riportato l'esempio di due storie temporali di temperatura corrispondenti a due punti diversi di cui una supera la temperatura  $A_{c3}$  e quindi viene considerato temprato, l'altra rimane sempre sotto tale temperatura e pertanto viene considerato non temprato.



**Figura 4** Posizione dei punti su cui viene effettuato il controllo delle storie temporali di temperatura (a sinistra, in alto); insieme dei punti che risultano temprati dopo il controllo (a sinistra, in basso). Storie temporali di temperatura per due diversi punti, di cui uno supera la temperatura  $Ac_3$  e quindi viene considerato temprato (a destra).

In funzione delle capacità di calcolo disponibili è possibile controllare un insieme di punti più grande e quindi ottenere maggiori informazioni sulla forma della zona temprata; si tenga presente a tale proposito che ogni punto che si aggiunge all'insieme richiede il salvataggio di un numero di informazioni pari al numero di passi di soluzione, che può oscillare tra i circa 250 per i molli semplici a circa 2000 per i modelli in scansione.

#### 4. TARATURA DEL MODELLO SU PROVINO CILINDRICO

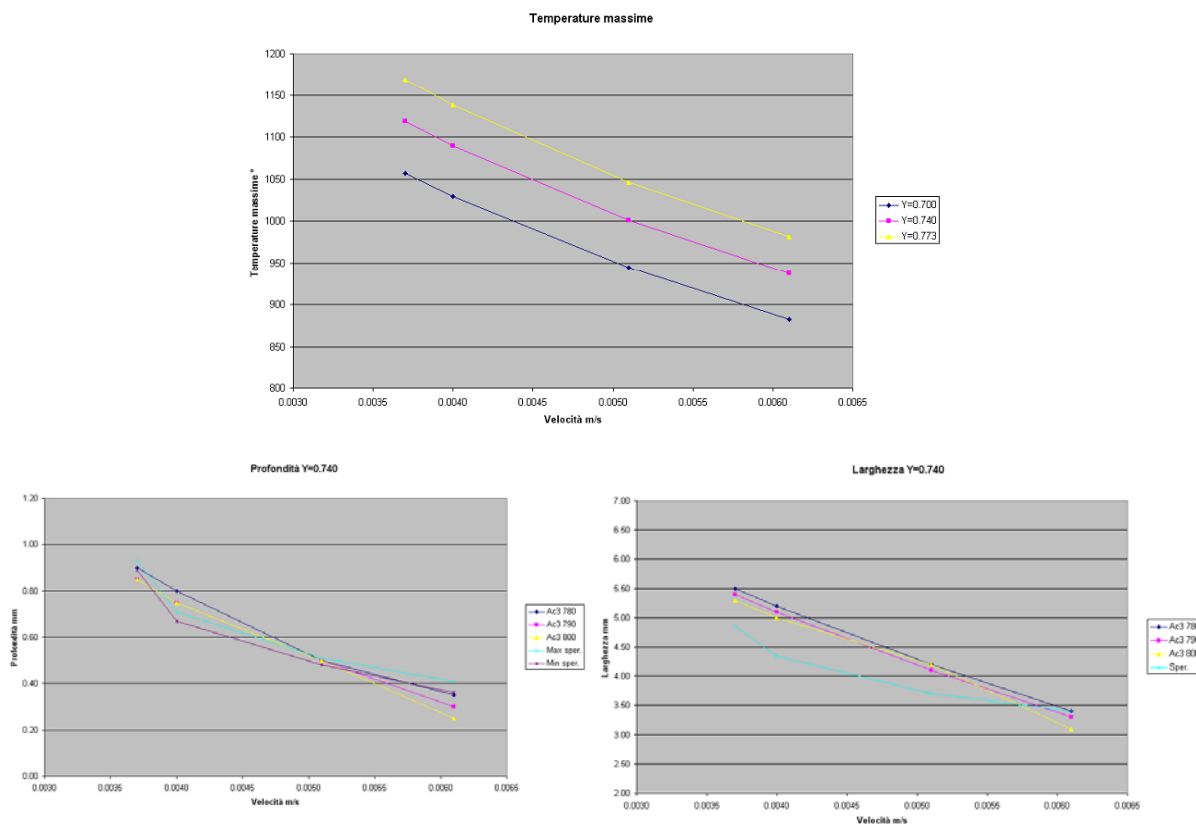
Poiché risulta praticamente impossibile misurare sperimentalmente l'andamento di un campo di temperatura così intenso e rapido come quello che si ottiene durante la tempra laser, la taratura dei modelli FEM è stata effettuata confrontando direttamente le dimensioni delle zone temprate nei provini sperimentali, con la previsione di zona temprata ottenuta attraverso il calcolo.

Durante l'attività si sono resi disponibili un discreto numero di dati sperimentali relativi al trattamento di provini cilindrici con tempra non in scansione, potendo quindi procedere alla taratura del modello più semplice. La taratura del modello è stata effettuata su provini cilindrici di 30NiCrMo4, utilizzando una macchina con un laser con potenza di 1000W e facendo variare il diametro dello spot laser attraverso lo spostamento del piano di fuoco su due posizioni (+200 mm e +250 mm, corrispondenti rispettivamente a circa 15 mm e 18 mm di diametro) e la velocità di avanzamento dello spot. I provini utilizzati sono stati trattati con della grafite spray per migliorare l'assorbimento del laser, che altrimenti, su di una superficie lucida, risulterebbe molto basso.

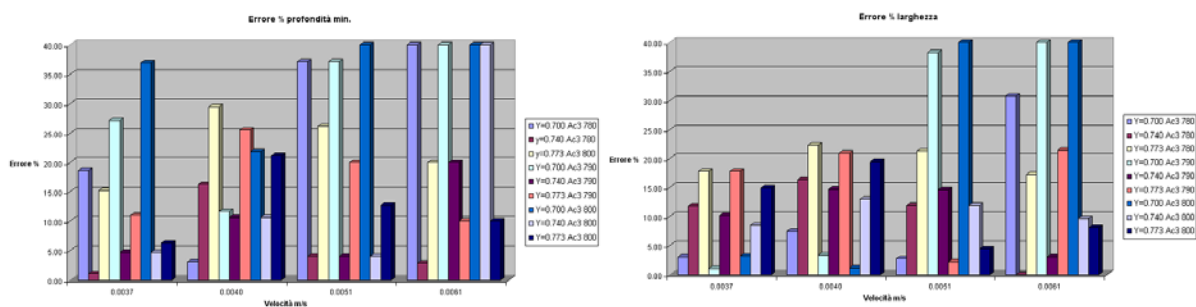
Una volta fissata la velocità di avanzamento del fascio si osserva come il parametro che più influenza i risultati (figura 5) è il coefficiente di assorbimento  $Y$ , che rappresenta la quota parte di energia incidente che viene assorbita dal materiale. La variazione di  $Y$  tiene conto dei diversi fattori ambientali che condizionano il processo (temperatura ambientale, aspirazione dei fumi, distribuzione dello strato di grafite sul pezzo).

I valori di profondità e larghezza dello stato temprato calcolato e sperimentale sono stati confrontati e, soprattutto nella stima della profondità, è sempre possibile arrivare ad un valore di  $Y$  per cui gli errori rimangono piuttosto contenuti (figura 6). Una volta tarato il valore del parametro  $Y$  caratteristico

delle condizioni di processo, la stima delle dimensioni della zona temprata al variare dei parametri caratteristici di processo risulta stabile e corretta.



**Figura 5** Andamento della temperatura massima in funzione della velocità di avanzamento e del valore del parametro Y (in alto); andamento della profondità (in basso a sinistra) e della larghezza (in basso a destra) di tempra in funzione della velocità di avanzamento del fascio. Le curve sono relative alle misure sperimentali ed alla stima effettuata con valore di  $Ac3=780\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



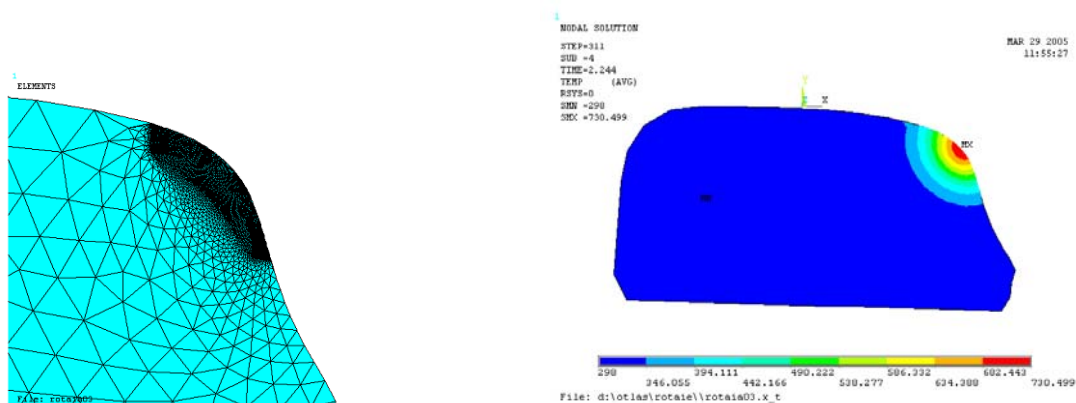
**Figura 6** Andamento dell'errore sulla stima della profondità (a sinistra) e della larghezza (a destra) in funzione della velocità di avanzamento del fascio e per diversi valori di Y e Ac3.

## 5. LA MODELLAZIONE DELLE ROTAIE FERROVIARIE

L'utilizzo di un modello come quello sviluppato può risultare utile nella stima della potenza e della velocità di avanzamento richieste nel processo di tempra laser delle rotaie in opera. Soprattutto la velocità riveste importanza fondamentale per definire la "produttività" dell'apparecchiatura di trattamento, dato che i tempi a disposizione durante le interruzioni dell'esercizio sono notoriamente piuttosto brevi (al massimo dell'ordine di qualche ora).



Dati gli incoraggianti risultati ottenuti con il modello relativo al provino cilindrico, si è pertanto realizzata una serie di modelli con geometria specifica della rotaia, in varie configurazioni di usura, che simulano il processo di tempra in condizioni più simili a quelle reali (figura 7).

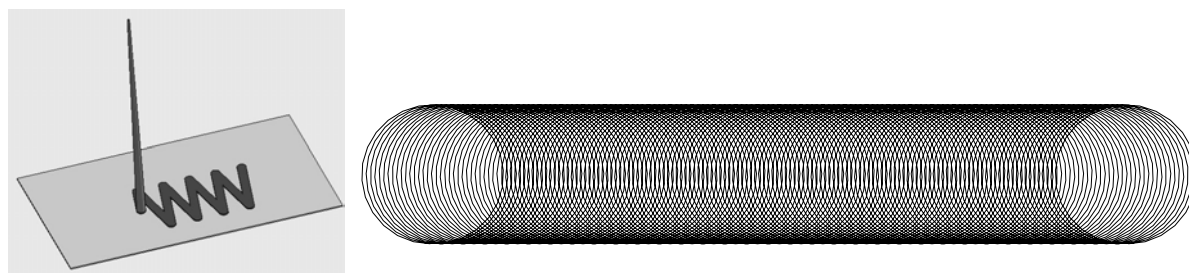


**Figura 7** Esempio di *mesh* FEM del fianco attivo di una rotaia già usurata (a sinistra) e andamento del campo di temperature all'interno della testa della rotaia durante la simulazione.

Il modello relativo alla geometria della rotaia permette di importare l'effettiva geometria della sezione e di impostare i principali parametri, analogamente a quanto avviene sul provino cilindrico; la differenza principale è che la defocalizzazione del fascio laser risulta variabile poiché lo stesso non colpisce una superficie piana. Tale caratteristica è stata implementata nel modello FEM facendo variare linearmente la dimensione dello spot e del parametro  $\sigma$  in funzione del punto colpito sulla superficie curva della rotaia. Nel caso si volesse eseguire il trattamento nella zona centrale del profilo della rotaia, utile per ridurre i fenomeni di corrugazione, si può utilizzare una dimensione dello spot costante, come nel caso del provino cilindrico dato il grande raggio della rotaia nella zona citata.

In base a considerazioni pratiche la larghezza da trattare su di una rotaia risulta dell'ordine dei 15-30 mm, che con le velocità di avanzamento utilizzate e le relative larghezze ottenute comporta necessariamente l'utilizzo di più fasci o il passaggio di uno stesso fascio su più linee parallele, aumentando o la complicazione della macchina oppure il tempo necessario ad eseguire il trattamento. Fra le possibili soluzioni investigate vi sono quelle dell'utilizzo del laser *in scansione*, ovvero con un moto del fascio laser che si sviluppa sia in lungo l'asse longitudinale della rotaia che trasversalmente ad esso, oppure con un moto cicloidale (figura 8), cercando in ambedue i casi di distribuire l'energia su di una fascia di materiale più larga mantenendo velocità di avanzamento non troppo basse.

Dai modelli realizzati per la simulazione di questi processi e, soprattutto, dai risultati di specifiche prove sperimentali, è stato riscontrato come l'utilizzo di traiettorie rettilinee produca negli spigoli inversioni della velocità in tempi molto ristretti ed un andamento della stessa variabile durante il movimento trasversale che non sono facilmente modellabili. Per contro nel caso con traiettoria cicloidale si è rilevato un maggior accordo tra i dati sperimentali e quelli calcolati e, di maggior interesse, una comunque maggiore uniformità delle dimensioni della zona temprata.



**Figura 8** Schematizzazione del processo di tempra in scansione con traiettorie rettilinee e cicloidale.

## 6. CONCLUSIONI

Le attività svolte nell'ambito del presente lavoro hanno permesso di valutare le caratteristiche minime richieste per la modellazione agli elementi finiti del processo di tempra laser.

La realizzazione del modello relativo al provino cilindrico ha permesso di comprendere i meccanismi che stanno alla base del fenomeno di scambio termico durante il processo di tempra laser e di impostare le caratteristiche generali del modello stesso che siano in grado di portare ad una soluzione plausibile del problema.

La successiva fase di confronto dei risultati numerici e sperimentali ha permesso di individuare le grandezze che maggiormente influenzano il problema e che in questa fase possono essere individuate nella deviazione standard della distribuzione di potenza del laser e nel valore del coefficiente di assorbimento  $Y$ . Una volta individuato un valore corretto di  $Y$ , il modello si comporta in maniera del tutto stabile. La stima delle dimensioni della zona temprata a partire dal campo di temperatura è in questa fase ancora molto semplificata, tuttavia essendo il comportamento del materiale durante la tempra laser diverso da quello che si ha nella tempra tradizionale, e non essendo disponibili per questa curve caratteristiche di raffreddamento (TTT o CCT), in questo lavoro si è ritenuto di non complicare ulteriormente questa parte della modellazione.

Poiché l'unico sistema per la taratura del modello passa attraverso il controllo delle dimensioni della zona temprata, tale processo del risente delle semplificazioni che si introducono nel passare dai risultati in termini di temperatura a quelli in termini di dimensioni dello strato temprato.

L'utilizzo dei modelli FEM permette di valutare le potenze di massima necessarie ad un eventuale trattamento in linea delle rotaie ferroviarie e di stimare l'ampiezza delle zone temprate. Nell'ambito del lavoro sono state inoltre sviluppati modelli comprendenti la geometria reale della rotaia e la possibilità di simulare il metodo di tempra in scansione, modelli che permetteranno valutazioni pratiche sulle possibilità reali di applicazione del metodo per la tempra in opera delle rotaie.

In parallelo all'attività descritta nella presente memoria è al momento in programma un'attività sperimentale per la verifica delle reali prestazioni della rotaia sottoposta al trattamento di tempra laser in termini di miglioramento delle prestazioni in termini di usura, monitorando al contempo fenomeni di eventuale insorgenza di difetti localizzati o altri fenomeni di fatica da contatto volvente.

## BIBLOGRAFIA

- [1] R. Bokota, S. Iskierka, Thermal analysis of the laser transformation hardening process, *International journal of heat and mass transfer* (44) 2001.
- [2] A. Komanduri, Z. B. Hou, Numerical simulation of transient and residual stresses caused by laser hardening of slender elements, *Computational Materials Science* (7) 1997.
- [3] A. Yànez, J. C. Alvarez, A. J. Lòpez, G. Nicolàs, J. A. Pérez, A. Ramil, E. Saavedra, Modelling of temperature evolution on metals during laser hardening process, *Applied Surface Science* (186) 2002.
- [4] R. Bokota, S. Iskierka, Numerical prediction of hardened zone in laser treatment of carbon steel, *Acta Metallurgica* (2) n.2 1996.