

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



**FAILURE ANALYSIS DI FORGIATI DI GRANDI DIMENSIONI:  
PROBLEMATICHE RELATIVE AL TRATTAMENTO DI TEMPRA**

Relatore: Marco Virginio BONIARDI

Co-relatori: Ing. Riccardo ANDREOTTI  
Ing. Andrea CASAROLI

Tesi di Laurea di:

Filippo BALLERINI

# Indice Generale

## Introduzione

<b>1</b>	<b>Gli elementi finiti</b> .....	1
1.1	Modello strutturale .....	2
1.2	Modello termico .....	6
1.3	Modello termo-strutturale.....	8
<b>2</b>	<b>La tempra</b> .....	10
<b>3</b>	<b>Taratura del coefficiente convettivo</b> .....	14
3.1	Generalità .....	14
3.2	Analisi al calcolatore .....	17
3.2.1	Prova esponenziale.....	18
3.2.2	Prova modello fisico .....	22
<b>4</b>	<b>Analisi albero di grosse dimensioni</b> .....	27
4.1	Generalità .....	29
4.2	Analisi termica .....	29
4.3	Analisi termo-strutturale.....	39
4.4	Risultati analisi termo-strutturale .....	42
4.5	Tecnica di prevenzione della rottura .....	48
4.5.1	Generalità.....	48
4.5.2	Risultati parte termica .....	49
4.5.3	Risultati parte termo-strutturale .....	56
4.6	Conclusioni.....	60
<b>5</b>	<b>Provino</b> .....	62
5.1	Generalità .....	62
5.2	Risultati parte termica .....	64
5.3	Risultati parte termo-strutturale.....	67
5.4	Conclusioni.....	69
<b>6</b>	<b>Virole</b> .....	71
6.1	Virola grande tozza .....	71
6.1.1	Risultati parte termica .....	72
6.1.2	Risultati parte termo-strutturale .....	74
6.2	Virola grande snella.....	79
6.2.1	Risultati parte termica .....	80

6.2.2	Risultati parte termo-strutturale .....	82
6.3	Viola piccola tozza.....	86
6.3.1	Risultati parte termica .....	87
6.3.2	Risultati parte termo-strutturale .....	90
6.4	Viola piccola snella .....	94
6.4.1	Risultati parte termica .....	95
6.4.2	Risultati parte termo-strutturale .....	98
6.5	Conclusioni.....	101
7	<b>Alberi</b> .....	103
7.1	Albero 5 metri .....	103
7.1.1	Risultati parte termica .....	103
7.1.2	Risultati parte termo-strutturale .....	108
7.2	Albero 3 metri .....	111
7.2.1	Risultati parte termica .....	111
7.2.2	Risultati parte termo-strutturale .....	115
7.3	Conclusioni.....	118
8	<b>Conclusioni</b> .....	119
	<b>Bibliografia</b> .....	121
	<b>Appendice A</b> .....	122
	<b>Appendice B</b> .....	134
	<b>Appendice C</b> .....	148
	<b>Appendice D</b> .....	152
	<b>Appendice E</b> .....	156
	<b>Appendice F</b> .....	160
	<b>Appendice G</b> .....	164
	<b>Appendice H</b> .....	168
	<b>Appendice I</b> .....	172

## Sommario

Durante il trattamento termico di tempra di un componente, nascono delle tensioni interne dovute alle curve di raffreddamento differenti in diverse zone e alla formazione di differenti costituenti strutturali in momenti diversi. Al termine del trattamento rimangono inevitabilmente delle tensioni residue, che possono, in alcuni casi, portare a rottura il pezzo. La tesi introduce un modello, basato sugli elementi finiti, che permette di valutare l'entità e la pericolosità del trattamento termico per pezzi di grandi dimensioni.

**Parole chiave:** Tempra, forgiatura, metodo elementi finiti.

## Abstract

During quenching, internal stress occur due to various cooling curves in different area and various structural costients in different moments. At the end of the treatment, residual stress will inevitably remain and, in some circumstances, they can be responsible for the breaking of the component. The thesis is aimed at introducing a model based on finite elements method which allows the assessment of both the entity and dangerousness of quenching for large sized pieces

**Keywords:** Quenching, forging, finite element method.

# Introduzione

Pezzi in acciaio spesso subiscono un trattamento di tempra atto a migliorarne le proprietà meccaniche. Al termine del raffreddamento, all'interno del componente, nascono così delle tensioni residue. Queste nascono per due motivi:

- A causa della trasformazione dei costituenti strutturali in momenti diversi in zone diverse. In superficie, si ha la trasformazione, che comporta sempre un'espansione di volume partendo dall'austenite, anticipata rispetto al cuore. Ciò può portare a snervamento in superficie. Quando si ha la trasformazione al centro della struttura l'espansione provocata comporta delle tensioni residue di compressione a cuore e di trazione in superficie.
- A causa delle differenti curve di raffreddamento fra superficie e cuore del pezzo. Con l'abbassarsi della temperatura, si ha una contrazione termica. Ciò può portare a deformazione plastica in superficie. Una volta che anche il centro del componente si è raffreddato, quindi contratto, risulterà sottoposto ad uno sforzo di trazione, mentre la superficie risulterà compressa.

Per pezzi di piccole dimensioni, il primo fenomeno è dominante. Per pezzi di grandi dimensioni invece, è dominante la seconda componente.

Si analizzeranno quindi differenti pezzi, attraverso un modello agli elementi finiti, per individuare le criticità dei trattamenti di tempra. In primo luogo, verrà fatta la taratura del coefficiente di convezione termica  $h$ . Successivamente, si studia un componente che presenta una rottura fragile durante il rinvenimento. Si propone quindi un trattamento termico alternativo che permetta di evitare la rottura del componente. Si valuta l'efficienza di questo trattamento.

Come ulteriore verifica, il modello agli elementi finiti è applicato a diversi componenti: quattro virole e due alberi di dimensioni differenti e un provino di piccole dimensioni.

## Capitolo 2

### La tempra

La tempra è un trattamento termico realizzato per migliorare la resistenza meccanica di un acciaio. Il procedimento consiste, in una prima fase, nel portare la temperatura del pezzo oltre il punto  $A_{c3}$ . Al riscaldamento segue un mantenimento dell'acciaio a temperatura elevata, in modo da consentire la formazione di una struttura omogenea completamente austenitica. Infine vi è una fase di raffreddamento sufficientemente veloce da consentire la formazione di una struttura martensitica.

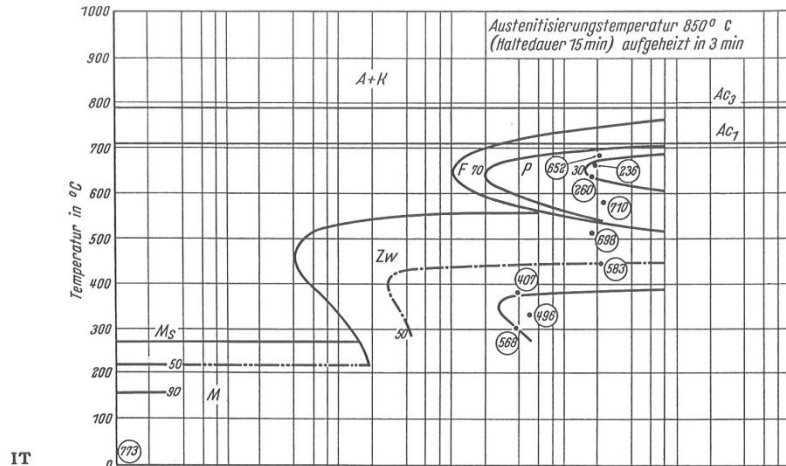
La cinetica di raffreddamento caratterizza significativamente le proprietà ottenute dal pezzo dopo il trattamento termico. Velocità elevate conducono a strutture prevalentemente martensitiche, mentre velocità più modeste comportano solitamente che i costituenti strutturali ottenuti siano prevalentemente bainitici. Nel primo caso (raffreddamento veloce) la struttura ottenuta, appunto prevalentemente martensitica, conferisce in genere al componente una elevata durezza e una notevole resistenza meccanica.

Per valutare i costituenti strutturali ottenuti alla fine del trattamento, è necessario l'uso delle curve CCT, di cui si può vedere un esempio nella figura 2.1 Tali curve sono associate a composizioni chimiche precise: infatti, ogni elemento contenuto nell'acciaio ha una influenza più o meno marcata sull'andamento di questi diagrammi.

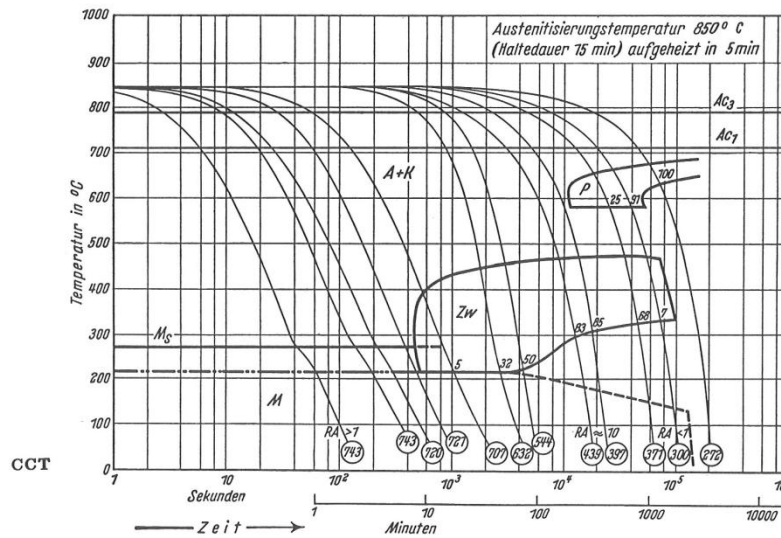
La martensite, presenta una elevata durezza a causa della scarsa solubilità degli atomi di carbonio all'interno del reticolo cristallino  $\alpha$ . Con un raffreddamento brusco, non vi è tempo sufficiente per permettere la diffusione degli atomi di carbonio all'interno del reticolo cristallino, il che porta ad una sua notevole distorsione e genera quindi una elevata durezza del componente. Ovviamente, maggiore è la presenza di carbonio nella composizione chimica, maggiore è la distorsione provocata da questo fenomeno. La trasformazione bainitica, invece, provoca distorsioni di entità minori, e quindi ottiene durezze più basse.

56 NiCrMoV 7

Composition: 0.52% C - 0.70% Mn - 0.29% Si - 0.010% P - 0.010% S - 1.09% Cr - 0.43% Mo - 1.72% Ni - 0.14% V  
 Austenitized at 850°C (1562°F)



IT



CCT

- |       |   |       |  |
|-------|---|-------|--|
| A + K | Area for austenite and carbides                     | F     | Area for ferrite formation   |
| K     | Area for carbide formation                          | F + K | Area of nonlamellar eutectoids   |
| P     | Area for pearlite formation                         | Z     | Cementite  |
| O     | Hardness in HV                                      | 10Z   | 10% Cementite  |
| Zw    | Area for intermediate structure (bainite formation) | 1 ; 2 | (refers to numbers on curves) proportion of structure formed, in percent |
| M     | Area for martensite formation                       |       |  |
| RA    | Residual austenite                                  |       |  |

Ac<sub>1b</sub> = 710°C  
 Ac<sub>1e</sub> = 790°C  
 M<sub>s</sub> = 275°C

SOURCE: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, vol 1, Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf, Germany, 1954

Figura 2.1. Curve IT, CCT di un acciaio.

Per governare il trattamento di tempra è possibile operare su due fattori. Il primo è la composizione chimica. Purtroppo non è sempre possibile avere la composizione

chimica ottimale, principalmente a causa dell'elevato costo dei materiali più facilmente temprabili. In genere si opera sul secondo fattore, la velocità di raffreddamento, in quanto più facile da governare. Per modificarla, è possibile cambiare il fluido con cui viene messo a contatto il componente durante il raffreddamento, aumentandone la drasticità (l'acqua ha una drasticità superiore a quella dell'olio che a sua volta è più drastico dell'aria).

Le dimensioni di un componente meccanico influenzano sensibilmente il suo trattamento termico. Per pezzi di elevate dimensioni, il raffreddamento delle zone più interne sarà estremamente più lento di quello in superficie. Questa differenza è proporzionale alla temprabilità dell'acciaio in uso. Esistono prove sperimentali, quale la prova Jominy, che indicano la capacità di un acciaio di essere temprato. Il raffreddamento differente fra cuore e superficie porta alla nascita di sforzi residui causati da due fenomeni diversi.

- Il primo è dovuto alla trasformazione di fase dei costituenti strutturali in istanti di tempo diversi a superficie e a cuore. Infatti, in superficie, si ha la trasformazione, che comporta sempre un'espansione di volume a partire dall'austenite, prima che avvenga a cuore. Ciò può portare anche a snervamento in superficie. Quando si ha la trasformazione al centro della struttura, l'espansione provocata comporta delle tensioni residue di compressione a cuore, e di trazione in superficie.
- Il secondo fenomeno è dovuto direttamente alla differenza di temperatura fra la superficie e il cuore del componente. A temperature più basse, proporzionalmente al coefficiente di dilatazione termica, si ha una contrazione di volume rispetto alle temperature di partenza. In superficie l'eccessiva contrazione può portare a deformazione plastica. Una volta che anche il centro del componente si è raffreddato, quindi contratto, risulterà trazione, mentre la superficie compressa.

**Generalmente, per pezzi di piccole dimensioni, è dominante il primo fenomeno descritto, si avranno quindi tensioni residue di trazione in superficie e di compressione a cuore. Per pezzi di elevate dimensione invece, il contributo della transizione di fase è inferiore a quello dovuto alle differenti contrazioni volumetriche, quindi si avranno tensioni residue di compressione in superficie e di trazione a cuore.**

Le tensioni residue possono essere molto pericolose, in quanto possono provocare una rottura al termine del trattamento termico, nelle lavorazioni successive o, peggio, possono portare a rottura del componente in esercizio.

Per cercare di ridurre l'effetto delle tensioni residue si fa seguire il trattamento termico di rinvenimento a quello di tempra. Tale procedura consente, nella maggior parte dei casi, di recuperare una parte delle tensioni residue create durante il trattamento termico di tempra garantendo l'integrità del pezzo in esercizio. Se le



tensioni residue sono troppo elevate e le dimensioni del pezzo molto grandi, il trattamento termico di rinvenimento può però avere un effetto deleterio. Per pezzi di grandi dimensioni il rinvenimento comporta la riduzione della resistenza meccanica in superficie, quando le tensioni residue all'interno del pezzo sono inalterate. Il decadimento della resistenza può portare alla rottura durante il trattamento termico. Anche le lavorazioni alle macchine utensili, possono provocare rotture. Oppure, le tensioni imposte da una messa in opera del pezzo possono, sommate alle tensioni residue, portare ad un cedimento in esercizio.

## Capitolo 4

### Analisi albero grosse dimensioni

L'oggetto di studio, in questo capitolo è un albero, visibile in figura 4.1, trattato termicamente in modo analogo al provino precedente.

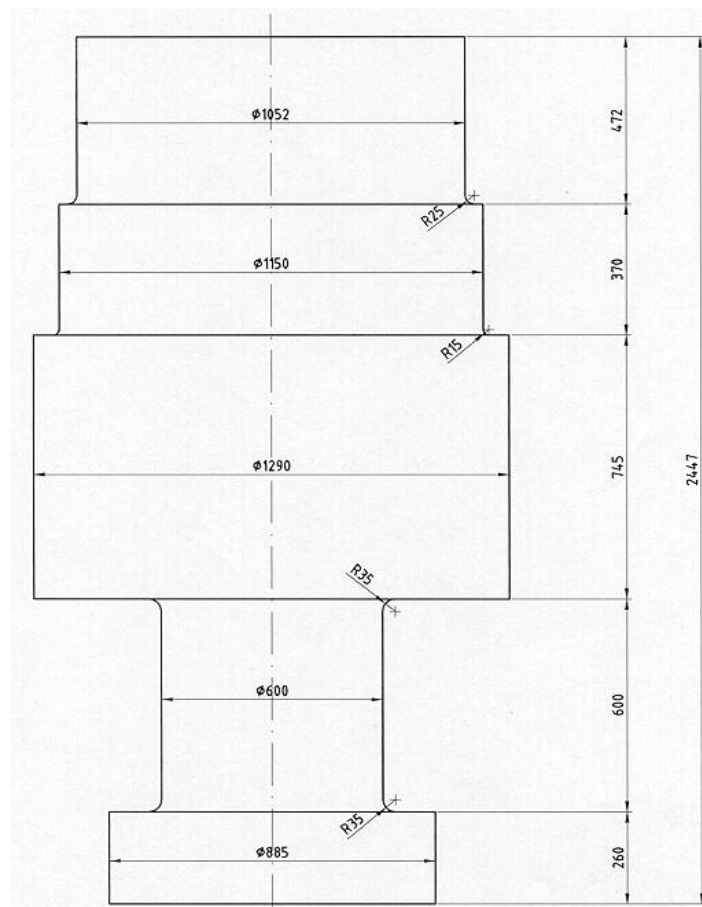


Figura 4.1. Dimensioni dell'albero

Come già ampiamente discusso, successivamente alla tempra, all'interno del pezzo nascono delle tensioni residue. Purtroppo, il rinvenimento del componente provoca la rottura del pezzo. Ciò significa che le sollecitazioni, alla fine del trattamento, sono di entità troppo elevata. La frattura, rappresentata in figura 4.2, è di tipo fragile, con origine all'interno del pezzo. Si presenta con una cricca perpendicolare all'asse di simmetria nella zona centrale, che oltre un certo raggio propaga in più direzioni inclinata di  $45^\circ$ . La morfologia della frattura così come il fatto che la rottura avvenga

di schianto, indicano la probabile equitriassialità degli sforzi all'interno della sezione. Gli obiettivi dell'analisi sono:

- appunto studiare le cause della rottura;
- valutare l'entità delle tensioni residue;
- proporre una soluzione in grado di eliminare il rischio di rottura;
- verificare la bontà della soluzione proposta.

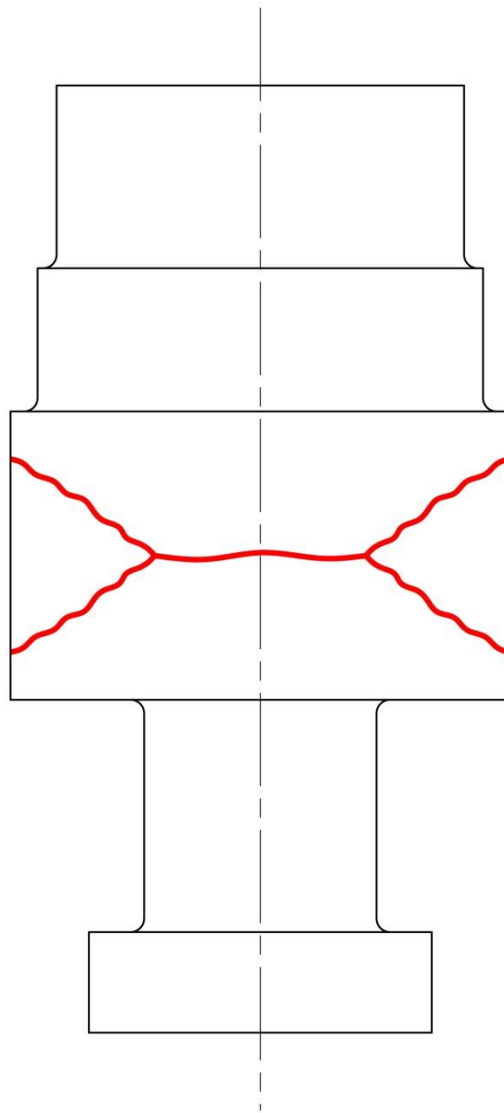


Figura 4.2. Cricche del componente.

## 4.1 Generalità

L'analisi è strutturata in questo modo:

- Per prima cosa il componente viene modellato, si definiscono le proprietà termiche del materiale e le condizioni al contorno;
- Si ricavano le curve di raffreddamento in tutte le zone del pezzo;
- Sovrapponendo queste alla curva CCT si ricavano i costituenti strutturali formati;
- Conoscendo le proprietà di tali costituenti, si può modellare anche la parte strutturale del materiale e l'espansione dovuta alla trasformazione dei costituenti strutturali;
- Si confrontano i risultati e si valutano le cause della rottura;
- Si propone una soluzione per impedire la rottura;
- Infine si verifica l'efficacia delle misure adottate.

Il modello termico usato è identico a quello usato per il pezzo di prova su cui è stata fatta la taratura del coefficiente di scambio termico convettivo. Anche il materiale non cambia, per il quale si fa sempre riferimento alla tabella 3.2. Il pezzo è assialsimmetrico, quindi può essere elaborato dal solutore con elementi bidimensionali shell CAX8RT. La mesh è stata strutturata in modo da ottenere solamente elementi rettangolari, con lati lunghi circa 15mm.

## 4.2 Analisi termica

Nelle figure seguenti si riportano prima le curve delle isoterme all'interno del pezzo dopo rispettivamente 1, 10 e 100, 200 e 400 minuti, successivamente le curve di raffreddamento per le varie sezioni, a differenti distanze dall'asse. Sono sovrapposte alle curve CCT per valutare i costituenti strutturali che si formano.

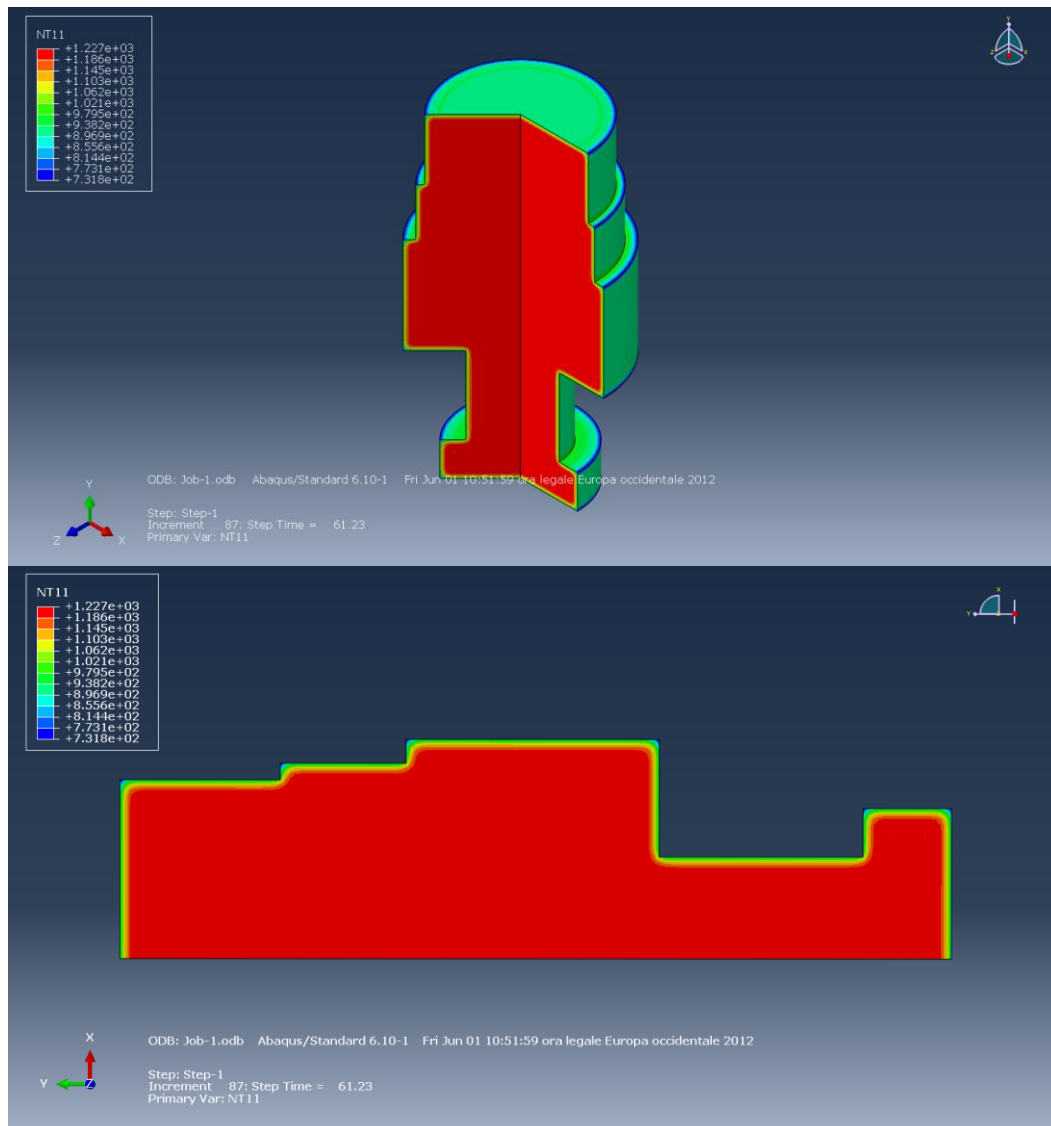


Figura 4.3. Temperatura [°K] dopo 1 minuto e dettaglio.

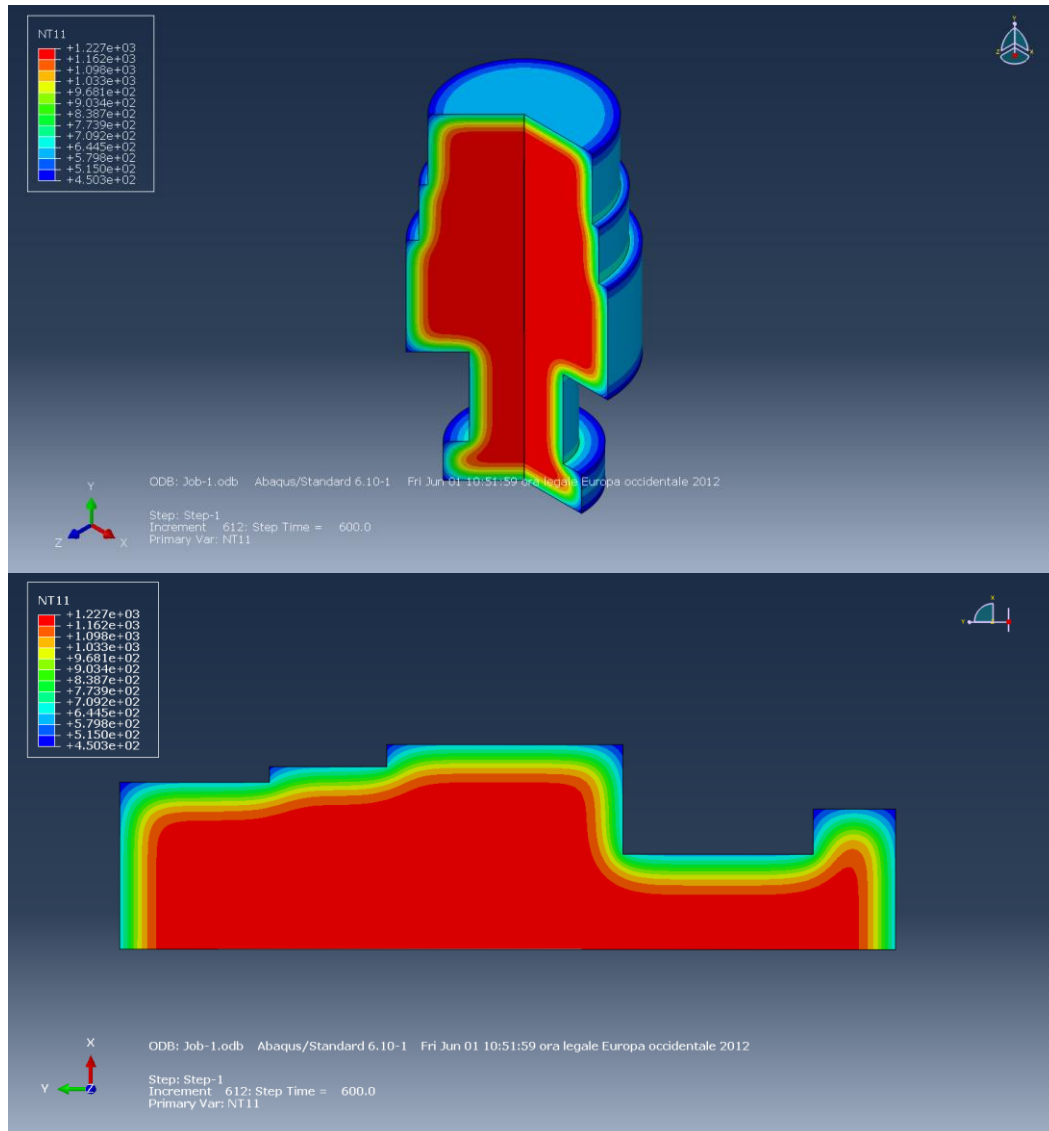


Figura 4.4. Temperatura [°K] dopo 10 minuti e dettaglio.

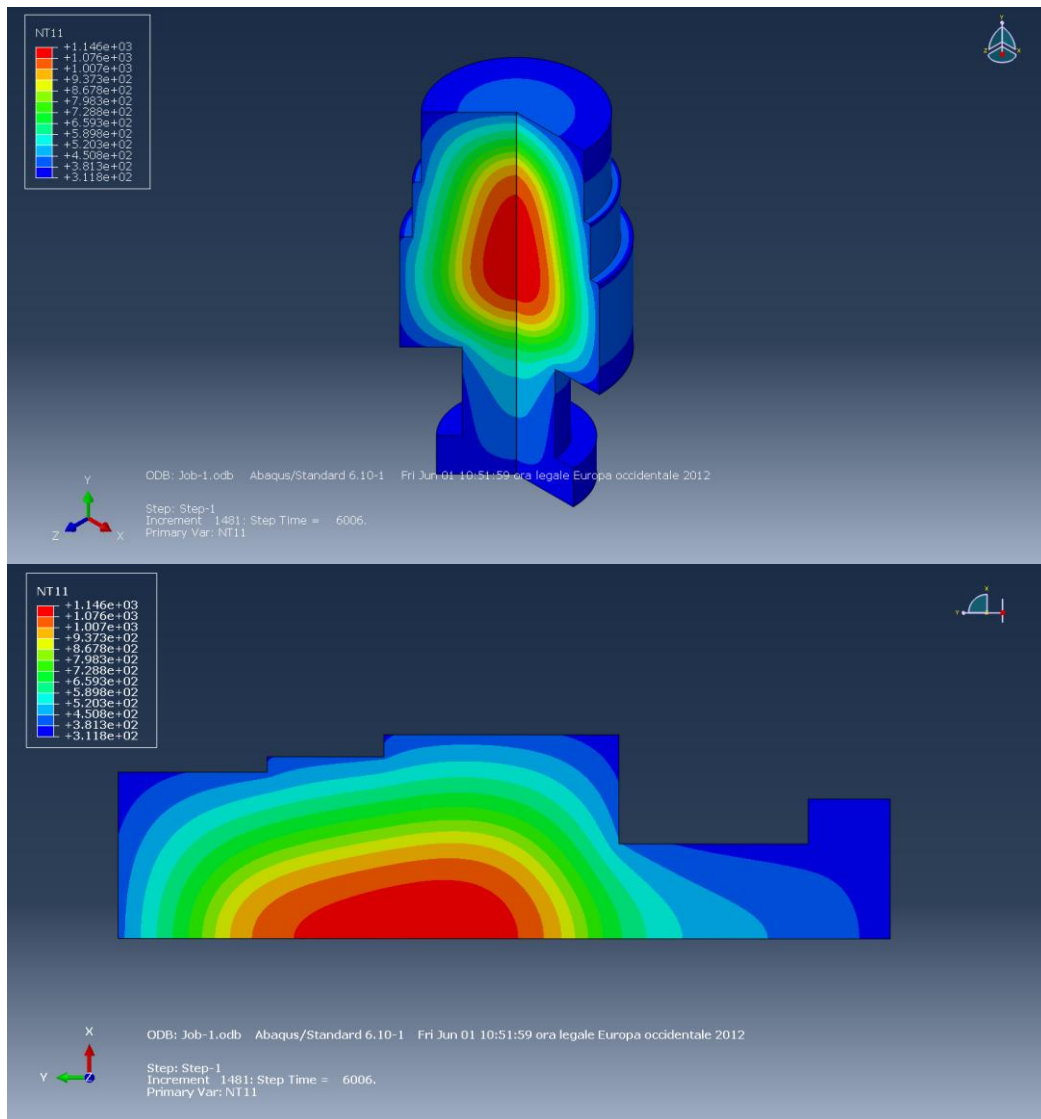


Figura 4.5. Temperatura [°K] dopo 100 minuti e dettaglio.

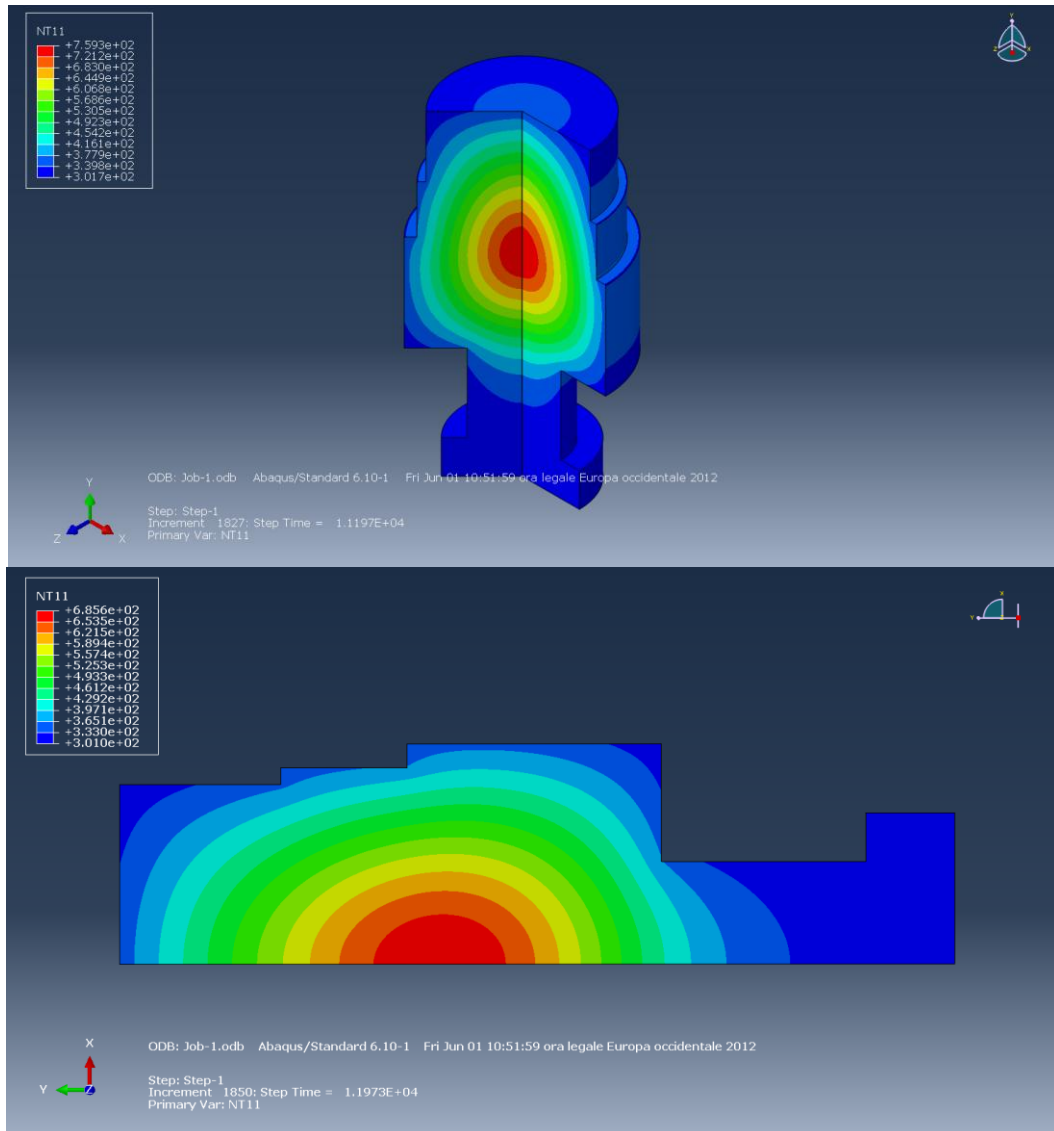


Figura 4.6. Temperatura [ $^{\circ}$ K] dopo 200 minuti e dettaglio.



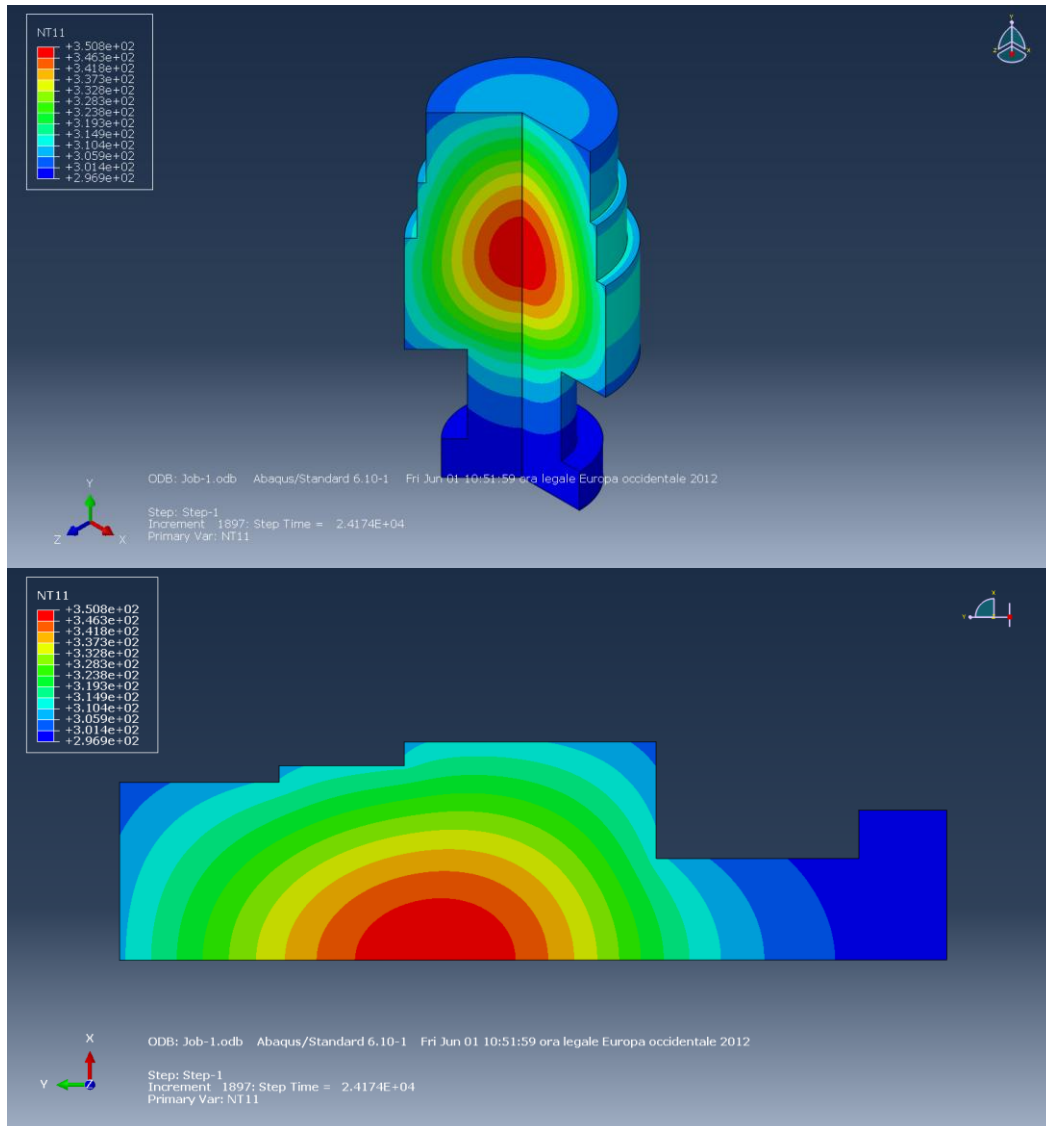


Figura 4.7. Temperatura [ $^{\circ}\text{K}$ ] dopo 400 minuti e dettaglio.

Da queste immagini, si evince che dopo un minuto, figura 4.3, il raffreddamento è limitato a profondità estremamente basse, le quali mantengono comunque delle temperature discretamente alte (intorno a  $500^{\circ}\text{C}$ ). Dopo 10 minuti, figura 4.4, il raffreddamento è quasi del tutto completato soltanto in alcune zone molto esterne. Dopo 100 minuti, figura 4.5, il pezzo presenta soltanto un cuore molto caldo e delle zone completamente raffreddate. Dopo 200 minuti, figura 4.6, il pezzo è quasi completamente raffreddato, vi è solo una piccola zona centrale a  $410^{\circ}\text{C}$ . Dopo 400 minuti, figura 4.7, il pezzo è completamente raffreddato, anche nelle parti più interne, che non superano gli  $80^{\circ}\text{C}$ .

### Curve di raffreddamento

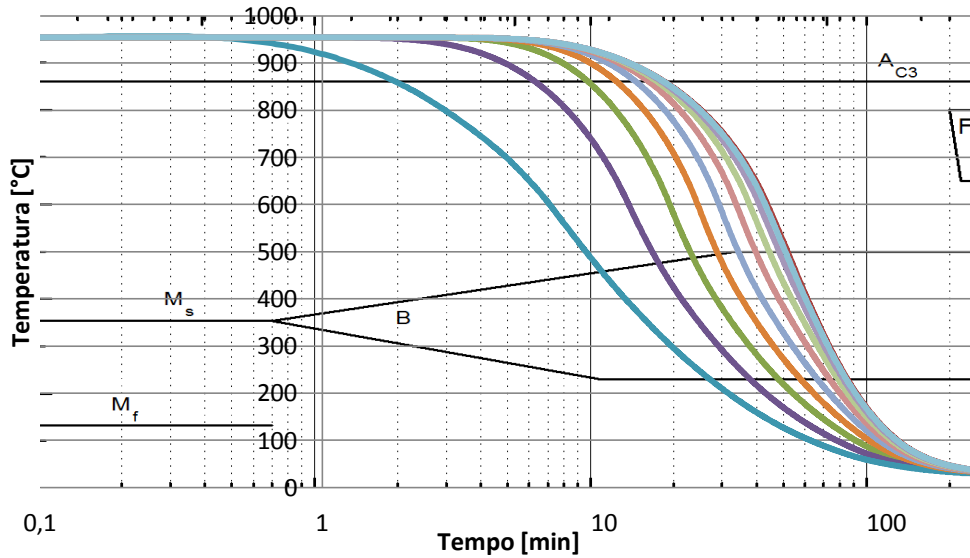


Figura 4.8. Curve di raffreddamento per il centro della sezione a diametro 885mm.

### Curve di raffreddamento

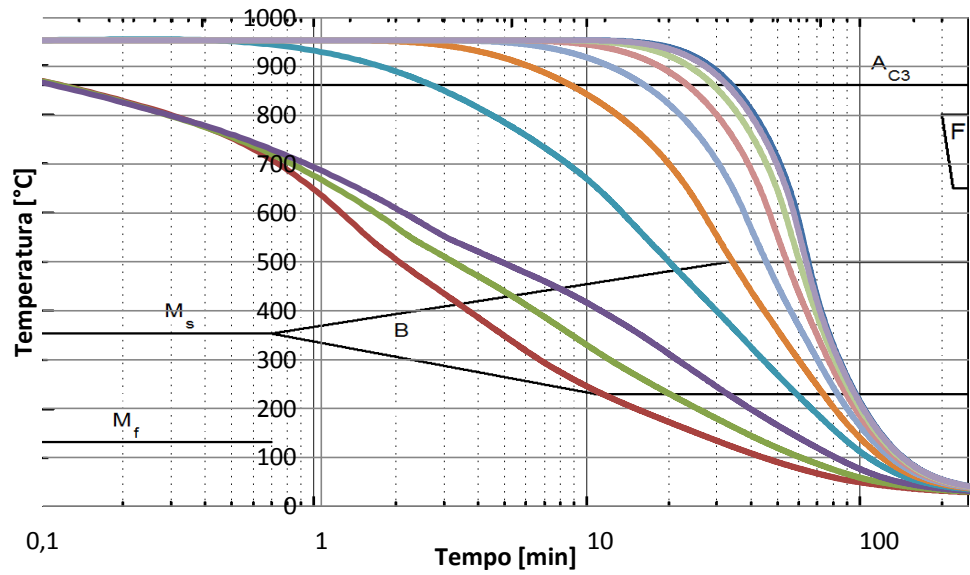


Figura 4.9. Curve di raffreddamento per la regione di contatto fra le zone a diametro 885mm e 600 mm.

### Curve di raffreddamento

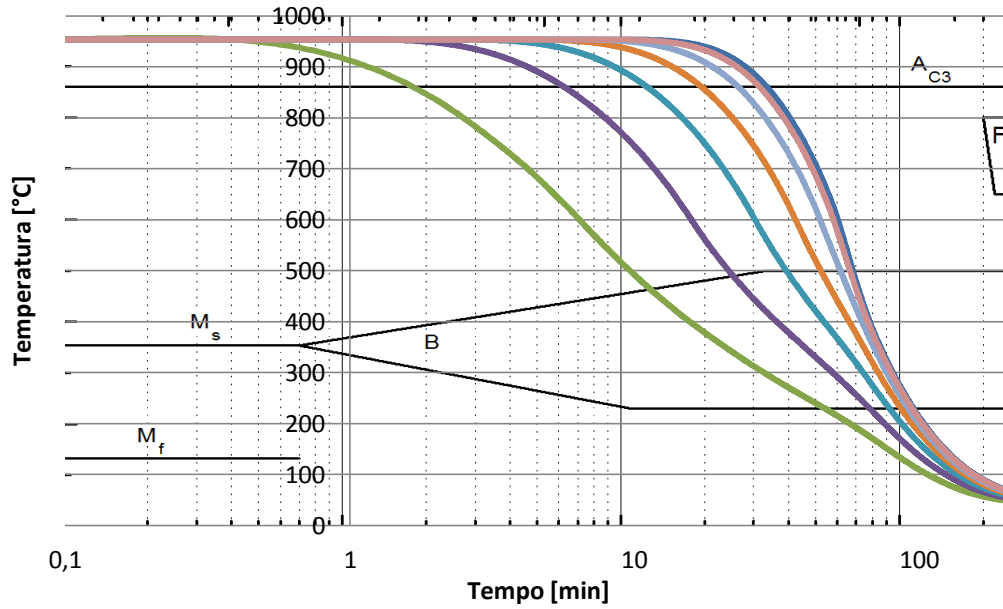


Figura 4.10. Curve di raffreddamento per il centro della sezione a diametro 600mm.

### Curve di raffreddamento

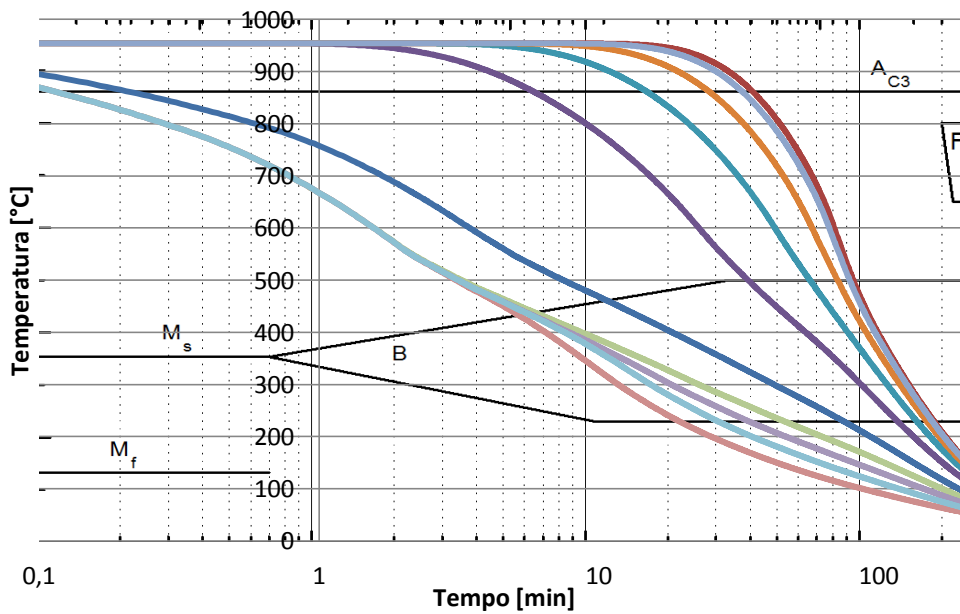


Figura 4.11. Curve di raffreddamento per la regione di contatto fra le zone a diametro 1290mm e 600 mm.

### Curve di raffreddamento

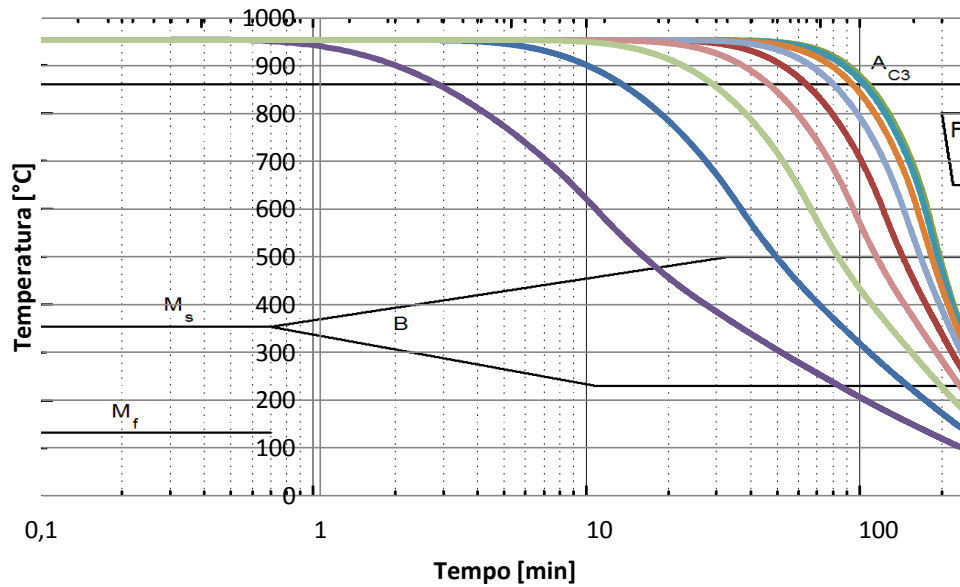


Figura 4.12. Curve di raffreddamento per il centro della sezione a diametro 1290mm.

### Curve di raffreddamento

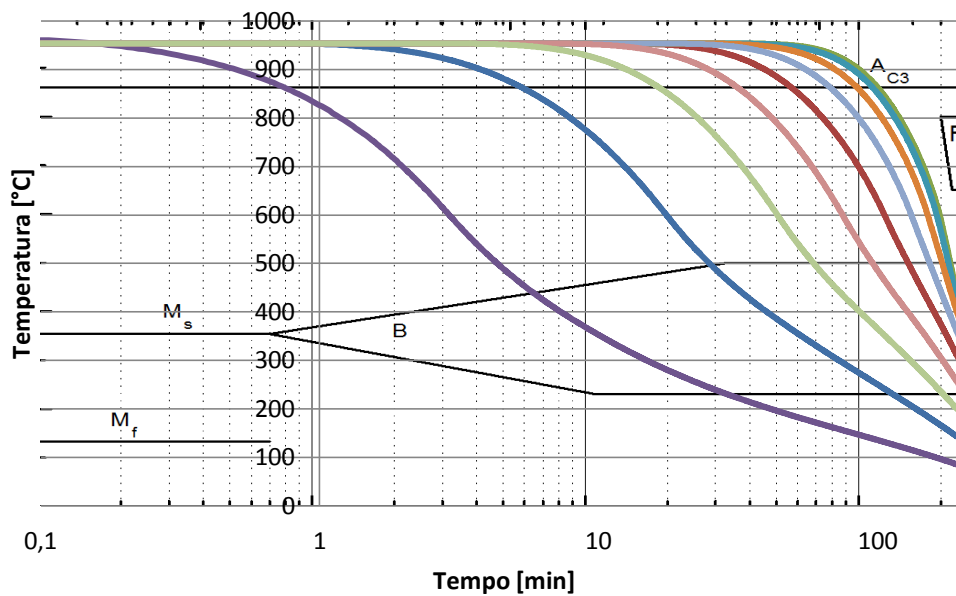


Figura 4.13. Curve di raffreddamento per la regione di contatto fra le zone a diametro 1290mm e 1150mm.

### Curve di raffreddamento

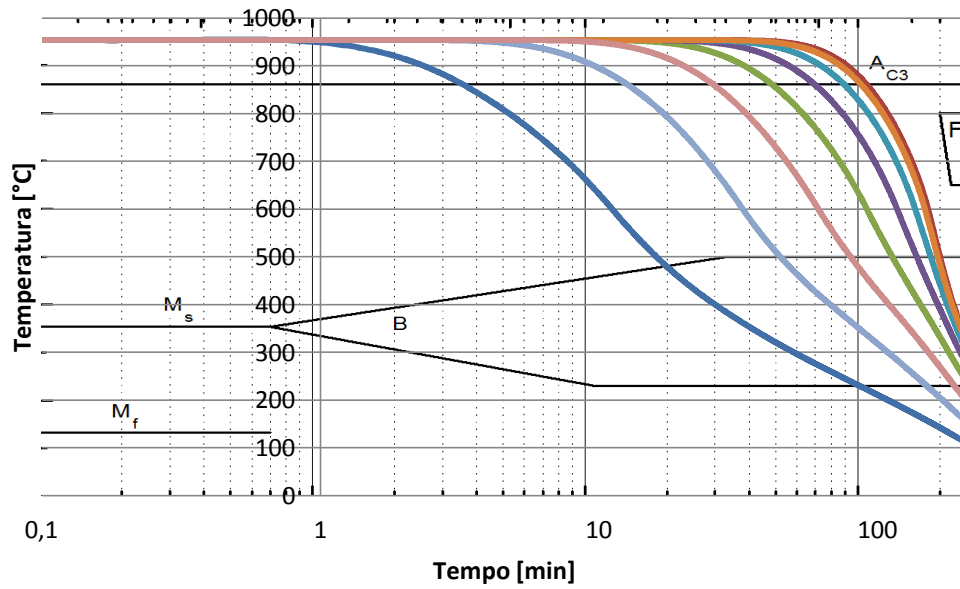


Figura 4.14. Curve di raffreddamento per il centro della sezione a diametro 1150mm.

### Curve di raffreddamento

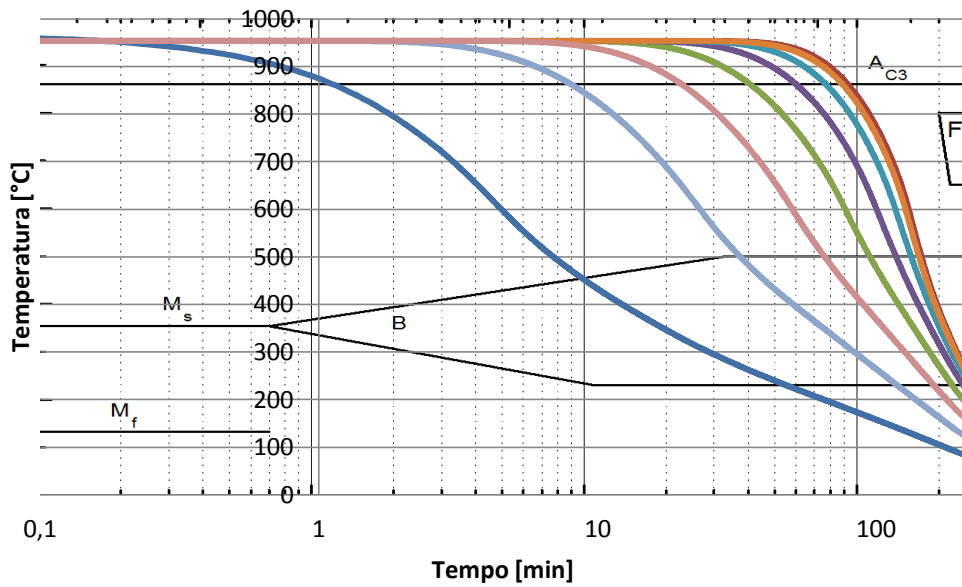


Figura 4.15. Curve di raffreddamento per la regione di contatto fra le zone a diametro 1150mm e 1052mm.

## Curve di raffreddamento

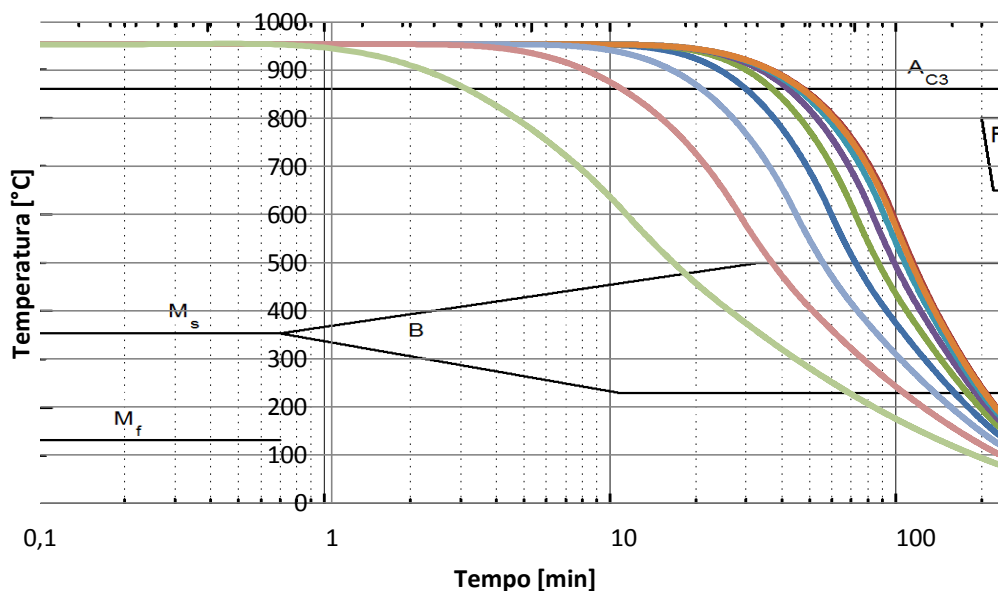


Figura 4.16. Curve di raffreddamento per il centro della sezione a diametro 1052mm.

Dalle curve di raffreddamento, si nota che in nessuna area si ha la formazione di costituenti strutturali come ferrite o martensite. Infatti tutte passano lungo l'orizzontale inferiore della zona bainitica, non formando quindi martensite. Inoltre, le curve più lente non attraversano la zona di formazione della ferrite. Il componente può essere quindi considerato solamente formato da austenite e bainite durante il raffreddamento.

Viene fatto notare, come è logico aspettarsi, che le curve di raffreddamento più lente corrispondono alle zone con inerzia termica maggiore. Inoltre, fra le sezioni con lo stesso diametro, raffreddano più velocemente quelle poste, almeno in parte, a contatto con l'acqua.

### 4.3 Analisi termo-strutturale

Consecutivamente all'analisi termica, si effettua l'analisi termo-strutturale. Si è preso il modello del pezzo usato precedentemente, ovvero assialsimmetrico con mesh identica. Si aggiungono le caratteristiche strutturali del materiale, riportate in tabella 4.1.

Temperatura [°C]	Modulo elastico [MPa]	Modulo di Poisson	Carico di snervamento [MPa]
20	206000	0.3	860
100	201000	0.3	860
150	198000	0.3	860
200	194000	0.3	860
400	173000	0.3	860
600	145000	0.3	85
800	115000	0.3	60
1000	85000	0.3	20

L'ultimo parametro da definire nel materiale è il coefficiente di dilatazione termica. Per implementarlo, non è sufficiente conoscere i costituenti strutturali presenti all'interno della struttura, caratterizzati da coefficienti diversi. Di norma nel passaggio da austenite a perlite, bainite o martensite vi è una espansione: quindi, durante la trasformazione dei costituenti strutturali, si ha un valore negativo di  $\alpha_{eq}$ . Si deve inoltre valutare l'intervallo di temperatura, durante il quale avviene la trasformazione. Per valutare in maniera rigorosa l'entità del coefficiente in funzione della temperatura, è necessario tracciare la curva dilatometrica caratteristica di una particolare legge di raffreddamento. Poiché, nel nostro caso, il raffreddamento porta alla formazioni di costituenti strutturali simili in tutte le zone del componente, cioè struttura completamente bainitica, si può usare lo stesso coefficiente per tutto il componente. Nel caso, a causa di raffreddamenti molto bruschi, in alcune regioni si formasse martensite, si consiglia di suddividere il componente in regioni alle quali vengono assegnati valori di  $\alpha_{eq}$  diversi. Purtroppo, non potendo ricavare sperimentalmente l'acciaio con un dilatometro, si è usata una curva dilatometrica di un acciaio simile presente in letteratura, visibile in figura 4.16.

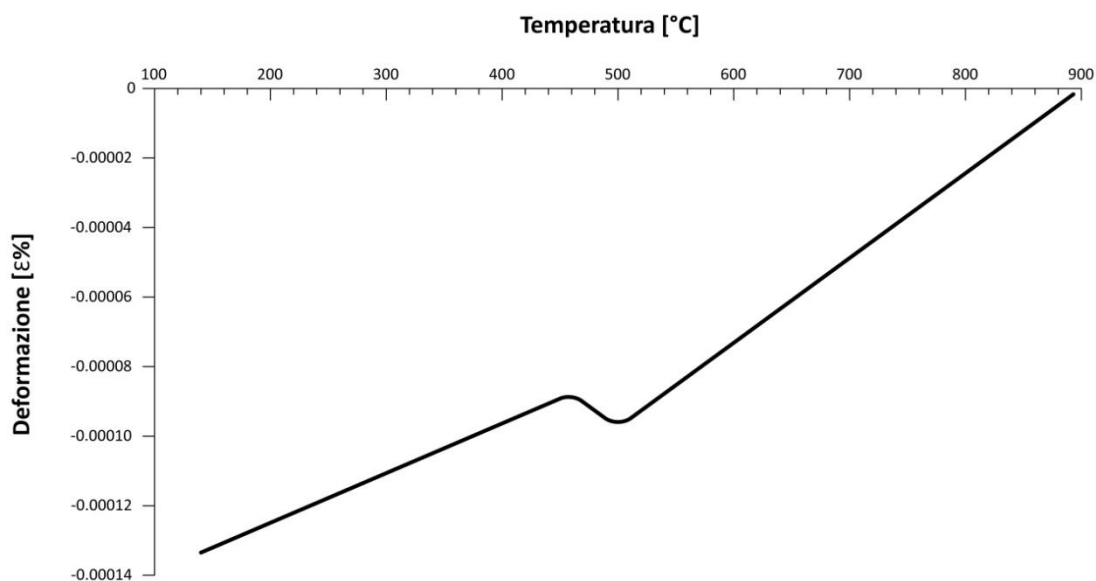


Figura 4.17. Curva dilatometrica.

Dalla figura si evince che vi sono due tratti rettilinei, caratterizzati dai coefficienti della austenite e della bainite, pari a rispettivamente  $2.5e-5$  e  $1.1e-5$ . L'espansione è caratterizzata da coefficiente negativo. Ciò è confermato anche dalla figura 4.16, che al momento della transizione dei costituenti strutturali, presenta un tratto a inclinazione negativa, essendo

$$\alpha_{eq} = \frac{d\varepsilon}{dT} \quad (4.1)$$

Per semplicità, si è approssimato anche il passaggio fra costituenti strutturali diversi con un coefficiente costante pari a  $-2.6e-5$ . La tabella 4.2 riporta i valori di  $\alpha_{eq}$  al variare della temperatura; la figura 4.17 ne dà una rappresentazione grafica.

Tabella 4.2. Andamento del coefficiente di dilatazione termica al variare della temperatura.	
Temperatura [K]	$\alpha_{eq}$ [ $K^{-1}$ ]
20	$1.1e-5$
436	$1.1e-5$
457	$-2.6e-5$
489	$-2.6e-5$
510	$2.5e-5$
1000	$2.5e-5$



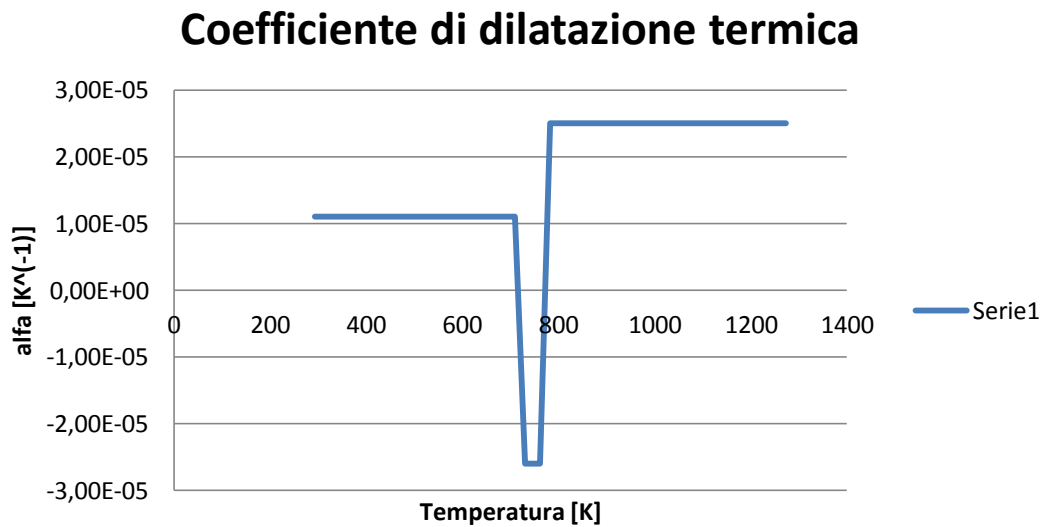


Figura 4.18. Andamento del coefficiente di dilatazione termica al variare della temperatura.

Gli intervalli di tempo dell'analisi vanno da un minimo di 0.0001 a un massimo di 2000 secondi. Il calcolatore sceglie automaticamente lo step temporale in funzione del salto di temperatura massimo che avviene nel passo scelto pari a 10°C. L'analisi è effettuata per un tempo totale di 50 000 secondi (quasi 14 ore), in modo tale da permettere a tutto il pezzo di raggiungere la temperatura ambiente. Lo scambio termico convettivo è rimasto invariato dalla fase precedente, così come la mesh. Si sono scelti elementi quadratici perché con elementi lineari si generava una forte instabilità dei risultati. Anche le condizioni iniziali sono invariate con il pezzo a temperatura uniforme pari a 950°C.

#### 4.4 Risultati analisi termo-strutturale

Nelle due figure seguenti, si rappresentano gli andamenti dei valori della tensione equivalente di Von Mises e della pressione al termine del raffreddamento (per le immagini relative agli sforzi durante il raffreddamento fare riferimento all'appendice A). PRESS è un indicatore definito come:

$$PRESS = -\frac{\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}}{3} \quad (4.2)$$

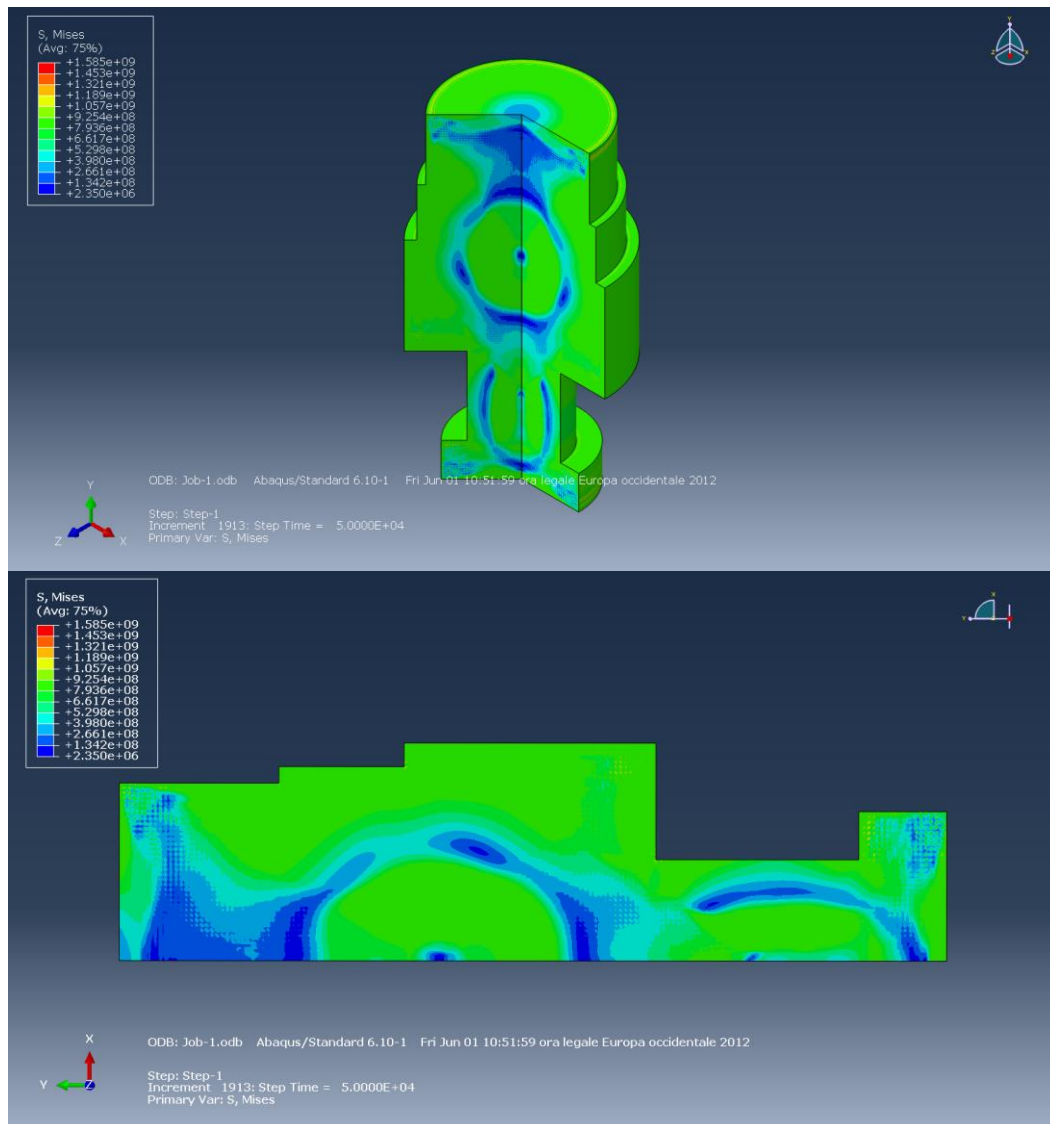


Figura 4.19. Sforzo equivalente di Von Mises [Pa] e dettaglio.

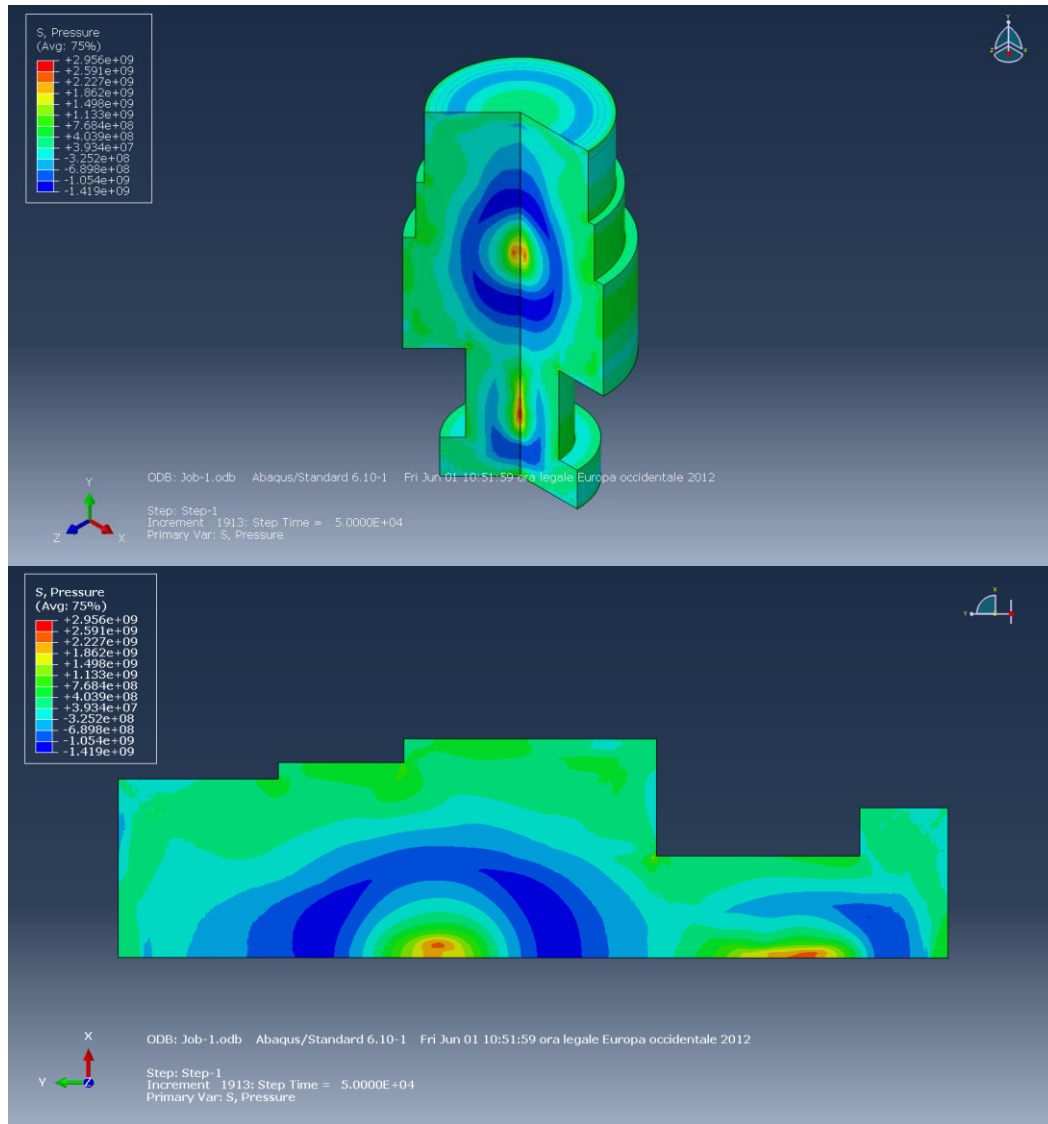


Figura 4.20. PRESS [Pa] e dettaglio.

Dalla figura 4.19 è possibile vedere quali zone sono sottoposte a una sollecitazione di trazione, e quali ad una sollecitazione di compressione. Si evince quindi che la superficie e il cuore del pezzo sono sottoposti ad una sollecitazione di compressione, mentre la regione caratterizzata da un colore blu è sottoposta ad una sollecitazione di trazione. È interessante notare come questa regione, nella sezione a maggior inerzia termica, abbia una morfologia simile a quella delle isoterme che si presentano durante il raffreddamento (figura 4.18). Si nota inoltre che qui gli sforzi equivalenti di Von Mises sono molto bassi rispetto alle altre aree della regione. Un valore basso dello sforzo equivalente indica o una sollecitazione molto bassa o una condizione di equitriassialità degli sforzi.

$$\sigma_{vM}^* = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_{III}^2 - \sigma_I \sigma_{II} - \sigma_I \sigma_{III} - \sigma_{II} \sigma_{III}} \quad (4.3)$$

Infatti non considerando il contributo dello sforzo idrostatico, nel caso di equitriassialità degli sforzi la 4.3 presenta valore nullo. Per valutare se vi sia assenza di sollecitazione oppure equitriassialità, si riportano nelle figure seguenti gli andamenti degli sforzi nelle direzioni x y e z, in superficie, a metà spessore e a cuore della sezione a diametro maggiore.

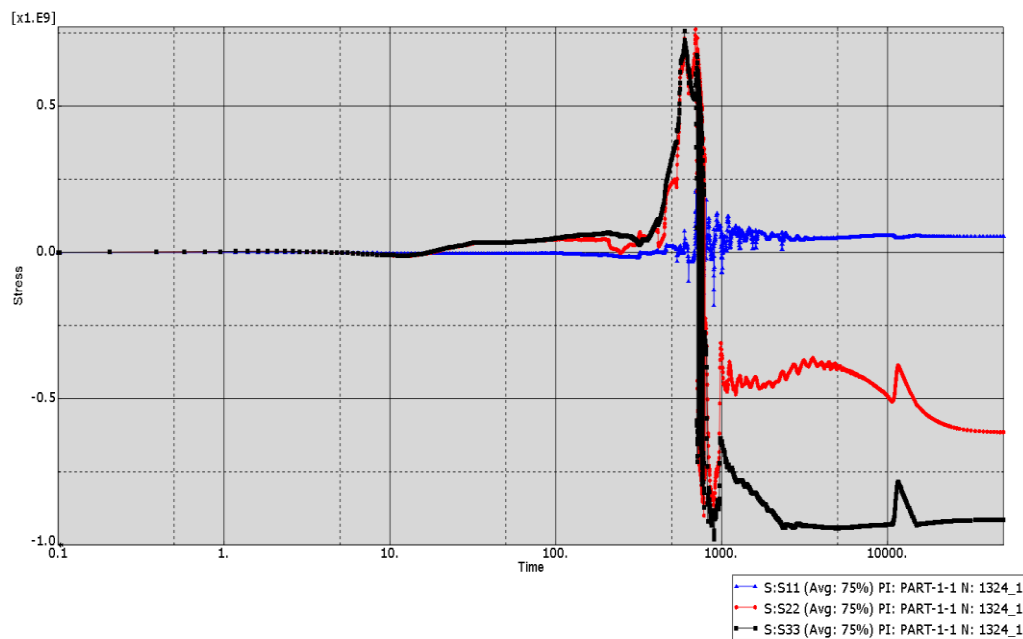


Figura 4.21. Andamento sforzi in direzione x y e z, in superficie. Tempo [s] Sforzi [Pa]

In un primo momento la superficie raffredda, quindi si contrae. La contrazione volumetrica provoca uno stato di sollecitazione di trazione che raggiunge valori elevati. Successivamente, si ha la trasformazione dei costituenti strutturali, caratterizzata da una espansione di volume. Si ottiene così uno stato di sollecitazione di compressione. La sollecitazione infine cala a causa della trasformazione del cuore in bainite, il che provoca una sollecitazione di trazione nel resto del pezzo.

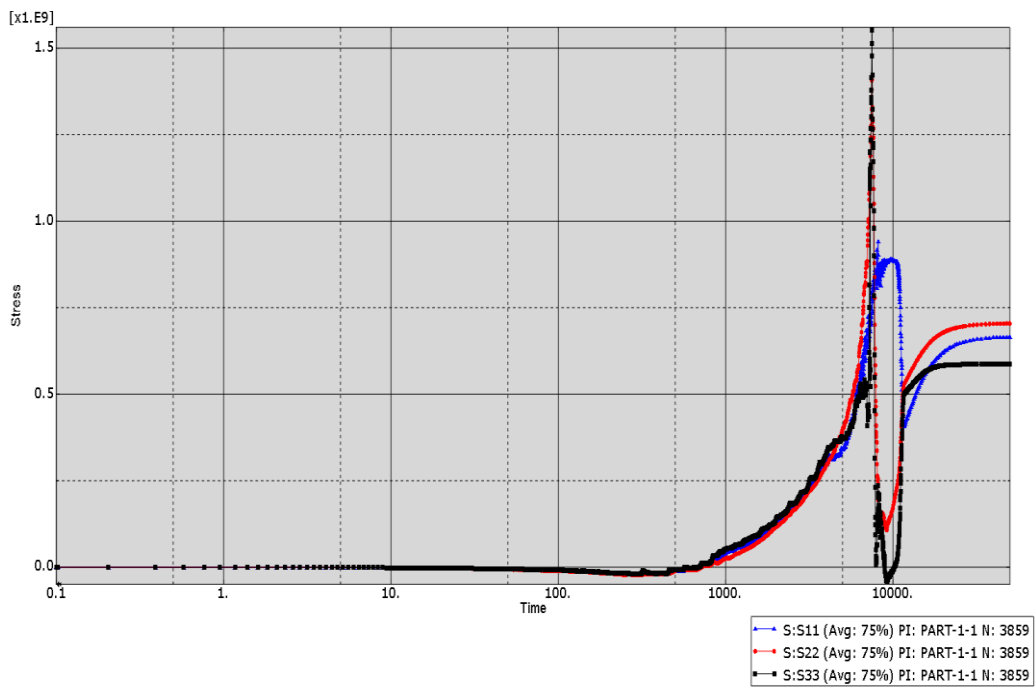


Figura 4.22. Andamento sforzi in direzione x y e z, a metà spessore. Tempo [s] Sforzi [Pa]

Come nel caso precedente, la prima fase è caratterizzata da uno sforzo di trazione causato dalla contrazione volumetrica all'abbassarsi della temperatura. L'entità massima di questi sforzi è però quasi il doppio di quanto raggiunto in superficie. Quando avviene la trasformazione dei costituenti strutturali, quindi, non si raggiungono sollecitazioni di compressione. Nel tratto finale gli sforzi tendono ad aumentare in quanto il cuore del componente si trasforma in bainite, provocando una sollecitazione di trazione.

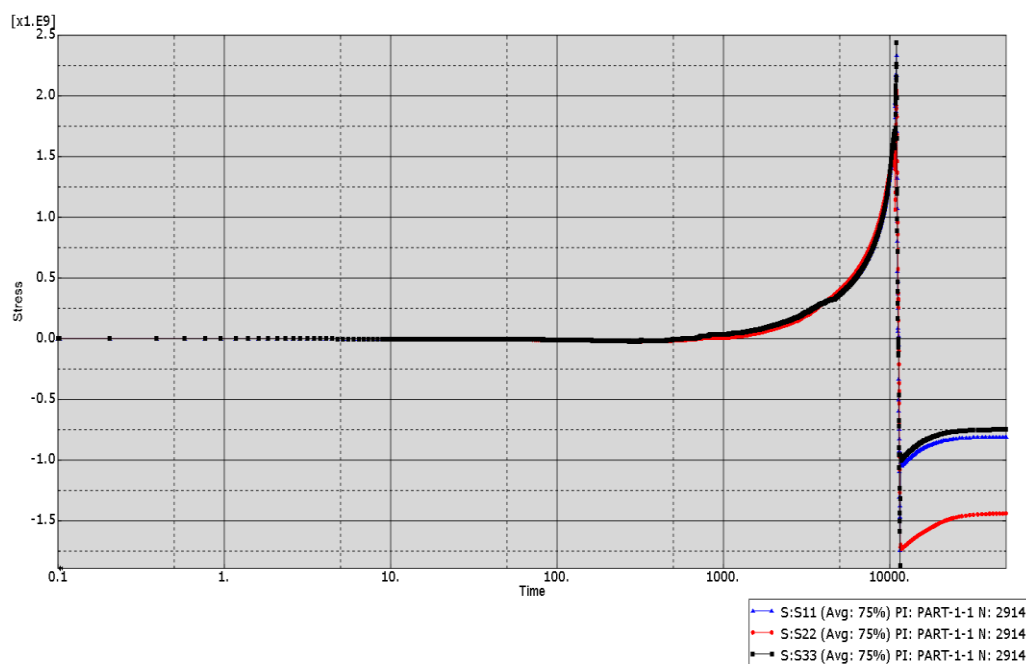


Figura 4.23. Andamento sforzi in direzione x y e z, a cuore. Tempo [s] Sforzi [Pa]

L'andamento degli sforzi a cuore è più semplice di quelli visti nei casi precedenti. Infatti, prima subisce una sollecitazione di trazione, causata dalla trasformazione dei costituenti strutturali delle regioni esterne. Come abbiamo già visto, l'espansione volumetrica in queste regioni, provocava una sollecitazione di compressione. Poiché lungo la sezione lo stato di sforzo deve essere bilanciato, a cuore si ha uno stato di sollecitazione di trazione. Tuttavia, quando anche il cuore del pezzo subisce la trasformazione da austenite a bainite, si ottiene uno sforzo residuo di compressione. Si nota inoltre, che confrontando quanto accade a metà spessore e in superficie, il salto degli sforzi dovuto al passaggio da un costituente strutturale all'altro, è di 1500 MPa nei primi due casi, mentre a cuore raggiunge quasi i 4500 Mpa. Tutto ciò succede perché la regione superficiale o a metà spessore, sono affiancate da un lato, con una regione più calda, caratterizzata da una contrazione volumetrica di entità minore, che compensa in parte la sollecitazione. Tuttavia, quando il cuore comincia la trasformazione dei costituenti strutturali, non può beneficiare di ciò, per cui presenta un salto ben maggiore.

Le figure confermano in superficie e a cuore lo stato di sollecitazione a compressione, a metà spessore quello di trazione. È di fondamentale importanza, notare che gli sforzi a metà spessore sono molto vicini fra di loro in modulo. Ciò significa che in tale punto vi è uno stato di equitriassialità degli sforzi.

Riassumendo, il componente si rompe in modo fragile dopo il trattamento termico di tempra, durante il rinvenimento. Alla fine del trattamento di tempra sono presenti a cuore e in superficie tensioni residue di compressione, a metà spessore tensioni di trazione. In aggiunta, in quest'ultima zona, è presente equitriassialità degli sforzi.

Durante il rinvenimento, non si riesce a scaldare il pezzo in maniera uniforme, analogamente a quanto visto per il raffreddamento. Le zone più esterne quindi raggiungono temperature elevate quando il cuore è ancora relativamente freddo. Inevitabilmente, l'innalzarsi delle temperature provoca un decadimento della resistenza del materiale. Quando la regione sottoposta allo stato di sollecitazione equitriassiale si scalda, non ha più la resistenza necessaria a contrastare le elevate sollecitazioni di compressione presenti a cuore. Quindi avviene una lacerazione a metà spessore, la quale propaga fino in superficie. Poiché è presente uno stato di sollecitazione di sforzi equitriassiale, la propagazione avviene in maniera fragile.

## **4.5 Tecnica di prevenzione della rottura**

Gli sforzi residui presenti nel componente ne provocano la rottura. La tecnica più intuitiva per impedire il cedimento è di sfruttare un trattamento termico che comporti delle sollecitazioni minori. Logicamente, è necessario effettuare un raffreddamento meno repentino. Con un trattamento termico meno brusco, infatti, si ottengono delle tensioni residue più basse.

Si propone quindi di estrarre il pezzo dall'acqua 90 minuti dopo l'immersione. Nel successivo paragrafo, si verificherà la bontà di questa strategia.

### **4.5.1 Generalità**

Il modello va modificato aggiungendo una seconda parte (step) di analisi, effettuata consecutivamente alla prima. Il primo step, presenterà risultati termici e strutturali identici a quella del caso precedentemente esposto, con l'unica differenza, che verrà prolungata solamente per 90 minuti. Il secondo verrà effettuato per 910 minuti; in esso sono completamente cambiate le condizioni al contorno e le condizioni iniziali. Il coefficiente di scambio termico convettivo per l'aria è stato considerato costante con  $h$  pari a  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , mentre gli output finali del primo step rappresentano le condizioni iniziali di stato di sforzo, deformazione e temperatura del secondo. Il calcolatore effettua tutta l'analisi in maniera automatica, eseguendo consecutivamente i due step.

#### 4.5.2 Risultati analisi termica

Di seguito sono riportate le temperature all'interno del componente dopo 10, 90, 100, 200, e 500 minuti.

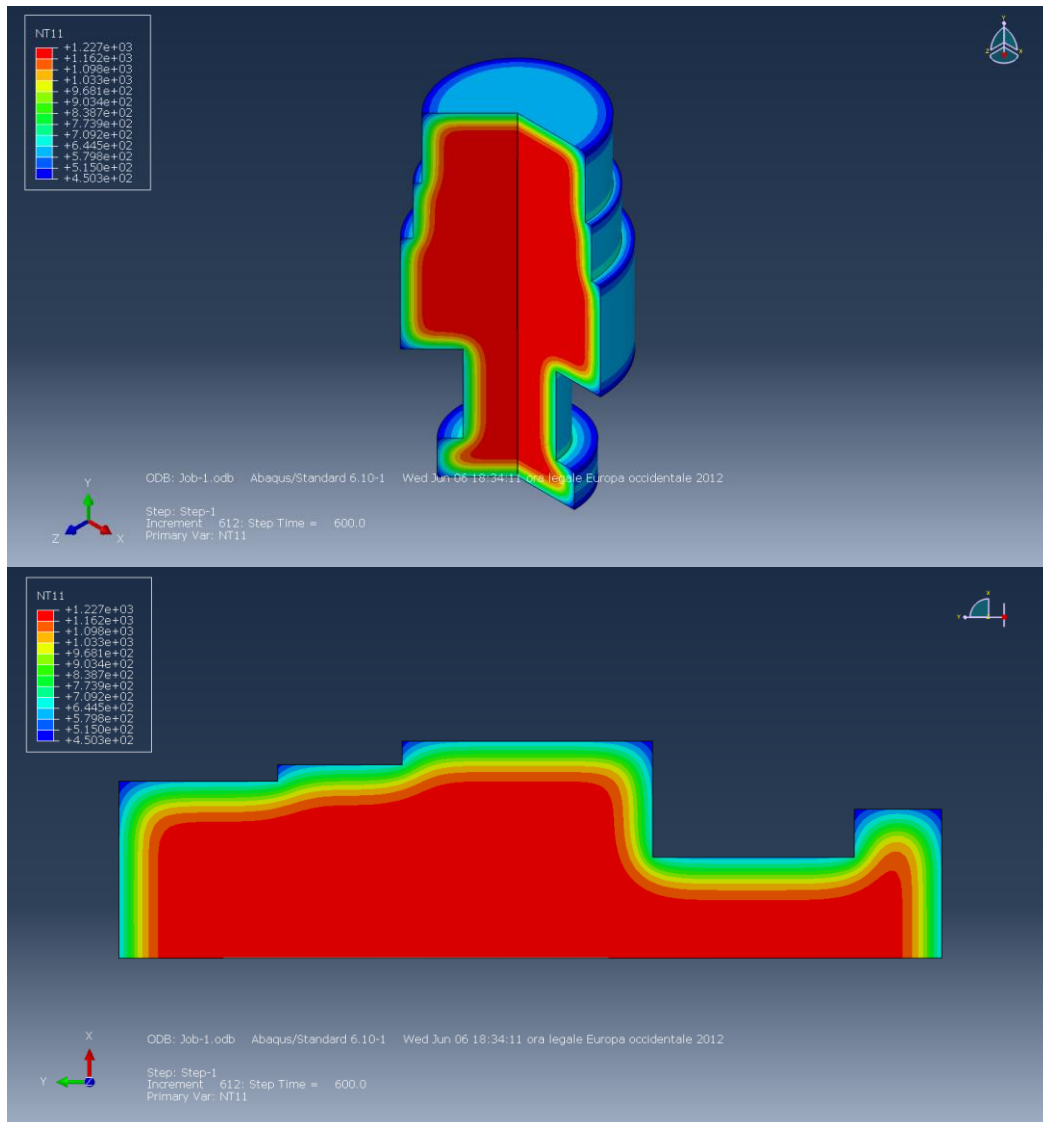


Figura 4.24. Temperatura [ $^{\circ}\text{K}$ ] dopo 10 minuti e dettaglio.



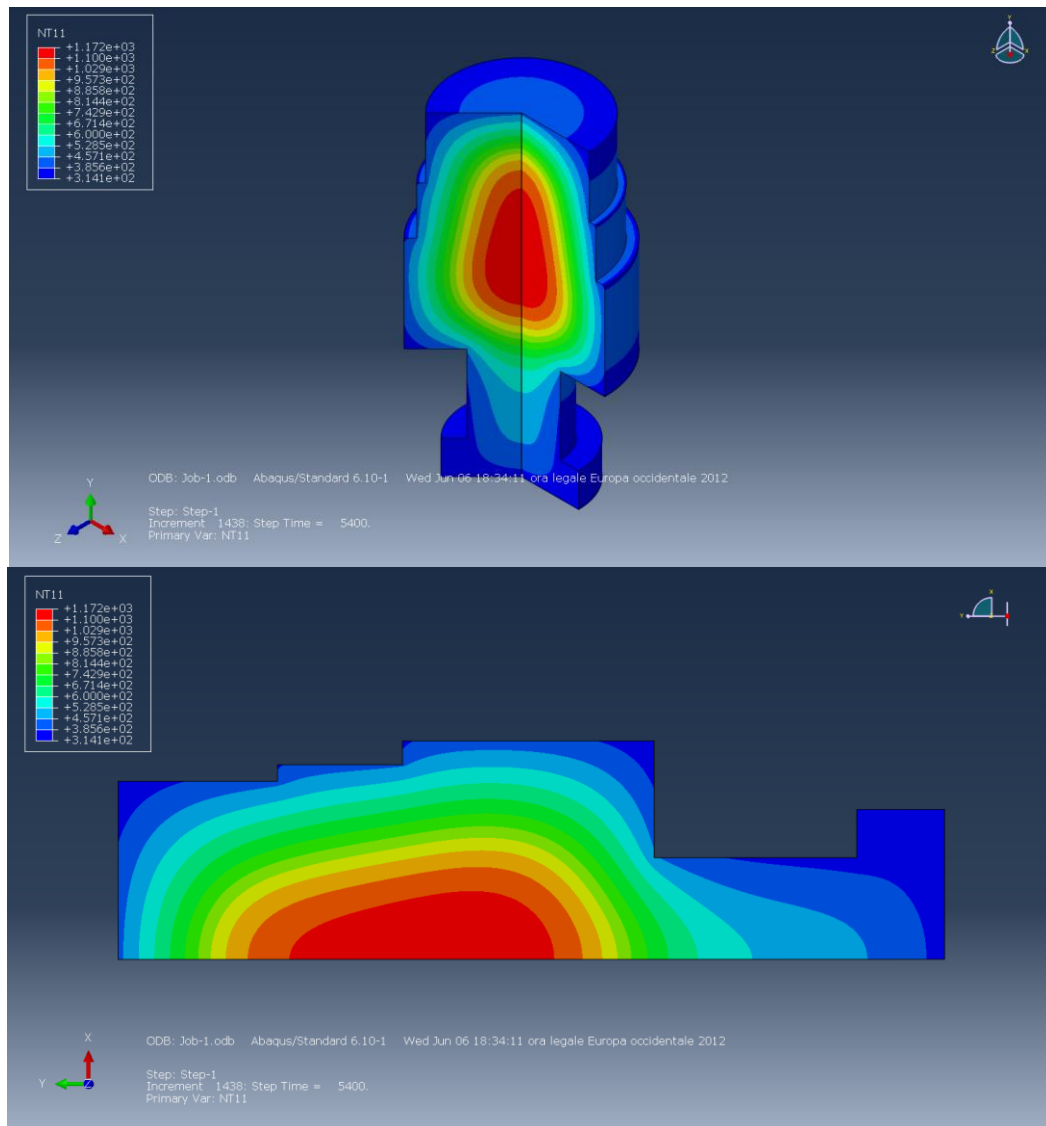


Figura 4.25. Temperatura [ $^{\circ}\text{K}$ ] dopo 90 minuti e dettaglio.

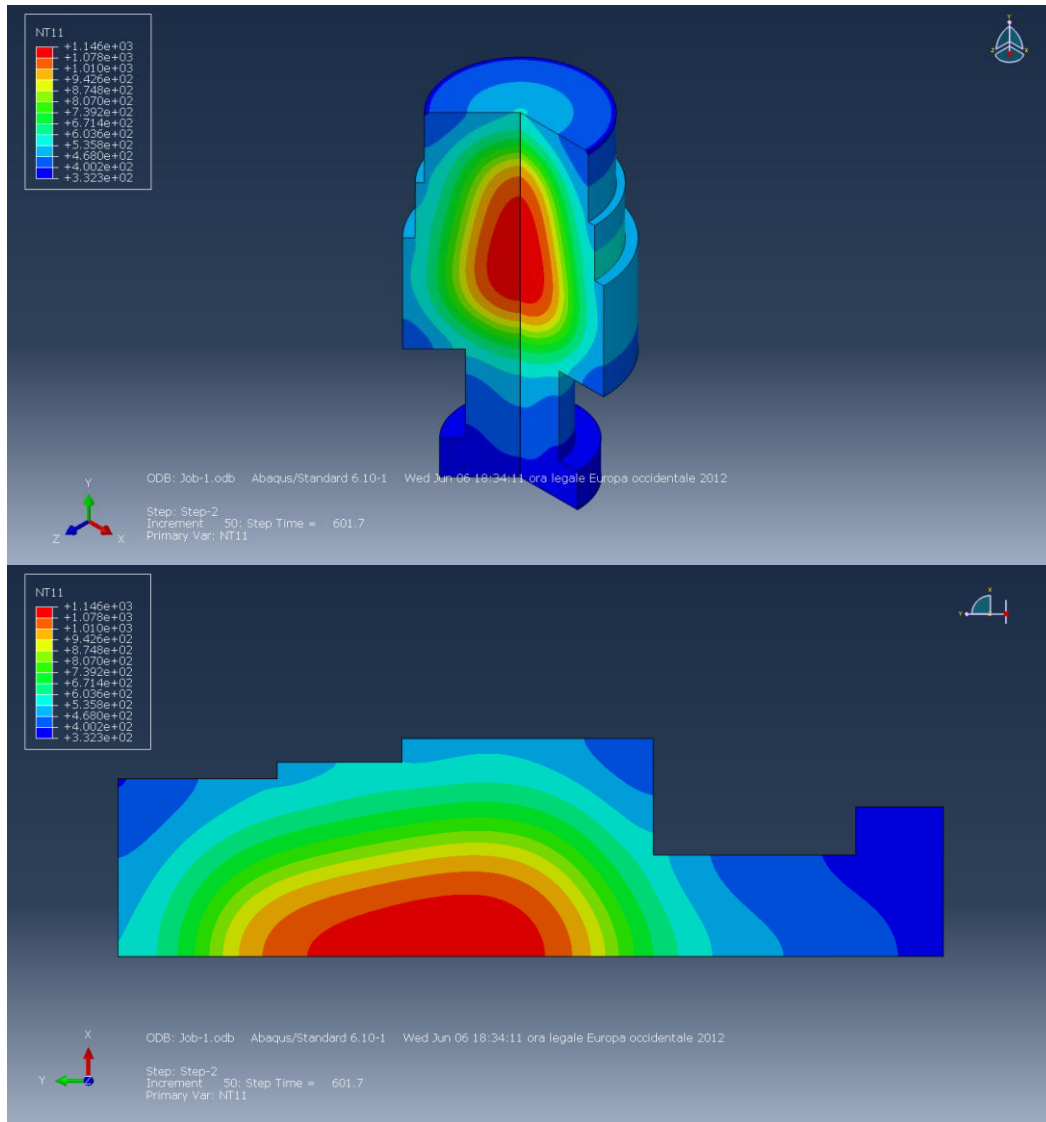


Figura 4.26. Temperatura [°K] dopo 100 minuti e dettaglio.

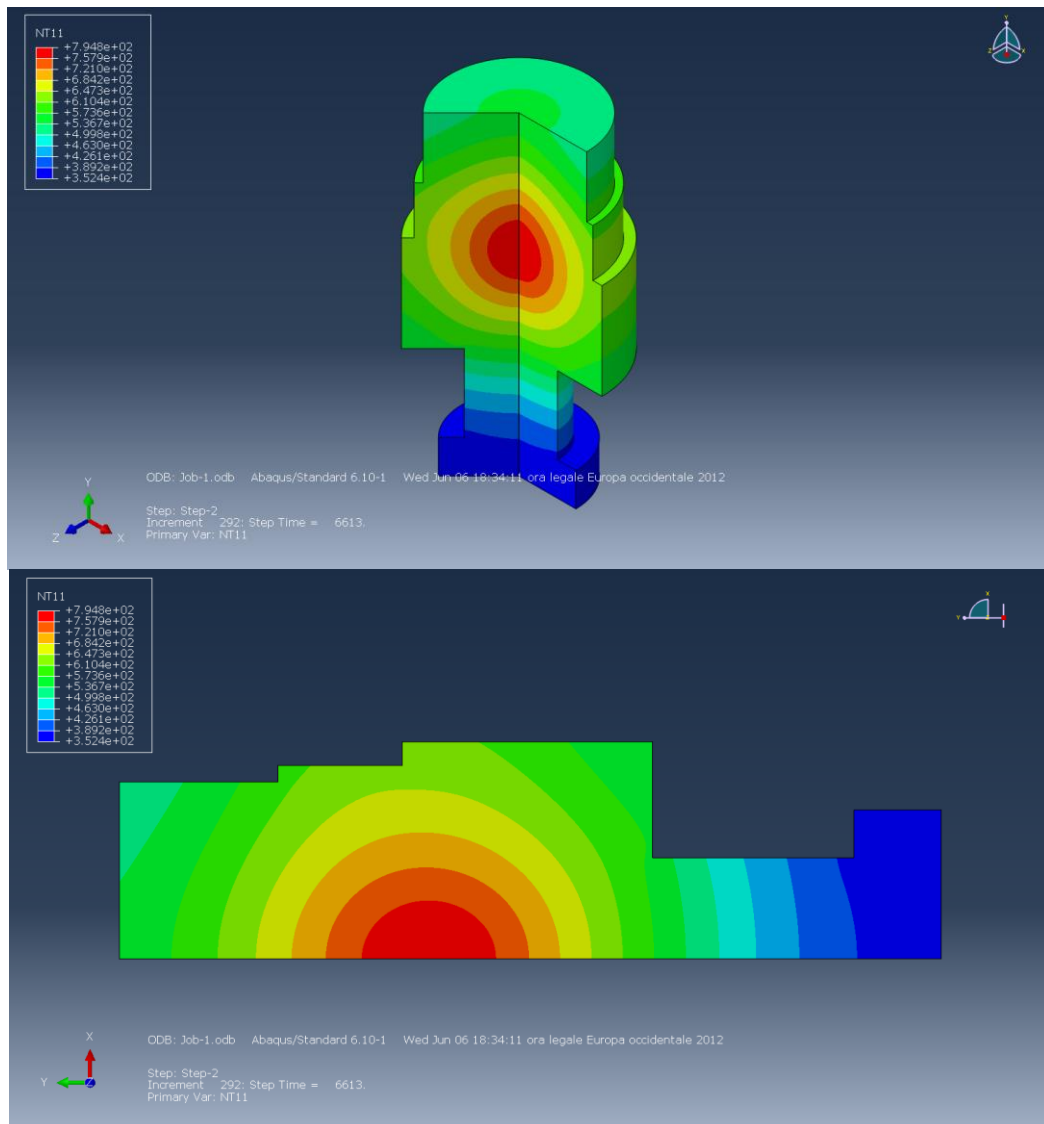


Figura 4.27. Temperatura [°K] dopo 200 minuti e dettaglio.

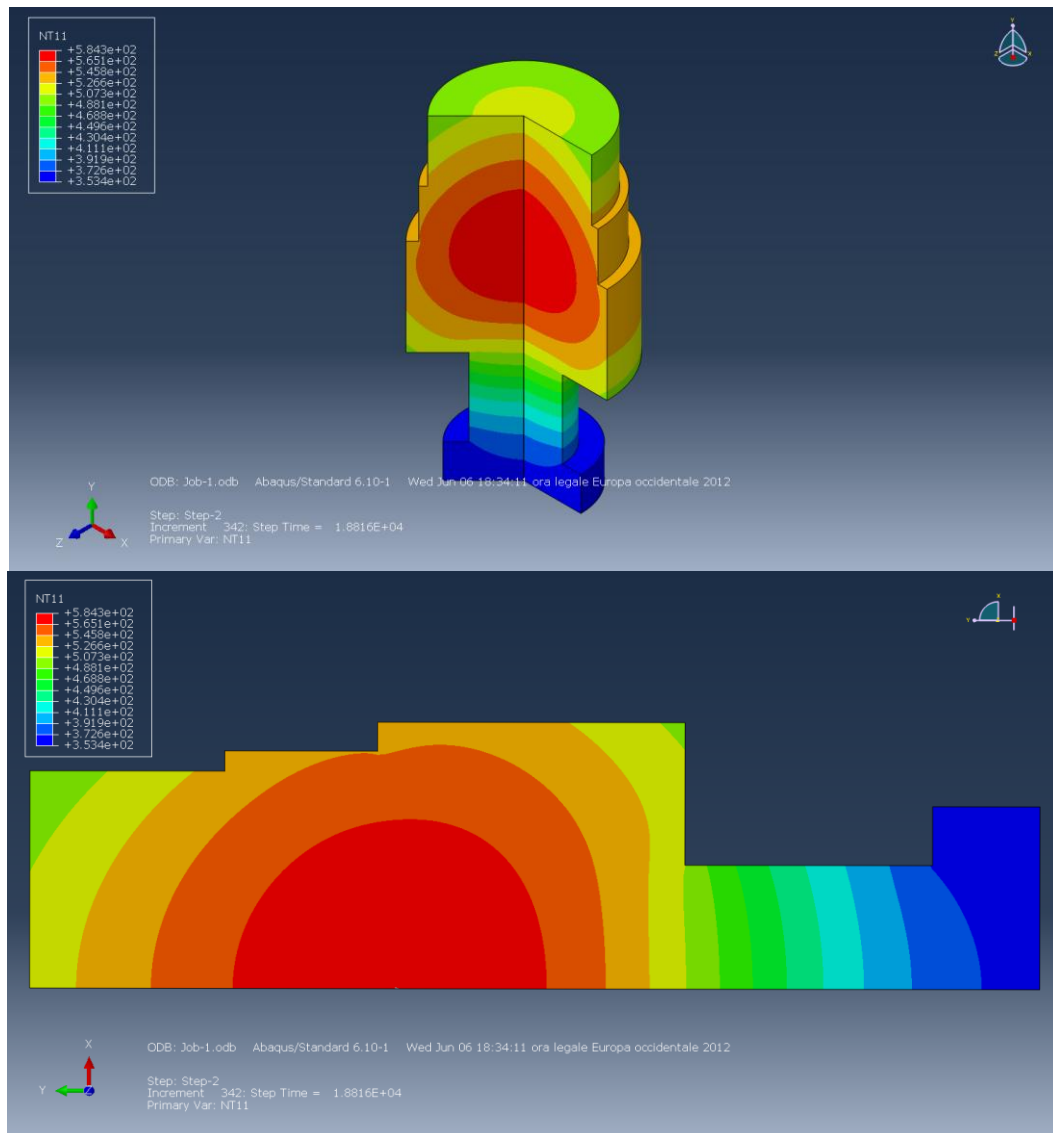


Figura 4.28. Temperatura [ $^{\circ}$ K] dopo 400 minuti e dettaglio.

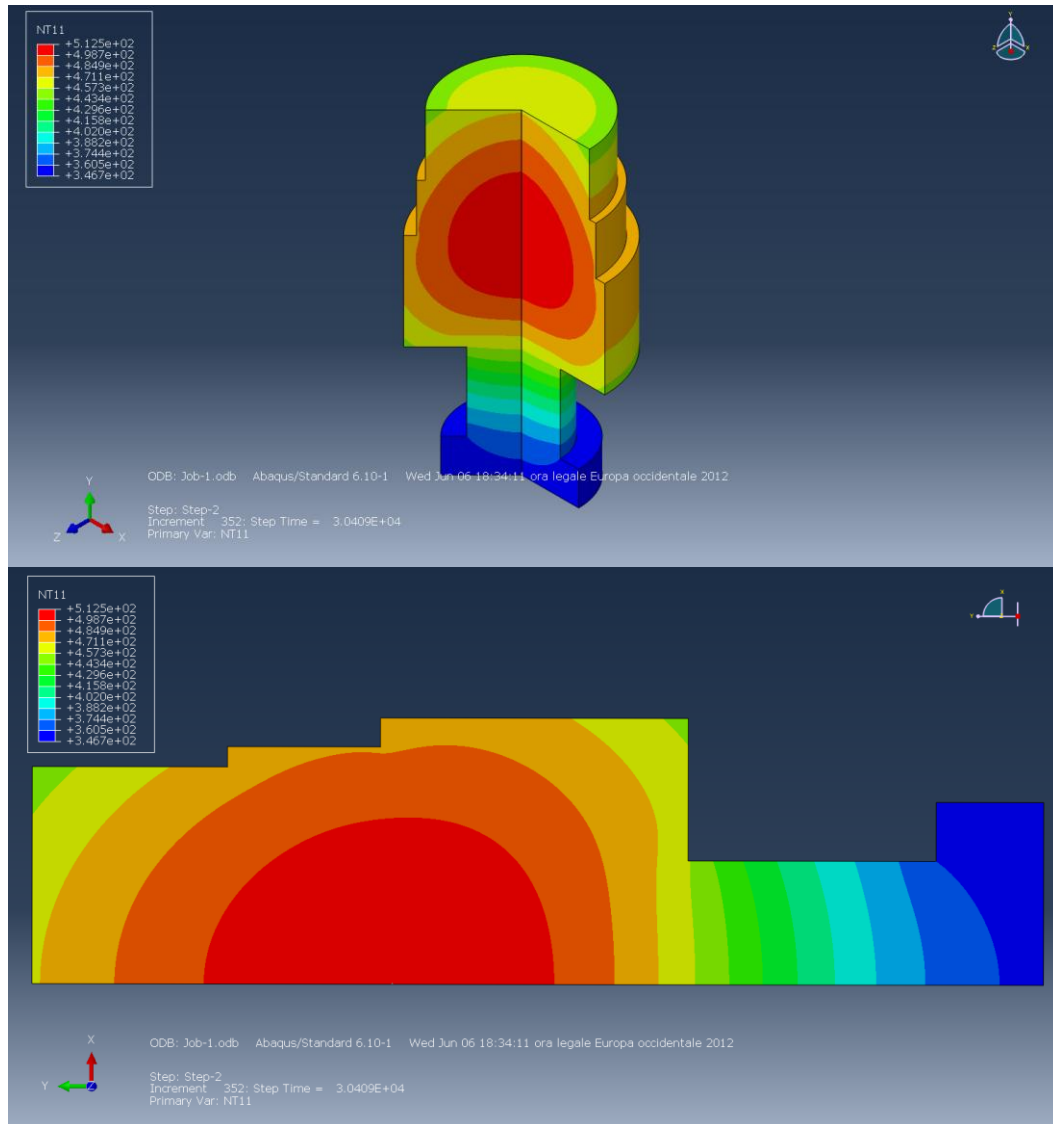


Figura 4.29. Temperatura [ $^{\circ}\text{K}$ ] dopo 600 minuti e dettaglio.

La temperatura all'interno del componente presenta gradiente molto elevato durante la prima fase di raffreddamento, a contatto con l'acqua. Una volta estratto, e a contatto con l'aria, il cuore si raffredda. Invece la superficie si riscalda in quanto lo scambio termico convettivo non è più sufficiente a eliminare il flusso di calore presente all'interno del pezzo. In alcune zone superficiali, come nella sezione a maggior diametro, questo riscaldamento è molto marcato, fino a raggiungere quasi  $200^{\circ}\text{C}$ ; in altre è quasi nullo, come sul "piede" del componente che presenta un elevato rapporto di superficie/volume, il che permette uno scambio termico molto più efficace. Nella figura seguente si riportano gli andamenti delle temperature all'interno della sezione con diametro maggiore, in superficie, a metà spessore e a cuore.

## Curve di raffreddamento

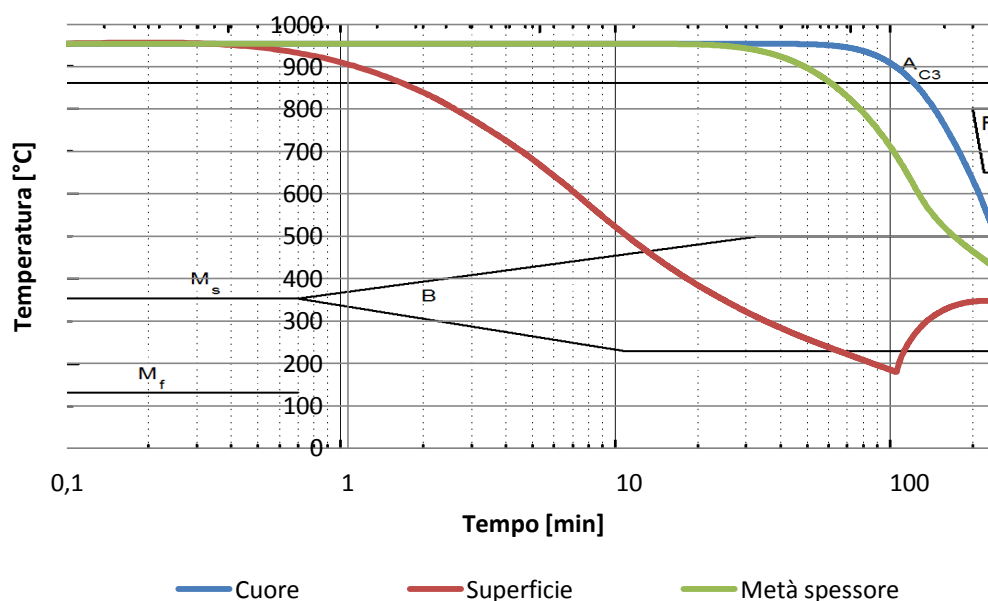


Figura 4.30. Andamento della temperatura lungo la sezione a massimo diametro.

Risulta quindi evidente che la superficie è sottoposta ad un riscaldamento, poiché non riesce a scambiare con l'aria la quantità di calore che riceve dal cuore del pezzo. È importante verificare che il pezzo non presenti dei costituenti strutturali diversi rispetto all'analisi precedente. Fortunatamente, alla fine del trattamento, il componente è completamente bainitico. Se le curve di raffreddamento di alcune zone avessero attraversato il campo ferritico, si sarebbe dovuto utilizzare un materiale diverso in tali regioni, caratterizzato da un coefficiente di dilatazione termica differente. Inoltre, se il riscaldamento in alcune regioni fosse stato di entità molto elevata, il programma sarebbe risultato inadeguato. Se la temperatura raggiunta in queste zone durante il riscaldamento è superiore a quella di fine trasformazione della bainite per il calcolatore, è come se avvenisse la trasformazione inversa fra bainite e austenite. Ovviamente, nella realtà questo evento avviene per temperature molto più elevate. Purtroppo, questo errore non può essere eliminato in maniera automatica, ma si può soltanto verificare che nessuna zona sia caratterizzata da un riscaldamento sufficiente a portarla a temperature troppo elevate. Nel caso che stiamo sperimentando, si può vedere, in figura 4.28, che in superficie, dove si ha il maggior innalzamento di temperatura, non si raggiunge una temperatura sufficiente.

### 4.5.3 Risultati parte termo-strutturale

Nelle figure 4.28 e 4.29 sono riportati i valori della tensione equivalente di Von Mises e Press alla fine del raffreddamento (per le immagini realtive agli sforzi durante il raffreddamento fare riferimento all'appendice B).

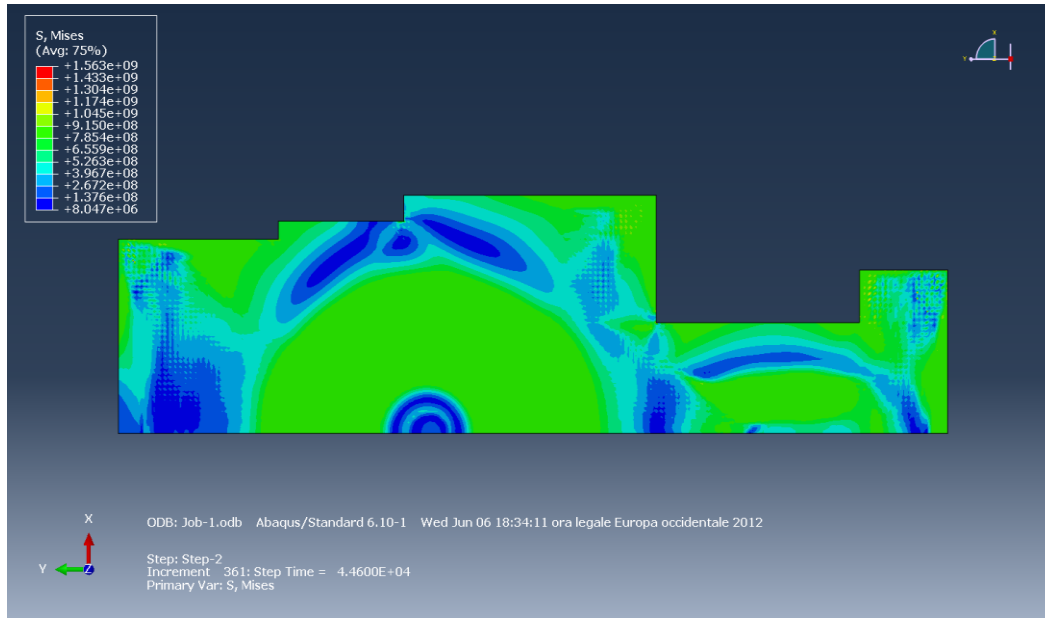


Figura 4.31. Sforzo equivalente di Von Mises [Pa].

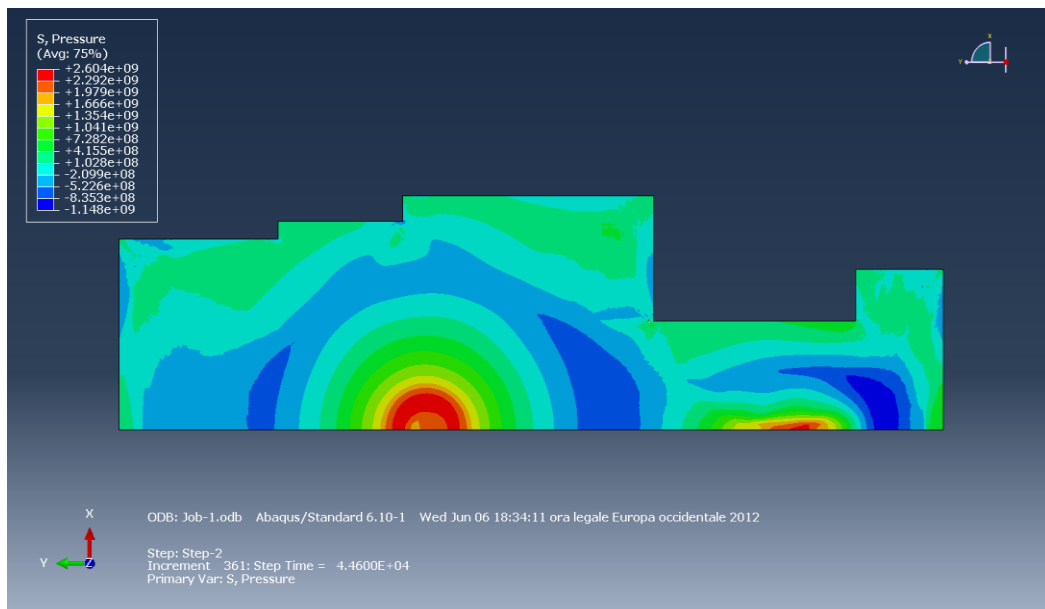


Figura 4.32. PRESS [Pa].

Dalla prima figura si nota che la zona blu, caratterizzata da uno stato di equitriassialità degli sforzi, è più spostata verso la superficie del componente rispetto a quanto ottenuto con il raffreddamento più repentino. Va fatto notare che anche la zona sottoposta ad uno sforzo di trazione tende ad avvicinarsi alla superficie del pezzo. Come già spiegato nel capitolo 2, le differenti condizioni termiche fra cuore e superficie, comportano un contributo agli sforzi, col risultato, alla fine del raffreddamento, di una sollecitazione di compressione in superficie e di una di trazione a cuore. Essendo minore la differenza di temperatura, il contributo dovuto a questa componente, è inferiore. Così si ha la tendenza ad avere la superficie meno compressa. Si fa notare inoltre, che i valori di PRESS, sono inferiori in tutta la sezione, indicando quindi una sollecitazione residua inferiore.

Di seguito sono riportati gli andamenti degli sforzi nelle stesse posizioni delle figure 4.20, 4.21 e 4.22.

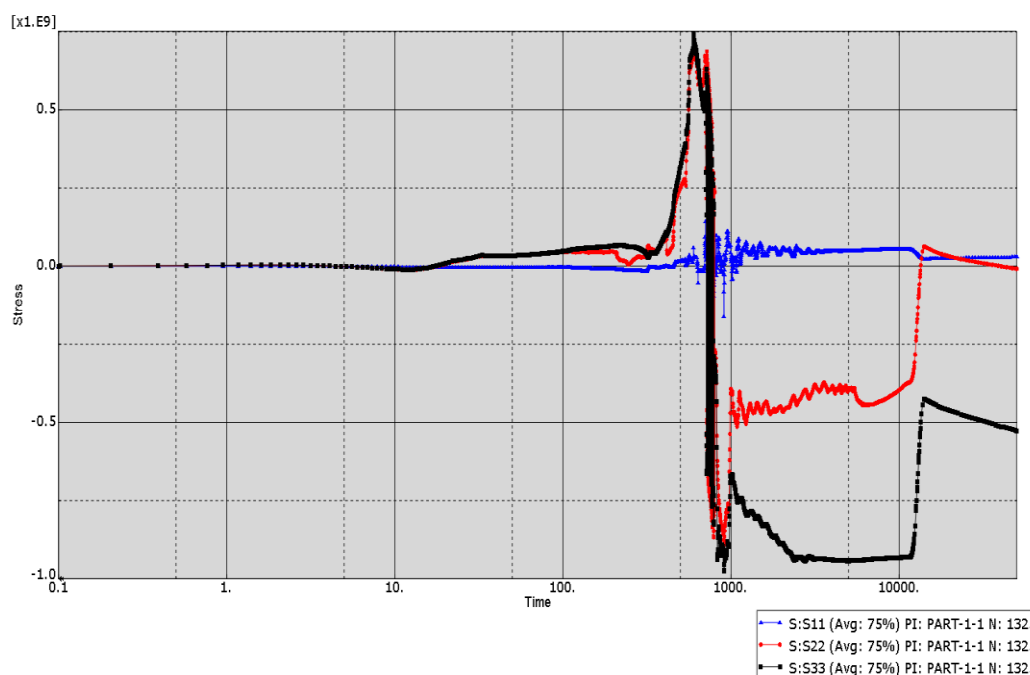


Figura 4.33. Andamento sforzi in direzione x y e z, in superficie. Tempo [s] Sforzi [Pa].

L'andamento è molto simile a quanto già visto in figura 4.20. Tuttavia, dopo circa 10000 s, si ha un notevole abbassamento delle sollecitazioni, causato dalla trasformazione dell'austenite in bainite. La trasformazione dei costituenti strutturali avviene contemporaneamente in una regione più ampia rispetto all'altra modalità di raffreddamento, perché, come visto precedentemente, una volta estratto dall'acqua il pezzo tende ad avere temperature più vicine fra zone diverse. Per questo motivo, la risalita degli sforzi da compressione verso la trazione è più elevata rispetto a quanto



visto in figura 4.20. L'entità degli sforzi residui è quindi molto minore di quanto era in precedenza, evidenziando il beneficio del raffreddamento più lento.

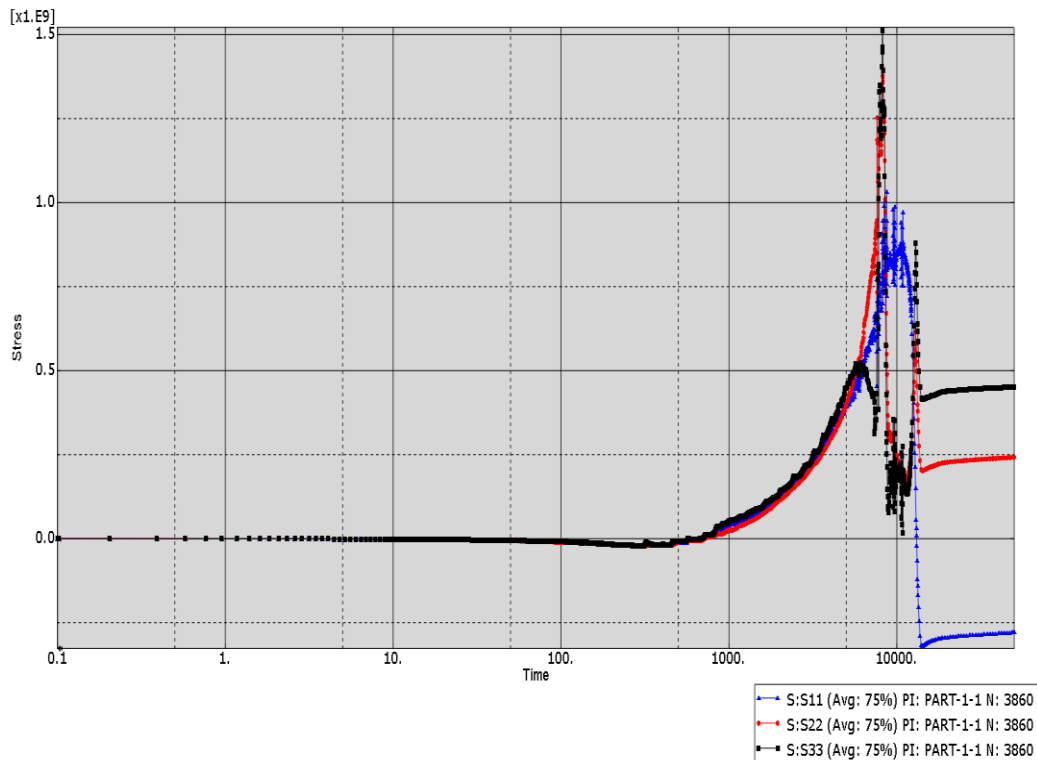


Figura 4.34. Andamento sforzi in direzione x y e z, a metà spessore. Tempo [s] Sforzi [Pa].

La nuova tecnica di raffreddamento permette di impedire la formazione dello stato di sollecitazione equitriassiale a metà spessore. Tuttavia tale formazione non viene in realtà eliminata, ma solo spostata verso la superficie. In figura 4.33 è possibile vedere una rappresentazione grafica del nuovo stato di sollecitazione equitriassiale. Si può evidenziare che la sollecitazione finale a metà spessore risulti comunque elevata, con uno sforzo equivalente di Von Mises pari a quasi 800 MPa. Se confrontato con il carico di snervamento, pari a 860 MPa, si è a questo molto vicini. Il componente non può ovviamente essere messo in esercizio con dei carichi residui di entità così elevata. Per questo è in ogni caso necessario un trattamento di rinvenimento del pezzo dopo la tempra, ma si è comunque raggiunto l'obiettivo di mantenere la sollecitazione sufficientemente bassa da evitare la rottura durante il rinvenimento.

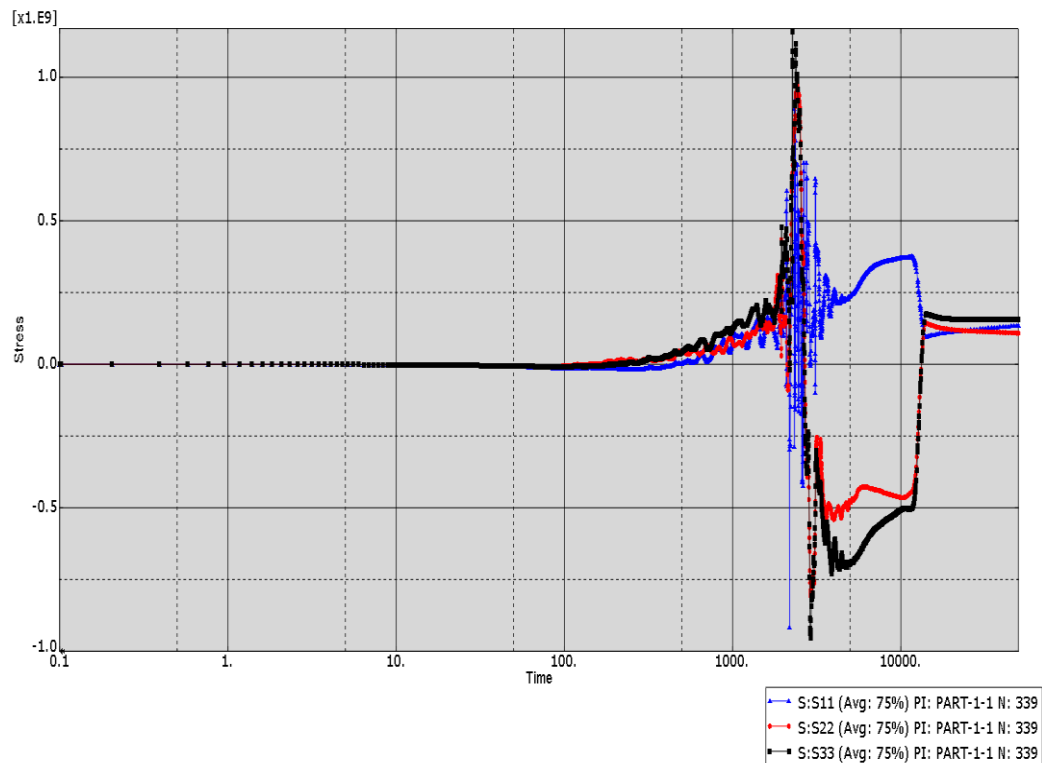


Figura 4.35. Andamento sforzi in direzione x y e z, nella regione di equitriassialità. Tempo [s] Sforzi [Pa].

Come già anticipato, lo stato equitriassiale di sforzo è ancora presente, tuttavia, è caratterizzato da delle sollecitazioni di entità molto più basse. La PRESS equitriassiale ottenuta con una tempra brusca ha un valore nell'intorno dei 600 MPa, mentre con la tempra più lenta si ottiene un valore inferiore ai 200 MPa, ovvero meno di un terzo. Per cui, anche in questa zona, il pezzo è tutelato nei confronti di una eventuale rottura.

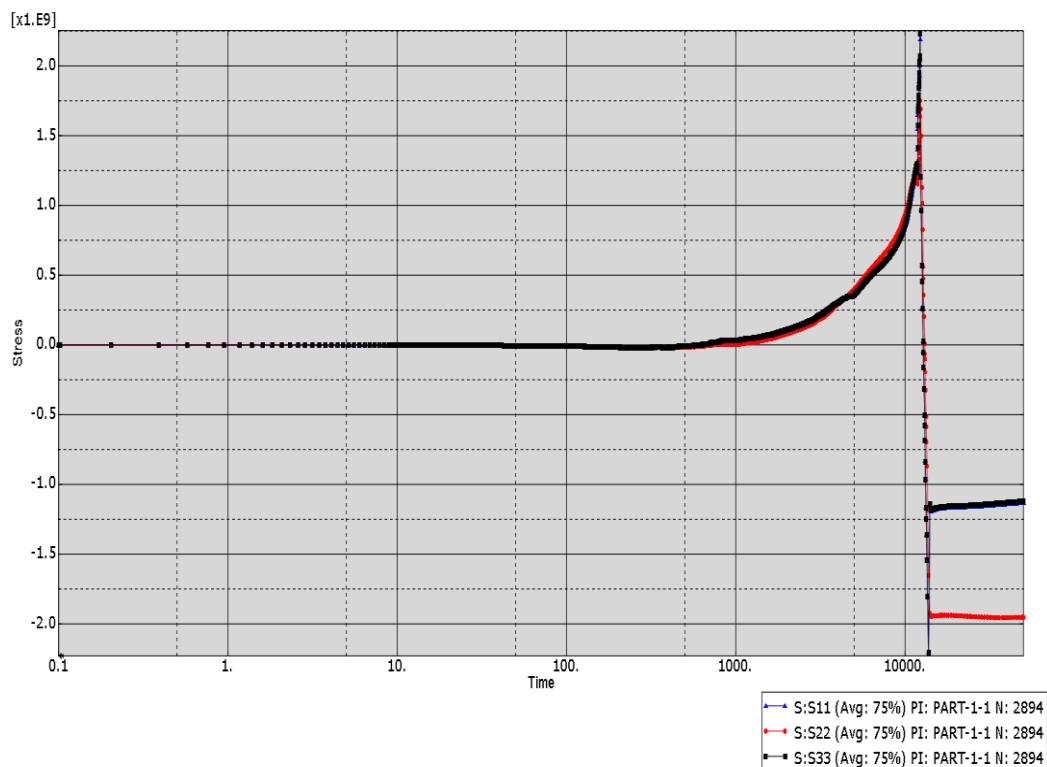


Figura 4.36. Andamento sforzi in direzione x y e z, a cuore. Tempo [s] Sforzi [Pa].

Infine, lo stato di sforzo a cuore non cambia sensibilmente, in quanto è l'ultima regione a raffreddarsi. Fra l'altro, essendo presente solo una sollecitazione di compressione, in questo punto non si avrà sicuramente il cedimento.

## 4.6 Conclusioni

La simulazione del componente temprato completamente in acqua ha convalidato i risultati sperimentali. Grazie all'analisi termica si è verificata la formazione di bainite alla fine del trattamento in tutte le zone del componente. Conoscendo la composizione strutturale è stato possibile effettuare il calcolo delle tensioni residue. La loro analisi ha invece confermato che queste sono sufficienti a provocare la rottura del pezzo durante il rinvenimento.

Si è così proposto un trattamento di tempra alternativo, meno repentino. Tale tecnica alternativa di raffreddamento prevede l'estrazione del pezzo dall'acqua dopo 90 minuti di immersione. Si è evidenziato che con tale procedura i costituenti strutturali che compongono il pezzo non cambiano. Inoltre, le tensioni residue alla fine del trattamento risultano adeguatamente ridotte, così da scongiurare eventuali cedimenti durante il rinvenimento. Come verifica, è stato temprato un componente identico a

quello dell'analisi con la tecnica di raffreddamento più dolce implementata. Il pezzo non ha mostrato rotture durante il rinvenimento.

Si può quindi asserire che la modellazione attraverso gli elementi finiti permette non solo di individuare le problematiche derivanti da un trattamento termico, ma anche di identificare con precisione la regione sottoposta ad una sollecitazione critica. Inoltre, la tecnica proposta, permette di sperimentare in maniera sufficientemente precisa il processo di tempra, modificandolo quando necessario secondo adeguati accorgimenti. Ciò è tutt'altro che banale: infatti, per pezzi di grandi dimensioni, la simulazione agli elementi finiti permette di evitare ingenti costi di sperimentazione. Il FEM, infatti, permette di effettuare simulazioni virtuali altrimenti impossibili o dai costi estremamente elevati nella realtà, ancorché approssimate. Si sottolinea inoltre che il modello messo a punto prevede la taratura del coefficiente di scambio termico convettivo e del coefficiente di dilatazione termica tramite dati sperimentali, ottenuti nelle reali condizioni di esecuzione del trattamento termico. Ciò permette di diminuire il grado di incertezza dei risultati assicurandone la bontà.

## Capitolo 8

### Conclusioni

Il modello FEM si è dimostrato estremamente efficace nella risoluzione delle problematiche che nascono durante il raffreddamento dei forgiati di grosse dimensioni. Grazie ad esso, è possibile stimare in maniera molto precisa l'andamento del coefficiente conduttivo  $h$ . La simulazione ad elementi finiti, permette una stima dell'andamento della temperatura in funzione del tempo che ricalca perfettamente l'andamento rilevato dalle termocoppie. I vantaggi ottenuti dalla simulazione termica sono numerosi:

- permette di stimare il coefficiente convettivo  $h$ , che può essere utilizzato per pezzi temprati in modo analogo.
- permette di conoscere la curva di raffreddamento  $e$ , di conseguenza, i costituenti strutturali che si formano durante il raffreddamento in ogni punto del pezzo.
- permette di modellare la deformazione di un componente, trattato termicamente, in funzione del tempo.

A ciò si aggiunge la possibilità di accoppiare l'analisi meccanica a quella termica in modo da determinare le tensioni residue alla fine del trattamento. Il modello, per come è stato costruito, è estremamente robusto, e si dimostra adeguato anche per pezzi caratterizzati da geometrie molto diverse.

Le potenzialità di questa metodologia sono molteplici:

- è possibile identificare le cause della rottura del componente
- è possibile testare l'efficienza delle misure correttive prese per evitare ulteriori cedimenti
- grazie alla conoscenza delle tensioni residue presenti all'interno di un componente, si possono prevedere, e quindi prevenire, eventuali rotture dei componenti temprati.

L'analisi agli elementi finiti è quindi da considerare uno strumento estremamente potente per la previsione del gradiente di temperatura e di tensioni residue all'interno di componenti trattati termicamente. Per forgiati di grandi dimensioni, non è immaginabile un test empirico su pezzi reali; i costi e i tempi di realizzazione sono infatti incompatibili con le esigenze di mercato. La modellazione analitica delle tensioni residue, d'altra parte, è estremamente complessa e può essere fatta solo per pezzi di geometria semplice molto differenti da componenti reali. Gli elementi finiti, al contrario, non sono influenzati dalla complessità del pezzo.

Per questi motivi, si può concludere, che il metodo presentato sia efficace e robusto e che sia applicabile ad una vasta gamma di componenti.