

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



**OTTIMIZZAZIONE DEL  
TRATTAMENTO TERMICO DI  
RECIPIENTI IN PRESSIONE**

Relatore:

Prof. Marco Virginio BONIARDI .....

Tutor Aziendale:

Ing. Alberto DEL FAVERO .....

Correlatore:

Ing. Federica VIGNATI .....

Tesi di Laurea di

Filippo NORIS

Matr. 771214

Anno Accademico 2011-2012



# Ringraziamenti

Il ringraziamento più forte e sentito va ai miei genitori, Giuliano e Vittorina, ai quali dedico questo lavoro di tesi. Loro non solo hanno sostenuto in tutti i modi gli studi, ma mi hanno anche spronato a dare sempre il massimo, sia nell'università che nella vita di tutti i giorni, permettendomi così di "non perdere mai di vista l'obiettivo" della laurea.

Ringrazio vivamente l'azienda Tenaris Dalmine S.p.A., in modo particolare la Divisione Bombole diretta dal Dott. Giorgio Boccellato, che mi ha dato l'opportunità di sviluppare il lavoro di tesi. Grazie ad Andrea Nemesi, per avermi permesso di compiere la prima esperienza professionale e a Tiziana Nani per il mio primo colloquio di lavoro. Grazie soprattutto al tutor aziendale Ing. Alberto del Favero, che costantemente mi ha affiancato nello sviluppo del lavoro dedicandomi buona parte delle sue giornate di lavoro, e per tutta la fiducia mostrata verso le mie capacità. Grazie anche agli altri colleghi come Raul Posatieris, Damiano Zoggia, Gianluca Bassanini, Marco Esposito, Edoardo D'Ercole, Manuel Milani, Stefano Capponi, e tutti gli altri che anche solo con un piccolo consiglio hanno potuto aiutarmi durante questo periodo di stage. Grazie anche ad Alasdair Beveridge per la correzione della parte in inglese.

Grazie al Prof. Marco Boniardi per aver dato la sua disponibilità ad essere relatore di questa tesi, e per i preziosi consigli in fase di redazione della stessa.

Grazie all'Ing. Vignati, che mi ha seguito nella stesura delle parti più teoriche della tesi e ha saputo valorizzare tutte le mie competenze, e grazie di cuore anche a Federica che in quest'anno e mezzo ha reso concreto ciò che prima era soltanto un sogno: la vita accanto ad una persona come lei.

Ringrazio mio fratello Samuel che con Roberta mi ha regalato uno splendido nipotino, Alessandro (il secondo dovrebbe nascere a momenti, Francesco). Grazie anche perché in questi anni non mi avete mai fatto mancare il vostro supporto, soprattutto nel periodo in cui ero ospite della Signora di Milano.

Vorrei ringraziare anche Giorgio, Emanuele e Patrizia, Diletta e Aurora che in questi ultimi due anni di laurea magistrale mi hanno ospitato e mi hanno fatto sentire in ogni momento davvero come a casa.

Non posso dimenticare i miei compagni e colleghi di università, che nel corso degli studi sono diventati anche amici come Davide, Damiano, Carletto, Gigi, Marco P., Roberto, Giampiero, Francesca. Grazie per esserci aiutati a vicenda negli studi, per aver sofferto durante gli esami, per aver inventato almeno un centinaio di soprannomi e per tutte le occasioni che abbiamo avuto di incontrarci fuori dall'università. Spero vivamente di rimanere in contatto con voi.

Ringrazio i miei amici di Rigosa, i quali anche da lontano hanno fatto sempre sentire il loro sostegno: Jessica, Vanessa, Gianluca, Daniele, il Maestro, Podèt e grazie anche a Roberto, Sara e Daniela, Stefania e Lisaaa. Ringrazio anche gli amici acquisiti di Legnano e dintorni.



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>xii</b>
<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Trattamenti Termici</b>	<b>7</b>
1.1 Diagramma di Stato . . . . .	8
1.2 Classificazione . . . . .	10
1.3 Influenza della velocità di raffreddamento . . . . .	12
1.4 Trattamenti termici effettuati sui bomboloni . . . . .	19
<b>2 Modello Matematico</b>	<b>27</b>
2.1 Trasmissione del calore . . . . .	27
2.2 Equazione generale della conduzione termica . . . . .	29
2.3 Termine convettivo . . . . .	33
2.4 Irraggiamento . . . . .	35
<b>3 Validazione</b>	<b>41</b>
3.1 Stato dell'arte . . . . .	42

3.2	Impostazione delle simulazioni numeriche . . . . .	43
3.3	Prima prova sperimentale . . . . .	52
3.4	Confronto prova sperimentale vs. FEM . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Nuove Condizioni di Trattamento</b>	<b>63</b>
4.1	Trattamento in doppio e multiplo . . . . .	64
4.2	Analisi preliminare . . . . .	67
4.3	Individuazione dei nuovi parametri di trattamento . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Confronto con prova sperimentale</b>	<b>89</b>
5.1	Preparazione della prova sperimentale . . . . .	91
5.2	Risultati della prova sperimentale . . . . .	100
5.3	Confronto simulazioni con risultati sperimentali . . . . .	111
5.4	Revisione dei parametri . . . . .	115
	<b>Conclusioni</b>	<b>119</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>122</b>

# Elenco delle figure

1	<i>Bombole realizzate da Tenaris Dalmine . . . . .</i>	2
2	<i>Bomboloni realizzati da Tenaris Dalmine . . . . .</i>	2
3	<i>Prodotti speciali realizzati da Tenaris Dalmine . . . . .</i>	3
4	<i>Stazione di servizio per autobus a idrogeno, inaugurata il 30 maggio 2012 a Rosenholm, Norvegia . . . . .</i>	5
1.1	<i>Andamento schematico della temperatura durante un trattamento termico . . . . .</i>	7
1.2	<i>Diagramma di stato Ferro-Carbonio . . . . .</i>	9
1.3	<i>Schema della variazione dei punti critici in un acciaio ipoeutettoide in funzione della velocità di raffreddamento . . . . .</i>	12
1.4	<i>Trasformazioni anisotermie dell'austenite per un acciaio di composizione ipoeutettoide . . . . .</i>	13
1.5	<i>Grani di austenite . . . . .</i>	14
1.6	<i>Grani di ferrite . . . . .</i>	15
1.7	<i>Lamelle di perlite . . . . .</i>	16
1.8	<i>Struttura bainitica . . . . .</i>	16
1.9	<i>Struttura martensitica . . . . .</i>	17
1.10	<i>Provino e schema della prova Jominy . . . . .</i>	18

1.11	<i>Curva di temprabilità, confronto tra acciaio al carbonio e acciaio legato</i>	18
1.12	<i>Andamento della temperatura durante un intero trattamento di bonifica effettuato sui bomboloni</i>	20
1.13	<i>Valutazione approssimata della velocità di raffreddamento per i vari mezzi tempranti</i>	20
1.14	<i>Influenza della durata del rinvenimento sul carico di rottura di un acciaio da bonifica</i>	21
1.15	<i>Influenza della temperatura di rinvenimento sulle proprietà meccaniche di un acciaio da bonifica</i>	22
1.16	<i>Mappa dell'impianto di trattamento</i>	23
1.17	<i>Panoramica dell'impianto di trattamento</i>	23
1.18	<i>Architettura dei forni a pozzo</i>	24
1.19	<i>Vista della vasca di tempra durante un trattamento</i>	25
1.20	<i>Vasca di lavaggio</i>	25
1.21	<i>Bombolone inserito nel pozzo per il raffreddamento in aria calma</i>	26
1.22	<i>Cabina di controllo</i>	26
2.1	<i>Bomboloni incandescenti all'uscita dal forno di alta temperatura</i>	28
2.2	<i>Radiazione assorbita, riflessa, trasmessa</i>	36
3.1	<i>Esempio di output di Comsol, distribuzione del campo di temperatura in una lampadina</i>	42
3.2	<i>Modello 2D piano, forno e bombolone</i>	44
3.3	<i>Modello 2D assialsimmetrico, forno e bombolone</i>	44
3.4	<i>Condizioni al contorno impostate su Comsol:temperatura del forno, modello 2D piano</i>	46



3.5	<i>Condizioni al contorno impostate su Comsol: temperatura del forno, modello 2D assialsimmetrico . . . . .</i>	46
3.6	<i>Condizione di interfaccia impostata su Comsol: convezione dell'aria sulle pareti del bombolone, modello 2D piano . . . . .</i>	47
3.7	<i>Condizione di interfaccia impostata su Comsol: convezione dell'aria sulle pareti del bombolone, modello 2D assialsimmetrico</i>	48
3.8	<i>Report della temperatura nel forno durante un trattamento di Tempra . . . . .</i>	49
3.9	<i>Report della temperatura nel forno durante un trattamento di Rinvenimento . . . . .</i>	50
3.10	<i>Mesh, modello 2D sezione trasversale . . . . .</i>	51
3.11	<i>Mesh, modello 2D assialsimmetrico . . . . .</i>	52
3.12	<i>Strumentazione del bombolone . . . . .</i>	53
3.13	<i>Posizione termocoppie sul bombolone durante la prima prova sperimentale . . . . .</i>	54
3.14	<i>Quadro generale della prima replica: prima prova strumentata</i>	55
3.15	<i>Quadro generale della seconda replica: prima prova strumentata</i>	57
3.16	<i>Tempra, confronto modello sezione trasversale 2D . . . . .</i>	58
3.17	<i>Tempra, confronto modello 2D assialsimmetrico . . . . .</i>	59
3.18	<i>Rinvenimento, confronto modello sezione trasversale 2D . . . . .</i>	60
3.19	<i>Rinvenimento, confronto modello 2D assialsimmetrico . . . . .</i>	60
4.1	<i>Struttura per il trattamento in doppio . . . . .</i>	64
4.2	<i>Struttura per il trattamento a 4 . . . . .</i>	65
4.3	<i>Struttura per il trattamento a 6 . . . . .</i>	65
4.4	<i>TRT in doppio . . . . .</i>	66

4.5	<i>TRT multiplo x4</i> . . . . .	66
4.6	<i>TRT multiplo x6</i> . . . . .	66
4.7	<i>Distribuzione di temperatura sull'ogiva del bombolone al raggiungimento della temperatura target</i> . . . . .	68
4.8	<i>Individuazione della temperatura target e della rampa di salita</i>	68
4.9	<i>Analisi preliminare, risultati al variare dello spessore</i> . . . . .	70
4.10	<i>Analisi preliminare, risultati al variare del diametro</i> . . . . .	70
4.11	<i>Analisi preliminare, risultati al variare della lunghezza</i> . . . . .	71
4.12	<i>Analisi preliminare, risultati al variare della temperatura del forno</i> . . . . .	73
4.13	<i>Analisi preliminare, trattamento in doppio</i> . . . . .	75
4.14	<i>Analisi preliminare, trattamento multiplo x4</i> . . . . .	76
4.15	<i>Analisi preliminare, trattamento multiplo x6</i> . . . . .	77
4.16	<i>Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento, esempio di calcolo</i> . . . . .	80
4.17	<i>Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento con la geometria 2D della sezione trasversale del bombolone, esempio di calcolo per un trattamento in doppio</i> . . . . .	81
4.18	<i>Determinazione ritardo ogiva, esempio di calcolo con modello 2D assialsimmetrico</i> . . . . .	82
4.19	<i>Durezza in funzione della temperatura di rinvenimento, risultati delle prove meccaniche</i> . . . . .	84
4.20	<i>Carico di rottura in funzione della temperatura di rinvenimento, risultati delle prove meccaniche</i> . . . . .	84
4.21	<i>Carico di snervamento in funzione della temperatura di rinvenimento, risultati delle prove meccaniche</i> . . . . .	85
4.22	<i>Durezza in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe</i> . . . . .	85

5.1	<i>Bomboloni per la prova strumentata . . . . .</i>	90
5.2	<i>Tornitura dei bocchelli . . . . .</i>	91
5.3	<i>Cravatta per fissaggio dei bomboloni alla struttura di trattamento in doppio . . . . .</i>	91
5.4	<i>Posizione termocoppie per la prova strumentata . . . . .</i>	92
5.5	<i>Fori per il posizionamento delle termocoppie nello spessore del bombolone . . . . .</i>	93
5.6	<i>Posizione termocoppie nello spessore, in prossimità del diametro interno . . . . .</i>	93
5.7	<i>Individuazione della posizione delle termocoppie sul bombolone</i>	94
5.8	<i>Taglio dei tegoli . . . . .</i>	95
5.9	<i>Inserimento termocoppie all'interno del bombolone . . . . .</i>	96
5.10	<i>Posizionamento delle termocoppie . . . . .</i>	96
5.11	<i>Fissaggio termocoppie con un supporto saldato al bombolone .</i>	97
5.12	<i>Identificazione termocoppie . . . . .</i>	97
5.13	<i>Saldatura dei tegoli nella loro posizione originaria . . . . .</i>	98
5.14	<i>Matasse delle termocoppie da srotolare . . . . .</i>	99
5.15	<i>Preparazione dei cavi delle termocoppie . . . . .</i>	99
5.16	<i>Collegamento delle termocoppie al registratore . . . . .</i>	99
5.17	<i>Collegamento bombolone - struttura per il trattamento in doppio</i>	100
5.18	<i>Configurazione di trattamento in doppio . . . . .</i>	101
5.19	<i>Prova strumentata, andamento della temperatura durante tutto il trattamento . . . . .</i>	102
5.20	<i>Prova strumentata, dettaglio della fase di austenitizzazione . .</i>	103

5.21	<i>Prova strumentata, dettaglio della fase di rinvenimento . . . .</i>	103
5.22	<i>Temperatura del forno V3 durante il trattamento di austenitizzazione . . . . .</i>	104
5.23	<i>Temperatura del forno V4 durante il trattamento di rinvenimento . . . . .</i>	105
5.24	<i>Temperature a confronto tra le varie parti del bombolone durante l'austenitizzazione . . . . .</i>	106
5.25	<i>Temperature a confronto tra le varie parti del bombolone durante il rinvenimento . . . . .</i>	106
5.26	<i>Temperature a confronto tra zona più o meno irraggiata del bombolone durante l'austenitizzazione . . . . .</i>	107
5.27	<i>Temperature a confronto tra la zona più irraggiata e meno irraggiata del bombolone durante il rinvenimento . . . . .</i>	108
5.28	<i>Temperature a confronto tra i due bomboloni durante l'austenitizzazione . . . . .</i>	108
5.29	<i>Temperature a confronto tra i due bomboloni durante il rinvenimento . . . . .</i>	109
5.30	<i>Temperatura durante la fase di tempra in acqua quench . . . .</i>	110
5.31	<i>Temperatura durante la fase di raffreddamento in aria . . . .</i>	110
5.32	<i>Trattamento di austenitizzazione, confronto con simulazioni TRT in doppio . . . . .</i>	112
5.33	<i>Trattamento di austenitizzazione, confronto con simulazioni TRT in doppio con la rampa reale . . . . .</i>	113
5.34	<i>Trattamento di rinvenimento, confronto con simulazioni TRT in doppio . . . . .</i>	114
5.35	<i>Confronto tra le tre rampe per il forno di alta temperatura . .</i>	117
5.36	<i>Temperatura del corpo del bombolone durante il trattamento di alta al variare delle rampe di riscaldamento del forno. . . . .</i>	117

# Elenco delle tabelle

1.1	<i>Regole utilizzo impianto di trattamento termico . . . . .</i>	22
3.1	<i>Parametri del trattamento di bonifica per la prima prova strumentata . . . . .</i>	55
4.1	<i>Analisi preliminare, risultati al variare dello spessore . . . . .</i>	69
4.2	<i>Analisi preliminare, risultati al variare del diametro . . . . .</i>	69
4.3	<i>Analisi preliminare, risultati al variare della lunghezza . . . . .</i>	71
4.4	<i>Analisi preliminare, risultati al variare della temperatura del forno . . . . .</i>	72
4.5	<i>Analisi preliminare TRT multiplo . . . . .</i>	74
4.6	<i>Tempi di mantenimento VdTüv . . . . .</i>	79
4.7	<i>Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento, esempio di calcolo . . . . .</i>	79
4.8	<i>Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento, esempio di calcolo per un trattamento in doppio . . . . .</i>	80
4.9	<i>Risultati simulazione per determinare il ritardo dell'ogiva, esempio di calcolo con modello 2D assialsimmetrico . . . . .</i>	81
4.10	<i>Parametri di rinvenimento utilizzati in precedenza, esempio di calcolo . . . . .</i>	86

4.11	<i>Nuovi parametri di rinvenimento calcolati con il coefficiente di Hollomon-Jaffe, esempio di calcolo . . . . .</i>	87
4.12	<i>Parte del database dei parametri di trattamento termico per tutti i bomboloni . . . . .</i>	88
5.1	<i>Specifiche dei bomboloni della prova strumentata . . . . .</i>	90
5.2	<i>Parametri del trattamento di bonifica per la prova strumentata in doppio . . . . .</i>	101
5.3	<i>Prova strumentata, sintesi delle singole fasi . . . . .</i>	102
5.4	<i>Confronto tra simulazioni e dati sperimentali sull'ogiva . . . .</i>	114
5.5	<i>Confronto tra il mantenimento secondo normativa e dati sperimentali . . . . .</i>	115

# Sommario

Il lavoro presentato in questa tesi riguarda lo studio del trattamento termico di bonifica effettuato sui bomboloni realizzati da Tenaris Dalmine S.p.A.. In modo particolare è stato creato un modello agli elementi finiti attraverso Comsol Multiphysics simulando numericamente il comportamento dei recipienti in pressione inseriti nel forno, per individuare la distribuzione spaziale e temporale della temperatura sul corpo del bombolone durante le fasi di riscaldamento dei trattamenti di tempra e rinvenimento.

Il primo modello geometrico realizzato è stato quello 2D della sezione trasversale del bombolone inserito nel forno, per studiare ciò che accade sul corpo del bombolone; il secondo quello 2D assialsimmetrico della sezione longitudinale, per meglio comprendere ciò che accade nelle parti più critiche del bombolone stesso, come le ogive.

La validazione del modello è stata effettuata confrontando i risultati delle simulazioni con i dati ricavati da una prima prova sperimentale, durante la quale veniva misurata e registrata la temperatura del bombolone per tutta la durata di un trattamento di bonifica in singolo (soltanto un bombolone nel forno).

L'esito positivo della fase di validazione ha permesso quindi di utilizzare il modello creato, per individuare la durata ottimale del trattamento di tutti i bomboloni prodotti in azienda, mentre per la determinazione della temperatura sono state analizzate prove meccaniche effettuate sui bomboloni durante il periodo di tesi. Con il nuovo modello, utilizzando la geometria 2D della sezione trasversale, è stato possibile simulare inoltre i trattamenti multipli, vale a dire il trattamento di più bomboloni contemporaneamente.

Una seconda prova strumentata, eseguita nel luglio del 2012 per monitorare la temperatura durante un trattamento in doppio, ha permesso infine di verificare la correttezza della durata individuata attraverso il simulatore: se per la fase di rinvenimento era stata impostata nella maniera corretta, per la tempra si è resa necessaria una revisione delle condizioni al contorno.

In seguito alla revisione e a un nuovo confronto con i dati sperimentali, sono stati individuati i nuovi parametri ottimizzati per il trattamento di tempra.

Il modello può così essere utilizzato anche per individuare parametri di trattamento di bomboloni ancora in progettazione, riducendo il numero di prove sperimentali e di conseguenza dei costi correlati.

**Parole chiave:** trattamento termico; tempra; rinvenimento; analisi FEM; bombolone





# Abstract

The work presented in this thesis refers to the heat treatment performed on jumbo cylinders produced by Tenaris Dalmine S.p.A.. During the study, a finite elements model has been created through Comsol Multiphysics, simulating the behaviour of pressure vessels inserted in the furnace, to find the distribution of temperature on the piece during the process (the step of austenitizing and tempering).

The first geometric model created was the 2D of cross section of cylinder, to study what happens along the body; the second model was the 2D axisymmetric of longitudinal section, to understand what happens in the most critical part of the cylinder, such as the shoulders.

The validation of the model has been performed by comparing simulations results with data obtained from a first instrumented test: in this test it was measured and registered cylinder temperature during a single heat treatment.

The positive outcome of the validation phase allowed to use the model to find the optimal duration of treatment of all cylinders made in Tenaris, while to define temperature it has been analyzed mechanical tests performed from march 2012. With this new finite elements model, using the 2D cross section geometry, it has still been possible to study multiple treatments (a treatment with more jumbo cylinders in furnace at the same time).

An instrumented test, done in july 2012 to measure temperature during a double treatment, allowed to verify if the duration established by the simulator was correct: while there was no problem for tempering, for austenitizing the boundary conditions have been revised.

After review, and after a new comparison with experimental data, heat treatment parameters have been optimized.

The created model can also be used to find treatment parameters of cylinders still in design stage, reducing experimental tests number and then related costs.

**Key words:** heat treatment; austenitizing; tempering; FEM analysis; jumbo cylinder



# Introduzione

I trattamenti termici rappresentano una tappa fondamentale nella realizzazione di qualsiasi componente meccanico. Si tratta processi che sfruttano l'effetto del calore al fine di ottenere determinate proprietà strutturali, meccaniche e tecnologiche in un metallo, diverse da quelle di partenza.

Gli obiettivi di un trattamento termico possono essere ad esempio, quello di rendere lavorabile alle macchine utensili un materiale, indurire lo strato superficiale di un componente per evitarne l'usura, oppure come nel caso dei recipienti in pressione, incrementare la resistenza meccanica del componente, il quale deve resistere a sollecitazioni elevate per effetto della pressione (anche 500 *bar*).

Già alla fine del 2° millennio a.C., in Etruria si applicavano quelli che oggi sono ritenuti i rudimenti degli attuali trattamenti termici. Per mezzo di tecniche, allora esclusiva prerogativa di alcuni gruppi nomadi, si era scoperto come incrementare drasticamente la durezza e la resistenza all'usura delle lame di coltelli e spade.

Al giorno d'oggi il trattamento termico è condotto in impianti pressoché automatizzati con sistemi di gestione computerizzati in grado di controllare le singole fasi del processo, unendo all'elevata produttività un'ottima ripetibilità dei processi.

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare i parametri per il trattamento termico di *bonifica* effettuato sui bomboloni realizzati da Tenaris Dalmine S.p.A.. Tenaris è una multinazionale del gruppo Techint, che realizza e fornisce a livello mondiale tubi e servizi per l'industria dell'energia, per applicazioni industriali e per alcuni impieghi specialistici. In modo particolare, la Divisione Bombole di Tenaris Dalmine realizza recipienti in pressione con acciaio e tubo fabbricati direttamente nello stabilimento di Dalmine.

La Divisione Bombole (CYDI, Cylinder Division) realizza:

- Bombole, di capacità fino a 150l con diametro esterno compreso tra 168 e 273mm (fig. 1);



**Figura 1:** *Bombole realizzate da Tenaris Dalmine*

- Bomboloni, di capacità superiore a 150l (fino a 3000l) con diametro esterno compreso tra 323 e 622mm (fig. 2);



**Figura 2:** *Bomboloni realizzati da Tenaris Dalmine*



**Figura 3:** *Prodotti speciali realizzati da Tenaris Dalmine*

- Prodotti speciali, per le applicazioni sottomarine (fig. 3).

Questi recipienti sono destinati al trasporto e lo stoccaggio di gas a elevata pressione (come idrogeno, gas naturale, acetilene ecc...).

Il processo produttivo ha inizio da un tubo senza saldatura, fornito dal laminatoio di Dalmine. La prima fase prevede la formatura delle ogive alle estremità del tubo, seguita poi dal trattamento termico e dai controlli non distruttivi per individuare eventuali difetti sul componente. Dopo la lavorazione meccanica delle estremità, si effettua poi la prova idraulica, durante la quale viene testata la tenuta del bombolone ad una pressione pari a una volta e mezzo quella di esercizio. In caso di esito positivo si passa quindi al montaggio degli accessori e alla verniciatura. A questo punto il recipiente in pressione è pronto per la spedizione.

Nello specifico questo lavoro ha prodotto un database completo, per ciascun bombolone, di tempi e temperature ottimali delle due fasi di riscaldamento di cui si compone il trattamento di bonifica (tempra e rinvenimento).

Il lavoro si è reso necessario principalmente per:

- Creare un modello agli elementi finiti, al fine di ottenere una rappresentazione del processo di trattamento termico che consenta di superare le ipotesi semplificative alla base del modello alle differenze finite utilizzato fino a questo momento in azienda, e confrontare i risultati con

i dati ricavati da una prima prova sperimentale effettuata dall'azienda per studiare i trattamenti in singolo;

- Studiare in maniera più accurata i trattamenti multipli, in particolare modo di due bomboloni inseriti nel forno contemporaneamente, e confrontare i risultati con una seconda prova strumentata effettuata con lo scopo di comprendere meglio ciò che accade durante un trattamento doppio.

Nell'autunno 2011 è stato infatti implementato un modello alle differenze finite dell'equazione di trasmissione del calore in Microsoft Excel per individuare tempi e temperature del solo trattamento di rinvenimento. Alla base di questo programma vi erano numerose ipotesi semplificative che non permettevano di estendere lo studio né al comportamento delle ogive (le zone più critiche per il trattamento di un bombolone), né ai trattamenti multipli (vale a dire di più bomboloni contemporaneamente nel forno).

Con questa tesi, da Marzo ad Agosto 2012, è stato possibile estendere lo studio a tutti gli aspetti del trattamento attraverso simulazioni effettuate tramite Comsol Multiphysics, che permette di trovare la distribuzione di temperatura nello spazio e nel tempo risolvendo le equazioni di trasmissione del calore: la scelta di utilizzare questo tipo di software è dovuta sia alla migliore discretizzazione (elementi finiti contro differenze finite) che alla possibilità di lasciar cadere alcune delle precedenti ipotesi restrittive. Si è indagato in particolar modo il trattamento nelle parti più critiche come le ogive e successivamente si è implementato anche lo studio dei trattamenti multipli. Per ogni bombolone e per entrambe le fasi di trattamento si sono individuati così i parametri ottimali di trattamento (durata e temperatura) al fine di garantire un riscaldamento omogeneo e appropriate caratteristiche meccaniche. Un'ulteriore prova strumentata è stata poi effettuata nel luglio 2012 per validare i risultati delle numerose simulazioni effettuate.

Questa tesi è articolata in cinque capitoli.

Nel primo capitolo viene presentata una trattazione teorica sui trattamenti termici, in cui dapprima si pongono le basi per lo studio delle varie dinamiche di trattamento, per poi passare alla classificazione di tutti i tipi di trattamento. Successivamente si pone l'attenzione sull'influenza della velocità di raffreddamento rispetto alle caratteristiche meccaniche, per poi descrivere in particolare il trattamento di bonifica effettuato sui bomboloni prodotti in azienda.

Il secondo capitolo presenta invece le equazioni che stanno alla base della trasmissione del calore, le quali, implementate attraverso il software Comsol



**Figura 4:** *Stazione di servizio per autobus a idrogeno, inaugurata il 30 maggio 2012 a Rosenholm, Norvegia*

Multiphysics, permetteranno di individuare l'andamento spaziale e temporale della temperatura sul bombolone. In particolar modo vengono studiate le tre tipologie di trasmissione del calore (conduzione, convezione e irraggiamento) e le rispettive equazioni.

Nel terzo capitolo sono presentate le ipotesi alla base del modello agli elementi finiti, le condizioni al contorno e le discretizzazioni spaziale e temporale. La validazione dei risultati insieme ai parametri è stata effettuata confrontando i risultati di una campagna di simulazioni in Comsol con i relativi dati sperimentali di una prima campagna sperimentale.

Nel quarto capitolo si individuano le nuove condizioni di trattamento termico. Sulla base dei risultati ricavati nel capitolo 3, sono state dapprima create tre nuove geometrie sul simulatore, in modo tale da poter riprodurre anche le condizioni di trattamento di più bomboloni contemporaneamente. Al termine di questa fase è stata fatta un'analisi preliminare per comprendere quali sono i fattori significativi per la determinazione della durata del trattamento, seguita dall'individuazione della durata e della temperatura per ogni bombolone prodotto in azienda (di cui verrà riportato un esempio di calcolo per una tipologia di bombolone).

Il quinto capitolo descrive una seconda prova strumentata effettuata per verificare la bontà dei parametri ricavati dalle simulazioni e per approfondire lo studio del trattamento in doppio, il quale presenta alcune criticità (come il riscaldamento nella parte di bombolone meno irraggiata dal forno). Viene pre-

sentata la preparazione dei bomboloni per la prova assieme alle motivazioni alla base del posizionamento delle termocoppie di misura della temperatura; la seconda parte del capitolo illustra i risultati della prova e il confronto con ciò che era stato l'output del simulatore Comsol, evidenziando una possibile miglioria apportabile al modello e i risultati ottenuti alla luce di questo accorgimento.

Infine vengono presentate conclusioni di carattere generale riguardanti il lavoro svolto e possibili sviluppi futuri.

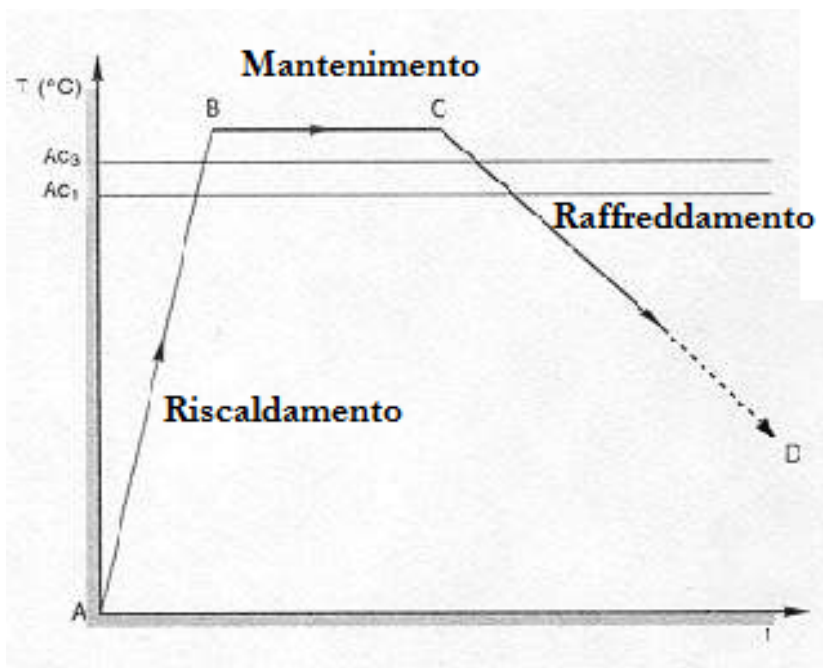


# Capitolo 1

## Trattamenti Termici

Si definiscono trattamenti termici quelle operazioni che, agendo sulla temperatura del materiale allo stato solido, permettono di ottenere determinate strutture metallurgiche e caratteristiche meccaniche desiderate.

Ogni trattamento termico è suddiviso in tre fasi principali, come raffigurato in fig. 1.1:



**Figura 1.1:** Andamento schematico della temperatura durante un trattamento termico

1. Riscaldamento del pezzo fino alla temperatura impostata per il trattamento;
2. Mantenimento di questa temperatura per un determinato periodo di tempo;
3. Raffreddamento secondo una legge stabilita;

Ognuna di queste fasi può essere effettuata secondo modalità differenti, e in base a questo si distinguono vari tipi di trattamenti termici. Per conoscere tutte le condizioni con cui effettuare il trattamento di un acciaio e per comprenderne l'effetto sulla struttura di una lega metallica è bene prendere in considerazione:

- Diagramma di stato della lega
- L'influenza della velocità di raffreddamento sulla struttura degli acciai

## 1.1 Diagramma di Stato

Il diagramma di stato definisce le strutture di equilibrio di un metallo o una lega metallica ad una determinata temperatura. I materiali utilizzati per la produzione dei bomboloni sono gli acciai  $34CrMo4$  e  $27CrMo4$ , quindi oltre agli elementi principali come ferro e carbonio, l'acciaio contiene una serie di altri elementi leganti per ottenere le proprietà meccaniche desiderate. Il diagramma di stato utilizzato per la comprensione del problema sarà comunque quello della lega ferro-carbonio (fig. 1.2) in quanto gli altri elementi sono presenti in minima quantità e tale diagramma approssima in maniera corretta il comportamento degli acciai utilizzati. Questo diagramma servirà per inquadrare il problema dal punto di vista qualitativo, mentre come parametri del materiale per le simulazioni, si utilizzeranno quelli effettivi degli acciai  $34CrMo4$  e  $27CrMo4$ .

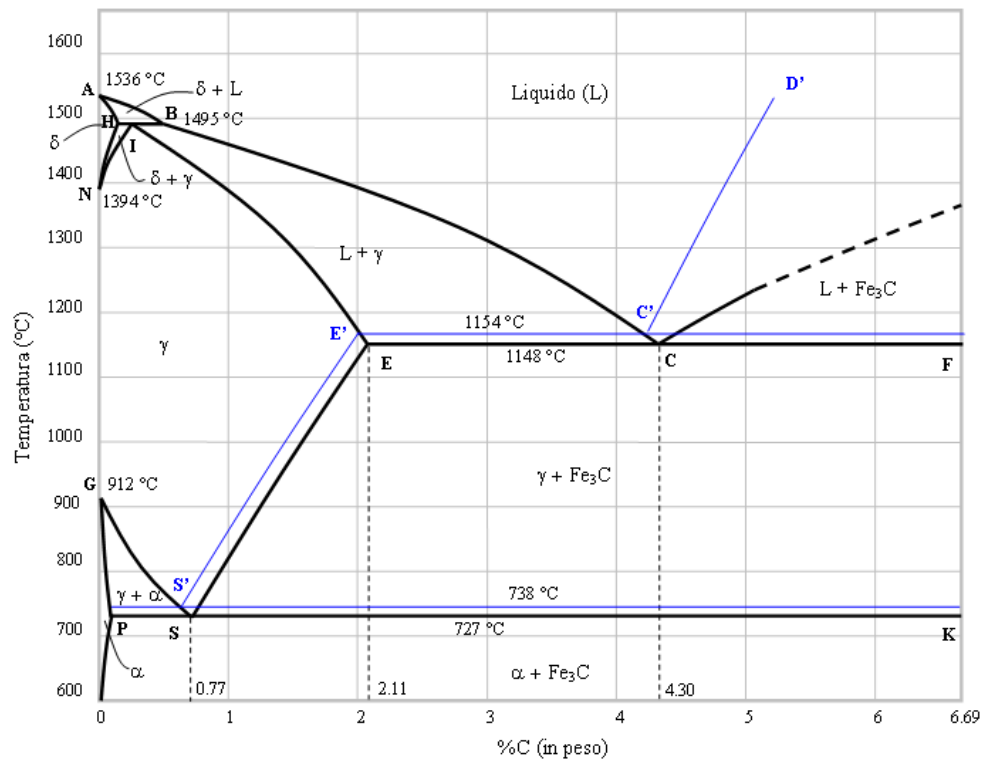


Figura 1.2: Diagramma di stato Ferro-Carbonio

Le curve sono ricavate applicando riscaldamenti e raffreddamenti quasi-statici in modo tale che ogni combinazione fra temperatura e composizione chimica fosse rappresentativa di uno stato di equilibrio.

Scendendo più nel dettaglio sul diagramma, in ascissa è indicata la composizione chimica percentuale della lega in peso (in questo caso la % di C), mentre in ordinata troviamo la temperatura; le linee che separano i vari campi indicano quindi secondo la % di carbonio le temperature alle quali avvengono i cambiamenti di fase.

I trattamenti termici avvengono sul materiale allo stato solido, ad una temperatura non superiore ai 900 °C, e per il presente caso di studio gli acciai considerati presentano una %C (in peso) inferiore allo 0,77%. S'indagherà quindi ciò che accade nella zona sinistra del diagramma in fig.1.2.

La prima importante distinzione tra i vari trattamenti termici discrimina quelli che prevedono un riscaldamento al di sopra o al di sotto dei punti critici (questa distinzione sarà utilizzata anche per classificare i trattamenti). I punti critici si individuano sul diagramma di stato Ferro-Carbonio attraverso

l'intersezione tra una linea verticale rappresentativa della composizione della lega e le linee di separazione delle varie fasi, vale a dire le linee **GS** e **PS** (fig.1.2).

- Punto critico  $A_3$ : è identificato sulla linea GS che separa la fase  $\gamma$  dell'austenite dalla fase  $\alpha + \gamma$  (ferrite + austenite);
- Punto critico  $A_1$ : è identificato sulla linea PS che separa la fase  $\gamma$  dell'austenite dalla fase  $\alpha + Fe_3C$  (perlite).

## 1.2 Classificazione

Con riferimenti alla letteratura accademica [1], si è scelto di classificare i trattamenti termici in base alla temperatura alla quale viene effettuato il trattamento, in modo particolare se tale temperatura è superiore o inferiore a quella dei punti critici.

### 1.2.1 Trattamenti con riscaldamento a temperatura superiore ai punti critici

Questi trattamenti permettono attraverso la fase di riscaldamento di arrivare ad una temperatura in cui avviene la trasformazione in austenite; se questa trasformazione avviene, è possibile poi con raffreddamenti più o meno drastici ottenere strutture cristalline più o meno resistenti. Tra questo tipo di trattamenti si trovano:

- **Ricottura**: questo trattamento, noto anche come *trattamento di ricottura completa*, prevede un riscaldamento ad una temperatura superiore ad  $A_3$  e un mantenimento a tale temperatura per un tempo necessario a garantire in tutto il materiale la trasformazione austenitica. Segue un raffreddamento lento, in forno, simile a quello per successivi stati di equilibrio. È un processo utilizzato per annullare qualsiasi trattamento effettuato in precedenza, con eliminazione di eventuali tensioni residue, alterazioni della microstruttura, segregazioni, ecc...
- **Normalizzazione**: riscaldamento al di sopra di  $A_3$  e mantenimento a tale temperatura per garantire la trasformazione in austenite e

successivo raffreddamento in aria calma. È un particolare tipo di ricottura effettuato per migliorare le caratteristiche meccaniche finali di un componente.

- **Tempra:** il riscaldamento è identico ai precedenti due tipi di trattamento; il raffreddamento è invece drastico in modo da far acquistare al componente struttura martensitica a temperatura ambiente, caratterizzata da grande durezza ma anche fragilità. Il rapido raffreddamento necessario alla tempra dell'acciaio si ottiene grazie ad un mezzo temprante che può essere acqua, soluzioni saline, olio, ecc.

Per evitare fenomeni di surriscaldamento, che provocano l'ingrossamento del grano, la temperatura alla quale deve essere portato l'acciaio deve essere al massimo una cinquantina di gradi sopra il punto critico  $A_3$  e la permanenza a tale temperatura non deve essere troppo prolungata.

### 1.2.2 Trattamenti con riscaldamento a temperatura inferiore ai punti critici

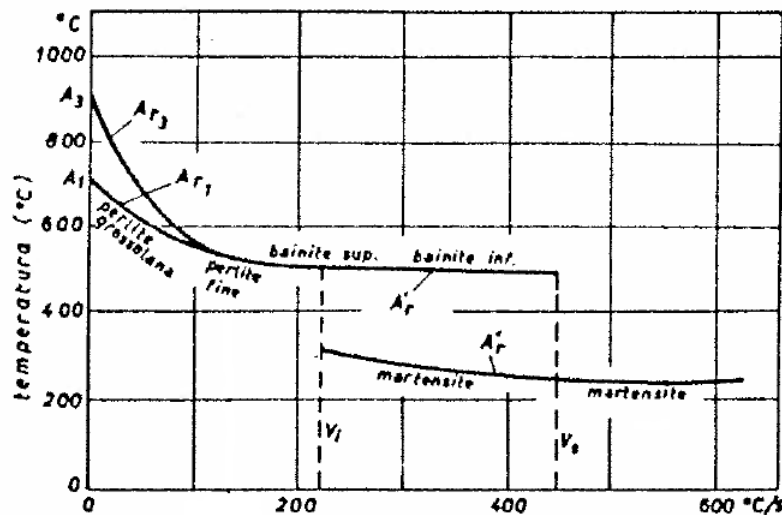
Questi trattamenti non prevedono trasformazioni di fase e sono effettuati principalmente con lo scopo di conferire al materiale il giusto compromesso tra elevata resistenza meccanica e duttilità:

- **Ricottura di addolcimento:** prevede un riscaldamento ad una temperatura inferiore ad  $A_1$  seguito da un mantenimento a tale temperatura per un tempo conveniente e un raffreddamento arbitrario. Questo trattamento migliora la lavorabilità e la deformabilità a freddo del materiale.
- **Rinvenimento:** riscaldamento al di sotto di  $A_1$ , mantenimento per un tempo sufficiente, raffreddamento fino a temperatura ambiente in un mezzo congruo e secondo una legge fissata. Il rinvenimento segue solitamente la fase di tempra, al fine di eliminare l'eccessiva durezza e fragilità acquisite dall'acciaio con questo trattamento. L'insieme delle operazioni di tempra e di rinvenimento prende il nome di *bonifica*.

### 1.3 Influenza della velocità di raffreddamento

La velocità di raffreddamento del componente durante il trattamento influenza in maniera importante la struttura metallurgica di un acciaio e di conseguenza le proprie caratteristiche meccaniche.

Per gli acciai del caso di studio, aventi % di carbonio pari a 34% e 27%, alla temperatura di circa 900°C è possibile avere unicamente la soluzione solida di carbonio nel ferro  $\gamma$  detta austenite. Durante il raffreddamento per successivi stati di equilibrio l'austenite si trasforma in ferrite e perlite ( $\alpha + Fe_3C$ ). Variando invece la velocità di raffreddamento è possibile ottenere a temperatura ambiente anche strutture come la bainite e la martensite. Per la descrizione delle varie microstrutture e relative proprietà si rimanda alla sez. 1.3.1.



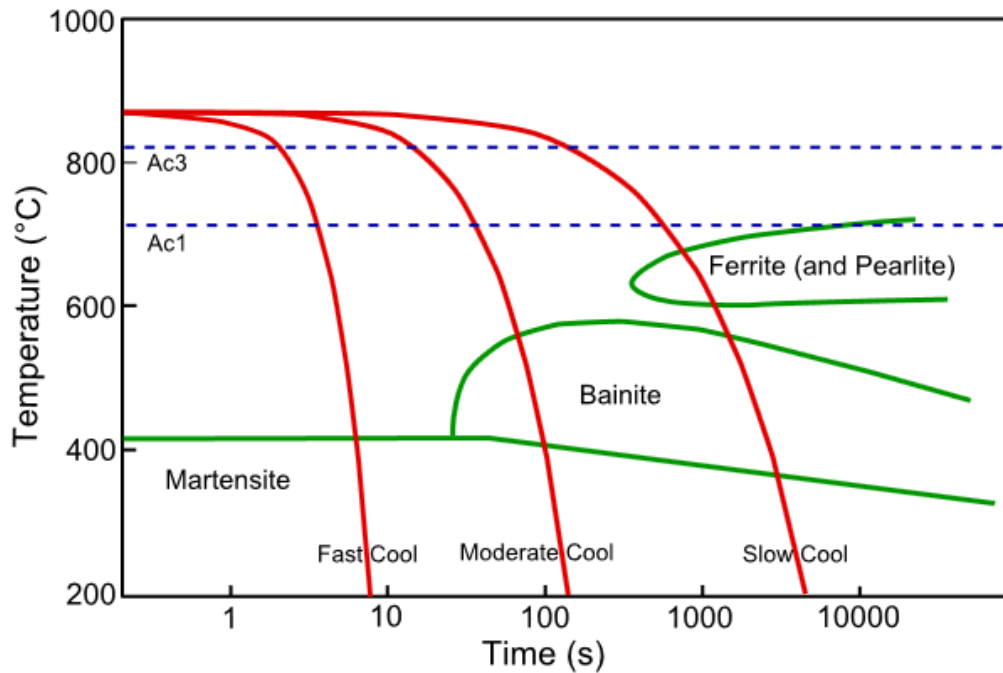
**Figura 1.3:** Schema della variazione dei punti critici in un acciaio ipoeuttoide in funzione della velocità di raffreddamento

Osservando il diagramma riportato in fig. 1.3 si può notare come aumentando la velocità di raffreddamento [ $^{\circ}C/s$ ] i punti  $A_3$  e  $A_1$ , che in fase di raffreddamento identifichiamo con  $A_{r3}$  e  $A_{r1}$  si abbassano per fenomeni di isteresi termodinamica, ed in particolare l'abbassamento di  $A_{r3}$  è maggiore, tanto che oltre un certo limite i punti critici arrivano a coincidere in un unico punto. L'austenite non si trasforma più in lamelle di perlite ma in lamelle sempre più fini di bainite, incrementando le proprie caratteristiche meccaniche.

Aumentando sempre più la velocità di raffreddamento si raggiunge la velocità indicata con  $V_i$  (detta *velocità critica inferiore di raffreddamento*) in cui la trasformazione dell'austenite avviene in parte ad una temperatura  $A'_r$  (trasformandosi in bainite) e in parte alla temperatura  $A''_r$  (trasformandosi in martensite).

Salendo ancora con la velocità si arriva a toccare  $V_s$  (detta *velocità critica superiore*) dove l'unica trasformazione possibile è quella dell'austenite in martensite in corrispondenza della temperatura individuata da  $A''_r$ .

Il diagramma di fig. 1.4 permette di individuare la struttura finale dell'acciaio in funzione della velocità di raffreddamento. Esso rappresenta le curve di trasformazione anisoterma dell'austenite (o diagramma CCT), vale a dire le possibili trasformazioni che interessano l'austenite in fase di raffreddamento.



**Figura 1.4:** *Trasformazioni anisoterme dell'austenite per un acciaio di composizione ipoeutettoide*

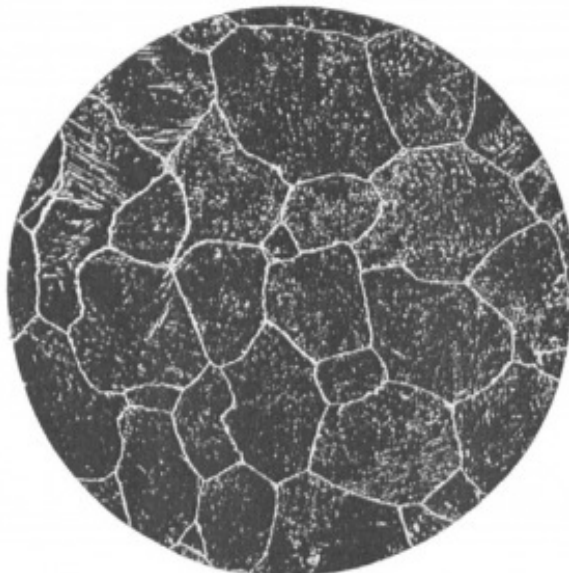
In ascissa è indicato il tempo trascorso dall'inizio del raffreddamento in scala logaritmica, mentre in ordinata la temperatura. In ogni istante temporale è possibile risalire al tipo di microstruttura che possiede il materiale seguendo le linee di raffreddamento (indicate in rosso), le quali possono essere più o meno pendenti a seconda della velocità di raffreddamento. In questo modo è possibile individuare la struttura anche a temperatura ambiente.

La posizione e la forma di tutte le linee che separano i campi delle varie fasi (indicate in verde), per una lega ferro-carbonio sono influenzate sia dal tenore di carbonio che dalla presenza di elementi di lega, i quali tendenzialmente spostano le curve verso destra favorendo la formazione di martensite anche a più basse velocità di raffreddamento.

### 1.3.1 Le strutture degli acciai e loro proprietà

Variando la velocità di raffreddamento di un acciaio, allontanandosi quindi dalle condizioni di raffreddamento per successivi stati di equilibrio dei diagrammi di stato, è possibile ottenere microstrutture diverse, che influenzano fortemente le proprietà del materiale. Le microstrutture che è possibile trovare più frequentemente durante il raffreddamento di un acciaio ipoeutettoideico sono:

- **Austenite:** col termine austenite viene indicata la soluzione solida dell'acciaio in fase  $\gamma$  presente ad alta temperatura, tra 800 e 1400 °C circa. E' la fase che si ottiene dopo aver riscaldato il materiale ad una temperatura maggiore di quella dei punti critici (in modo particolare al di sopra di  $A_3$ . La dimensione del grano austenitico (fig. 1.5) ha influenza sulle proprietà del materiale a temperatura ambiente;

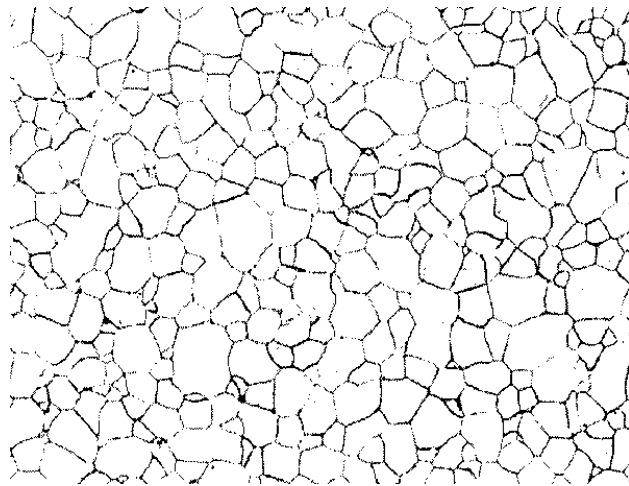


**Figura 1.5:** *Grani di austenite*



- **Ferrite:** il termine ferrite viene utilizzato per indicare sia la soluzione solida del carbonio col ferro chiamata fase  $\alpha$  (alla temperatura di 600 - 900 °C circa) sia quella chiamata fase  $\delta$  (alla temperatura di 1400 - 1550 °C circa). Verrà descritta tuttavia soltanto la prima in quanto la fase  $\delta$  è presente ad altissima temperatura e per piccole % di C, pertanto non sarà oggetto della tesi.

La ferrite  $\alpha$  (fig. 1.6) nasce attraverso il processo di nucleazione e accrescimento dai bordi grano dell'austenite. A causa di questo fenomeno si ottiene un sostanziale affinamento del grano cristallino, infatti da un solo bordo grano austenitico possono nucleare e crescere diversi grani di ferrite. Più il raffreddamento è spinto più sarà favorita la fase di nucleazione, affinando maggiormente il grano, e garantendo così maggiori proprietà meccaniche;



**Figura 1.6:** *Grani di ferrite*

- **Perlite:** in fase di raffreddamento è la struttura che si forma dalla frazione di austenite che non si è ancora trasformata in ferrite. La perlite si trova sottoforma di lamelle alternate di ferrite  $\alpha$  e di cementite  $Fe_3C$  (fig. 1.7). Ancora una volta più il raffreddamento sarà veloce e più le lamelle saranno fini, incrementando così la resistenza del materiale;

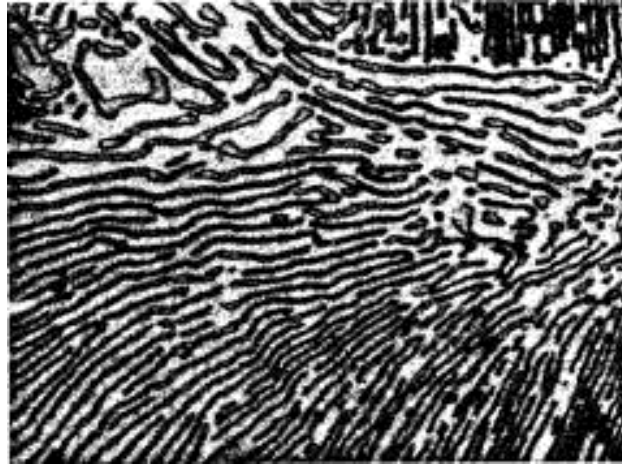


Figura 1.7: *Lamelle di perlite*

- **Bainite:** è una particolare struttura dell'acciaio che si forma quando l'austenite è rapidamente raffreddata: è costituita da un aggregato di ferrite (sottoforma di aghi) e carburo di ferro (fig. 1.8). Essa risulta essere più dura e sottile della perlite, in quanto alle temperature in cui si forma la bainite i moti diffusivi del carbonio sono molto lenti e le strutture che si formano sono molto fini.

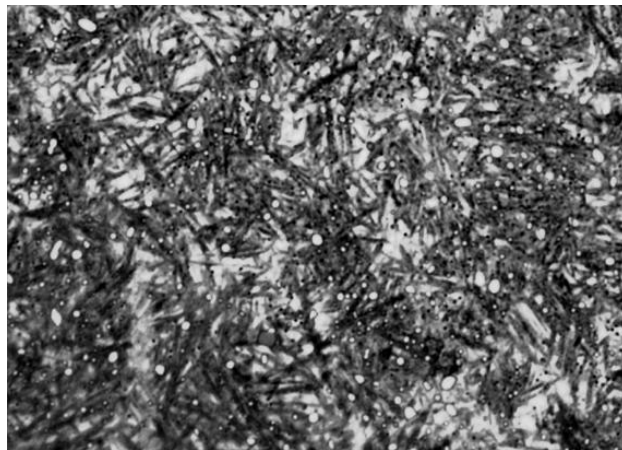


Figura 1.8: *Struttura bainitica*

- **Martensite:** è una particolare struttura ottenuta con raffreddamenti estremamente rapidi ed è caratterizzata da notevole durezza e resistenza meccanica: questo perché la sua formazione avviene per distorsione del reticolo cristallino dell'austenite ad opera degli atomi di carbonio e

non per nucleazione e accrescimento (1.9). È la struttura che si vuole ottenere con il trattamento di tempra.

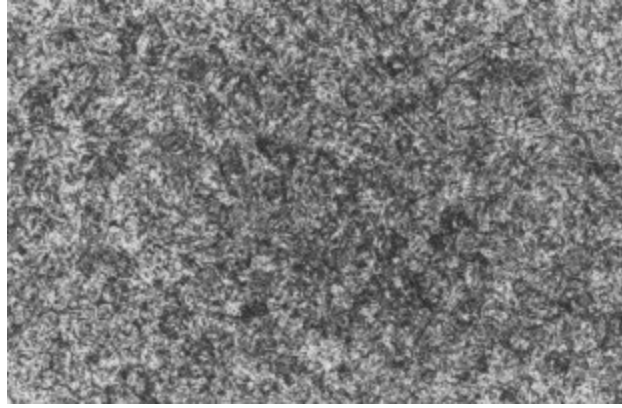


Figura 1.9: *Struttura martensitica*

### 1.3.2 La temprabilità degli acciai

La temprabilità degli acciai è l'attitudine a formare più o meno completamente la struttura martensitica in tutto il componente, anche negli strati più interni. La temprabilità è fortemente correlata alla velocità critica superiore  $V_s$  definita nella sez. 1.3, infatti tale velocità è la minima che occorre raggiungere per poter ottenere completamente struttura martensitica. Il valore di  $V_s$  è caratteristico per ogni acciaio, infatti generalmente tale velocità è minore quanto più l'acciaio contiene elementi di lega. Una diminuzione della velocità critica comporta numerosi vantaggi se si vuole temprare il pezzo, tra cui la possibilità adottare leggi di raffreddamento più blande e di avere martensite più a cuore nel pezzo a pari velocità di raffreddamento.

Per determinare la temprabilità degli acciai viene effettuata la prova *Jominy* (fig. 1.10): Un getto d'acqua viene diretto contro il provino caldo il quale si raffredderà più lentamente a mano a mano ci si sposta dal punto di contatto con l'acqua. Viene poi misurata la durezza in funzione della distanza dal fondo del provino (diagramma di fig. 1.11). La zona del provino più vicina al getto d'acqua si raffredda con velocità prossima a  $V_s$ , quindi la struttura che si forma sarà martensite. a mano a mano ci si allontana dalla base del provino, le sezioni non a contatto con il getto d'acqua vengono raffreddate a velocità decrescente, e la struttura potrebbe essere costituita da bainite e da quantità crescenti di ferrite; la durezza diminuisce progressivamente.

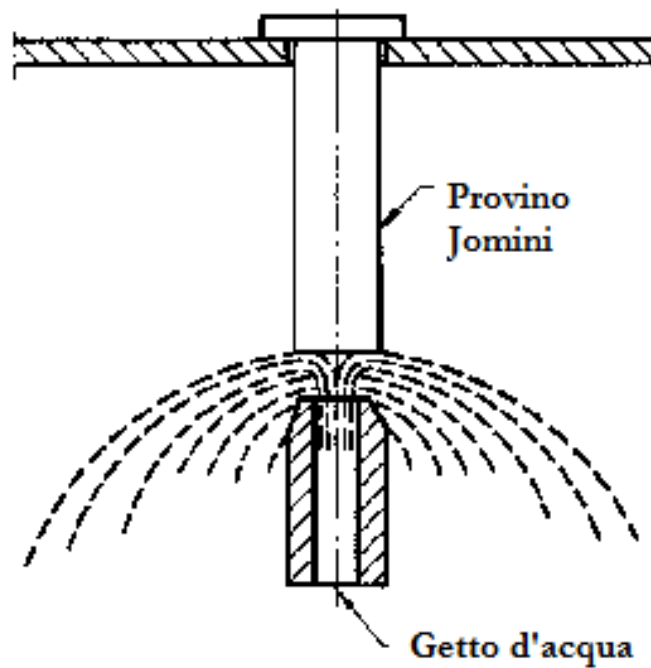


Figura 1.10: *Provino e schema della prova Jominy*

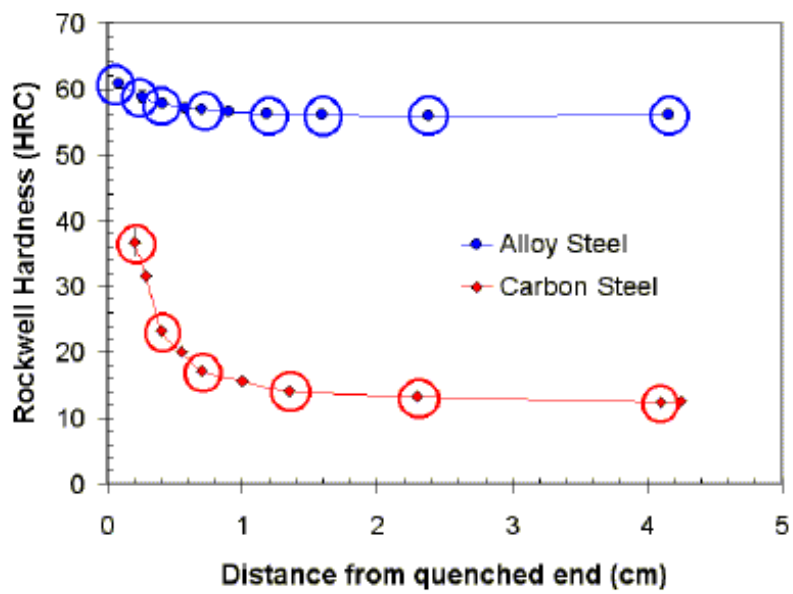


Figura 1.11: *Curva di temprabilità, confronto tra acciaio al carbonio e acciaio legato*

Più la durezza si mantiene elevata al crescere della distanza del punto a contatto con il getto d'acqua, più l'acciaio è temprabile e può assumere struttura martensitica più a cuore nel pezzo.

## 1.4 Trattamenti termici effettuati sui bomboloni

Il ciclo di produzione dei bomboloni, realizzati nello stabilimento di Dalmine da Tenaris prevede, dopo una fase iniziale in cui il tubo viene ogivato, il trattamento termico di bonifica. Questo tipo di trattamento si divide principalmente in due fasi:

1. Tempra
2. Rinvenimento

In fig. 1.12 si distinguono chiaramente le due fasi di trattamento: Nel punto **A** il bombolone viene caricato alla temperatura ambiente nel forno di tempra (o forno di alta temperatura) e viene portato, punto **B**, alla temperatura di circa 880°C, facendo così avvenire la trasformazione austenitica: questa fase di riscaldamento viene chiamata anche fase di austenitizzazione. Dopo un mantenimento più o meno duraturo in base alle caratteristiche del materiale e allo spessore del bombolone, il trattamento di tempra prevede un brusco raffreddamento in una vasca contenente una soluzione di acqua con l'aggiunta di polimeri (acqua-quench), punto **C**.

Il mezzo temprante deve essere quello che garantisce la velocità più bassa possibile per avere formazione di martensite. Non è adatto né un raffreddamento troppo veloce (ad esempio in acqua pura), per il pericolo di insorgenza delle cricche da tempra per le elevate tensioni sul bombolone, né troppo blando, in quanto non si otterrebbe a temperatura ambiente martensite in tutte le parti del pezzo.

In altre parole il mezzo di tempra (fig. 1.13) è condizionato dall'attitudine alla tempra del materiale; questa attitudine è caratterizzata principalmente dalla temprabilità (vedi sez.1.3.2).

Dopo aver raffreddato il bombolone fino ad una temperatura di circa 40°C è necessaria la fase di rinvenimento in quanto la struttura martensitica dell'acciaio temprato è troppo fragile. Serve quindi effettuare un nuovo

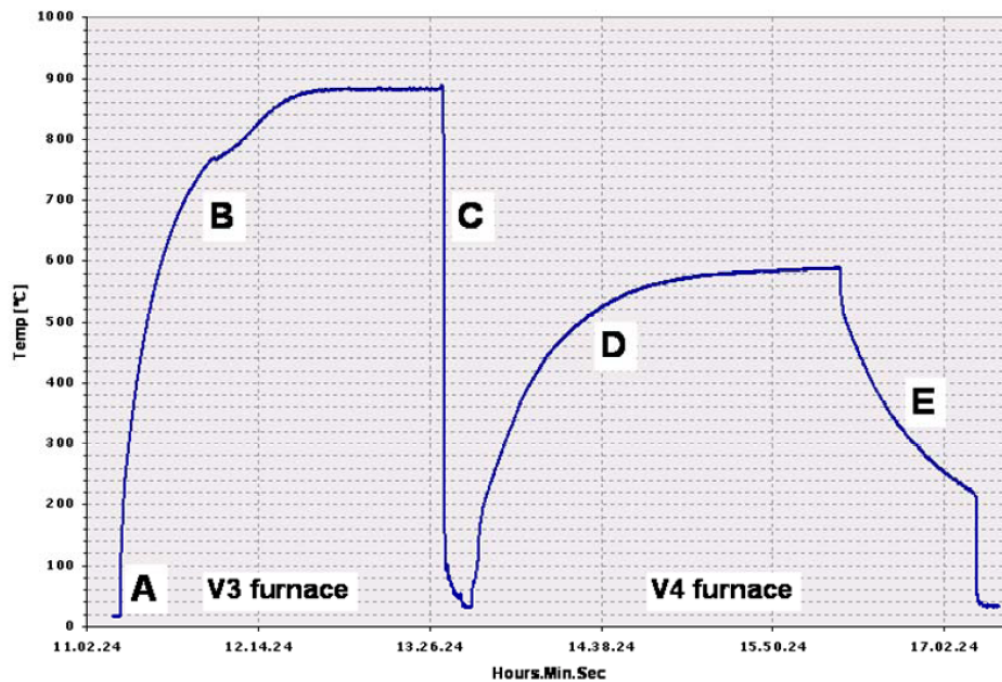
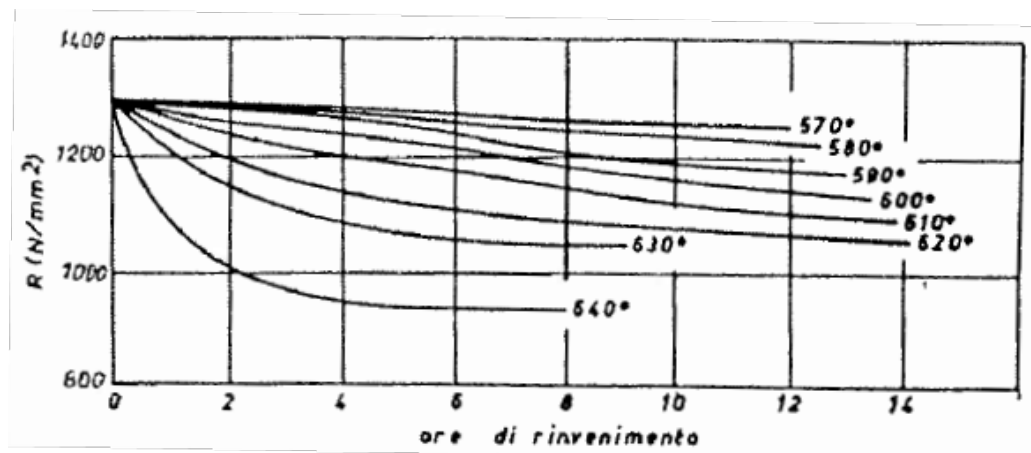


Figura 1.12: Andamento della temperatura durante un intero trattamento di bonifica effettuato sui bomboloni

Mezzo di tempra	Velocità di raffreddamento (acqua = 1)
Acqua a 20°	1,00
Acqua a 40°	0,77
Acqua a 60°	0,46
Acqua a 80°	0,20
Acqua a 90°	0,06
Soluzione di NaCl 6% a 20°	1,16
Soluzione di NaOH 5% a 20°	1,19
Alcool etilico a 20°	0,12
Oli vegetali a 20°	0,20 ÷ 0,42
Oli minerali a 20°	0,15 ÷ 0,35
Oli animali a 20°	0,20 ÷ 0,45

Figura 1.13: Valutazione approssimata della velocità di raffreddamento per i vari mezzi tempranti



**Figura 1.14:** *Influenza della durata del rinvenimento sul carico di rottura di un acciaio da bonifica*

trattamento per favorire la diffusione degli atomi di carbonio, i quali abbandonano il reticolo della martensite per precipitare sotto forma di carburi: in tal modo si porta l'acciaio ad avere il giusto compromesso tra elevate caratteristiche meccaniche e duttilità. Il bombolone viene quindi di nuovo riscaldato (punto **D**) ad una temperatura che varia tra i 570°C e 630°C, da stabilire in base alle caratteristiche meccaniche desiderate. Tale temperatura viene poi mantenuta per un tempo che varia in funzione dello spessore, secondo le regole dettate da normative o specifiche applicabili: tempo, ma ancora di più la temperatura sono parametri delicati per il rinvenimento, e generalmente più la temperatura e il tempo di mantenimento sono elevati, più la resistenza meccanica si abbassa rispetto a quelle ottenute dopo la fase di tempra (figure 1.14 e 1.15), al contrario della duttilità che viene incrementata. Infine, nel punto **E** della fig. 1.12, il bombolone viene estratto dal forno e lasciato raffreddare in aria calma fino ad una temperatura inferiore ai 250°C alla quale non avvengono più trasformazioni di fase o variazioni delle caratteristiche meccaniche. Subito dopo si raffredda il bombolone velocemente, in acqua pura, fino alla temperatura ambiente: l'operazione finale di raffreddamento in acqua non sarebbe necessaria, ma permette di incrementare leggermente la produttività senza aspettare che il bombolone raffreddi completamente in aria calma, e permette inoltre agli operatori di poter smontare la struttura di trattamento in sicurezza, senza il problema di movimentare un bombolone avente temperature troppo elevate.

L'intero trattamento di bonifica effettuato sui recipienti in pressione ha una durata media di circa 7h.

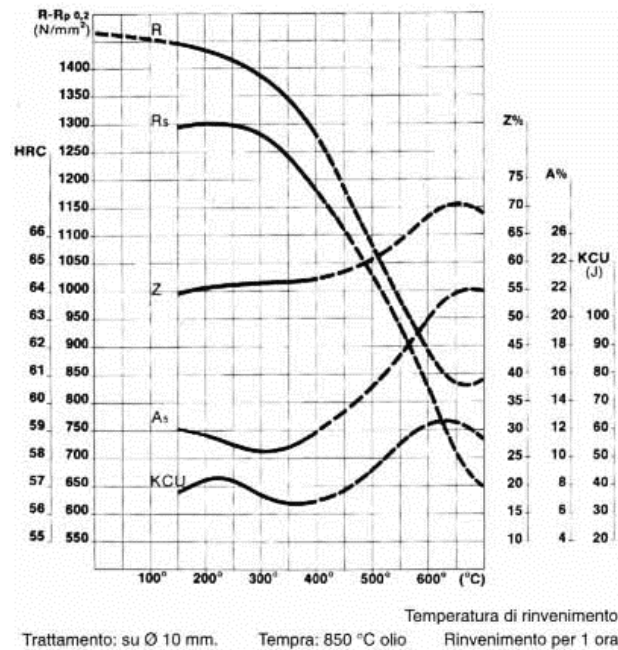


Figura 1.15: Influenza della temperatura di rinvenimento sulle proprietà meccaniche di un acciaio da bonifica

### 1.4.1 Impianto di trattamento termico

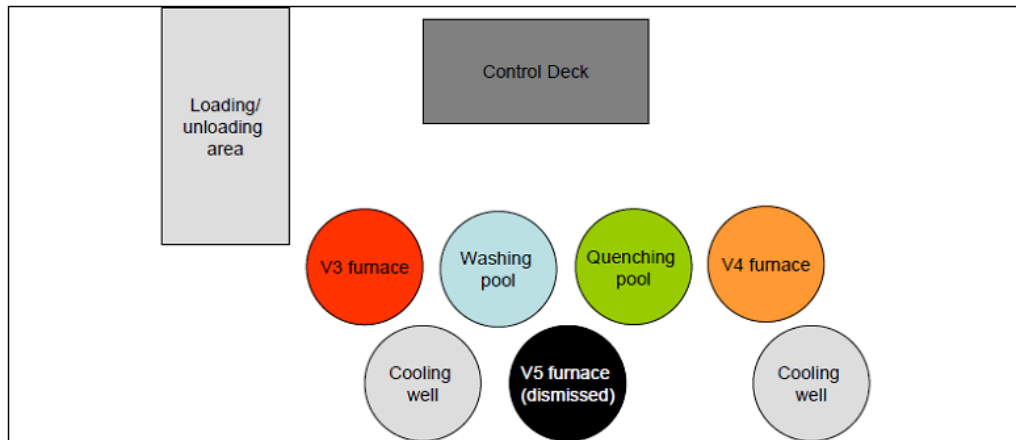
Il ciclo di produzione dei bomboloni prevede che la fase di trattamento termico possa essere eseguita, in base alla geometria del bombolone, o in forni a pozzo verticali, oppure nei forni a passaggio. I primi sono dei forni a resistenza elettrica simili a dei pozzi, mentre i forni a passaggio possiedono dei bruciatori a metano e fanno avanzare i bomboloni attraverso il movimento di ruote aventi il proprio asse inclinato rispetto a quello del bombolone, permettendo un movimento roto-traslatorio al pezzo. Le modalità di utilizzo delle due tipologie di impianto sono riportate in tab. 1.1:

		LUNGHEZZA BOMB. [mm]		
		< 7500	$7500 \leq L \leq 9900$	> 9900
SPESS. [mm]	< 24	Pozzo	Pozzo	da valutare
	$\geq 24$	Pozzo	Passaggio	Passaggio

Tabella 1.1: Regole utilizzo impianto di trattamento termico

L'impianto di trattamento termico su cui si focalizzerà la presente tesi e la





**Figura 1.16:** *Mapa dell'impianto di trattamento*



**Figura 1.17:** *Panoramica dell'impianto di trattamento*

cui mappa è rappresentata in fig.1.16 è quello costituito dai forni a pozzo verticali, a resistenza elettrica: nell'impianto sono presenti due forni, una vasca per il raffreddamento di tempra (in acqua quench) e relativo sistema di raffreddamento e di agitazione, una vasca per il lavaggio del bombolone e due pozzi per il raffreddamento in aria calma. Nel dettaglio i componenti dell'impianto sono:

- Forni di riscaldamento verticali V3 e V4 a resistenza elettrica (*V3 e V4 fur-*

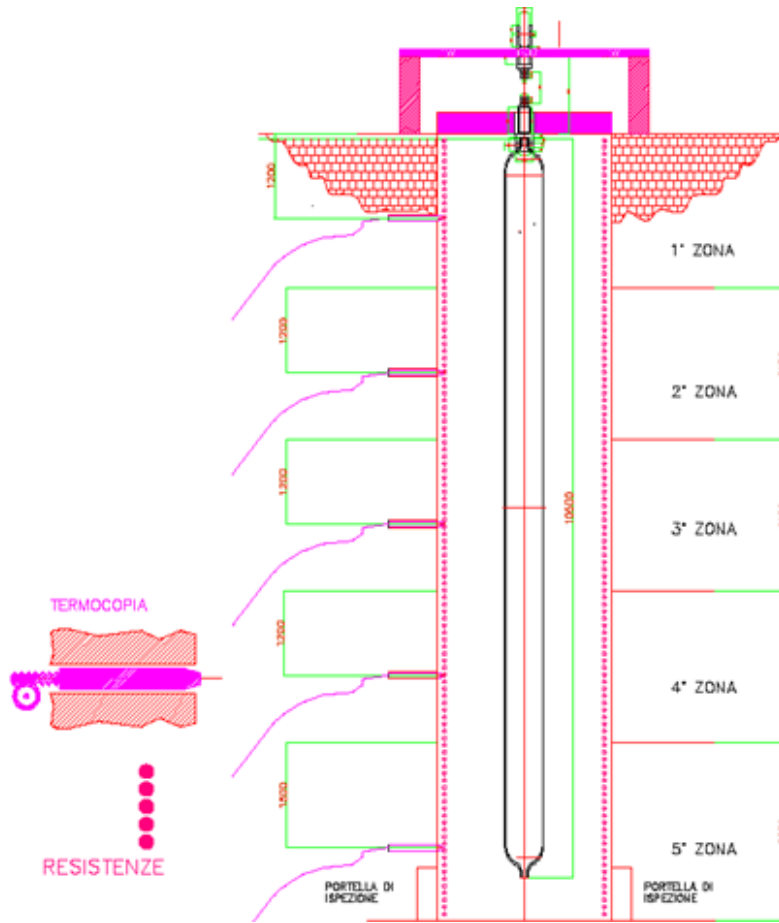


Figura 1.18: Architettura dei forni a pozzo

naces, fig. 1.18), per portare i recipienti alla temperatura desiderata; i forni sono identici, pertanto possono essere entrambi usati sia per tempra che per rinvenimento a seconda della temperatura impostata. La profondità dei forni è di  $11m$  e il diametro è di  $2,5m$ . Le pareti del forno sono costituite da materiale refrattario, e per ognuna delle cinque zone di cui è composto una termocoppia misura la temperatura dell'aria all'interno del forno.

- Vasca di tempra (*quenching pool* fig. 1.19), per raffreddare velocemente i recipienti in uscita dal forno di riscaldamento. La movimentazione di tali recipienti è effettuata mediante un carroponte, che assicura la totale immersione del recipiente.



**Figura 1.19:** Vista della vasca di tempra durante un trattamento

- Vasca di lavaggio o risciacquo del bombolone (*washing pool* fig. 1.20), per lavare la superficie del bombolone contaminata dagli additivi che rimangono dopo il raffreddamento in acqua quench e per facilitare lo smontaggio in caso il pezzo sia ancora caldo.



**Figura 1.20:** Vasca di lavaggio

- Pozzo di raffreddamento (*cooling well*), per raffreddare in aria calma i recipienti all'uscita dal forno di rinvenimento.



**Figura 1.21:** Bombolone inserito nel pozzo per il raffreddamento in aria calma

- Cabina di controllo (*control deck* fig. 1.22), dove è possibile controllare in ogni momento la temperatura del forno, e movimentare il carroponete per le operazioni di carico scarico dei forni.



**Figura 1.22:** Cabina di controllo

È presente infine anche una zona apposita per preparare il bombolone al trattamento termico (*loading/unloading area*).

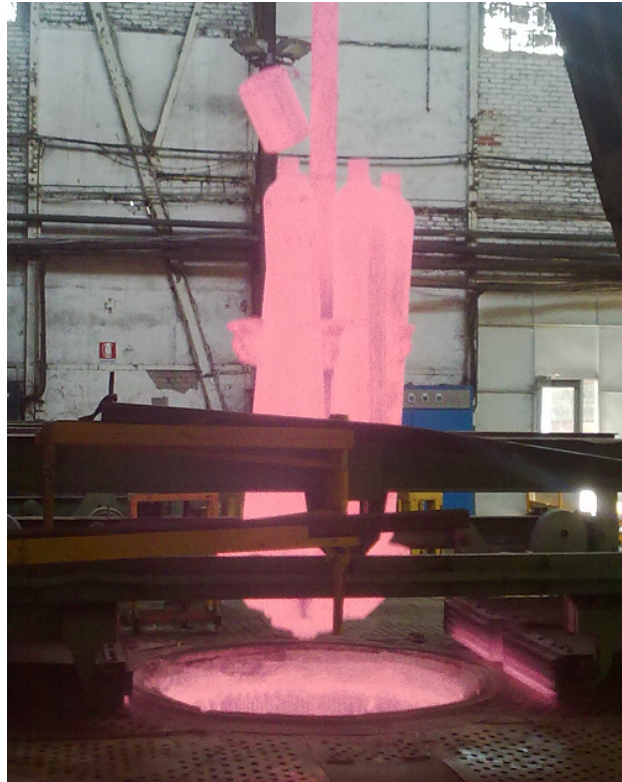
# Capitolo 2

## Modello Matematico

Vengono ora presentate le equazioni che permettono di risolvere il problema principale dei trattamenti termici, vale a dire l'individuazione della distribuzione di temperatura nel tempo e nello spazio sul corpo in esame, che per il presente caso di studio è quello di un bombolone. Le equazioni sono quelle della trasmissione del calore, vale a dire, quelle della conduzione, convezione e irraggiamento: per ognuna di queste tipologie di trasmissione del calore vengono presentati gli aspetti fondamentali e i principali parametri che sono significativi al fine di studiare un trattamento.

### 2.1 Trasmissione del calore

La trasmissione del calore è quella forma di scambio termico che avviene tra corpi sottoposti a una differenza di temperatura a rigore infinitesima oppure, qualora tale differenza sia finita, anche la dinamica dello scambio termico e l'energia in gioco vengono influenzate. Nei trattamenti termici effettuati sui recipienti in pressione da analizzare, lo scambio di calore avviene grazie ad un forno a resistenze elettriche, che per *effetto Joule* scaldano le pareti del forno e quindi anche il bombolone.



**Figura 2.1:** *Bomboloni incandescenti all'uscita dal forno di alta temperatura*

La trasmissione di calore può avvenire secondo tre modalità:

- **Conduzione:** trasferimento di energia termica all'interno di corpi solidi, liquidi, gassosi, senza movimento apparente di materia, ed è dovuta alla cessione di energia cinetica da parte di molecole ad elevata temperatura (con maggiore energia) e quelle a temperatura minore (con minore energia). Nella maggior parte dei casi è lo scambio di calore che avviene nei solidi ed è quindi quello a cui si farà riferimento. Microscopicamente avviene attraverso il movimento degli elettroni liberi, i quali carichi di energia, fanno vibrare il reticolo cristallino del materiale trasferendo energia a quelli adiacenti. Più il reticolo cristallino è ordinato più la trasmissione avviene in maniera repentina.
- **Convezione:** scambio di calore tra due sistemi quando almeno uno dei due è un fluido (liquido, gas, sistema bifase liquido e vapore) ed è localizzata sia nel volume fluido sia in un intorno dell'interfaccia di separazione tra le fasi nelle immediate vicinanze. Più il fluido è in

agitazione più veloce sarà lo scambio termico.

Detta  $T_1$  la temperatura di una superficie, e  $T_2$  la temperatura del fluido che la investe, il flusso termico per scambio convettivo è definito come:

$$q = \alpha_c A (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

Il coefficiente  $\alpha_c [W]$  è definito *coefficiente di convezione termica*, e dipende dalle proprietà e dalle condizioni del fluido.

- Irraggiamento: trasferimento di calore dovuto all'emissione di energia da un corpo sottoforma di onde elettromagnetiche. Si ha trasmissione per irraggiamento nel vuoto o attraverso sostanze almeno parzialmente trasparenti. Ogni corpo emette onde elettromagnetiche se la sua temperatura è maggiore della temperatura assoluta di 0 K: il flusso di energia emesso da un corpo avente temperatura pari a  $T$  è definito da:

$$q = \sigma_n A T^4 \quad (2.2)$$

Questa equazione è valida rigorosamente per un corpo nero, un emettitore ideale. Il flusso netto di calore ricevuto da un corpo per irraggiamento sarà quindi pari alla somma algebrica dei flussi di calore dovuti ai corpi con cui esso interagisce:

$$q = \sum_i \sigma_{n,i} A_i T_{i,\pm}^4 \quad (2.3)$$

## 2.2 Equazione generale della conduzione termica

Il problema principale della teoria matematica alla base della trasmissione del calore è la determinazione della distribuzione della temperatura nello spazio e nel tempo. Con riferimento ad un sistema cartesiano, nella porzione di corpo interessata dal fenomeno di scambio termico, la temperatura è quindi funzione della posizione e dell'istante considerato:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2.4)$$

Con riferimento a [7] la determinazione di tale funzione si ottiene ricorrendo al principio della conservazione dell'energia, riferito ad un sistema chiuso di volume finito:

$$\partial Q_e + \partial Q_g = dU \quad (2.5)$$

Il termine  $\partial Q_e$  si riferisce alla quantità di calore netta scambiata,  $\partial Q_g$  a quella generata internamente al sistema e  $dU$  alla variazione di energia interna.

Il sistema, di volume  $V$ , dove avviene il fenomeno di conduzione termica, sia racchiuso da una superficie  $A$ ; sia  $\mathbf{n}$  il vettore unitario normale al generico elemento infinitesimo di superficie  $dA$ , per convenzione positivo se uscente da tale superficie. La quantità di calore  $dQ_e$  entrante nel volume  $V$  si esprime

$$\partial Q_e = -dt \int_A \mathbf{q}^* \cdot \mathbf{n} \cdot dA \quad (2.6)$$

dove  $\mathbf{q}^*$  è il vettore *flusso termico areico* e rappresenta il flusso termico che attraversa una superficie isoterma scritto in termini vettoriali e secondo la legge di Fourier si può modellare come

$$\mathbf{q}^* = -\lambda \nabla T \quad (2.7)$$

Dalla definizione di gradiente si ha:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k} \quad (2.8)$$

dove  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  sono i versori nelle direzioni dei tre assi cartesiani  $x, y$  e  $z$ . Dal teorema della divergenza è possibile scrivere l'eq. 2.6 come:

$$dQ_e = -dt \int_A \mathbf{q}^* \cdot \mathbf{n} dA = -dt \int_V \nabla \cdot \mathbf{q}^* dV \quad (2.9)$$

Gli altri due termini  $\partial Q_g$  e  $dU$  dell'eq. 2.5 si esprimono invece come segue. Il primo è dovuto alla generazione di energia all'interno del sistema, come potrebbe essere per effetto Joule, reazioni nucleari o chimiche ecc.

Per ogni punto del volume considerato  $V$  si definisce la grandezza  $H$ , detta comunemente intensità di generazione interna, ed esprima la densità volumica di potenza generata.  $\partial Q_g$  si può quindi esprimere come:

$$\partial Q_g = dt \int_V H dV \quad (2.10)$$

Il secondo termine, vale a dire  $dU$  è il termine legato alla variazione di energia interna del sistema:

$$dU = dt \int_V c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.11)$$

in cui  $c_v$  rappresenta il calore specifico a volume costante del materiale,  $\rho$  è invece la sua densità.



Non rimane che sostituire le espressioni di  $\partial Q_e$ ,  $\partial Q_g$  e  $dU$  nell'eq. 2.5. Essa diventa:

$$-dt \int_V \nabla \cdot \mathbf{q}^* dV + dt \int_V H dV = dt \int_V c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.12)$$

Sfruttando la linearità dell'integrale e l'arbitrarietà del volume  $V$ , si può quindi semplificare l'espressione e ottenere:

$$-\text{div } \mathbf{q}^* + H = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.13)$$

È possibile modificare la scrittura del primo termine dell'eq. 2.13 riprendendo l'eq. 2.7. Facendo questa operazione ipotizziamo il coefficiente  $\lambda$  costante:

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}^* = \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = -\lambda \nabla \cdot \nabla T \quad (2.14)$$

che si può scrivere ancora come:

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}^* = -\lambda \nabla^2 T = -\lambda \nabla^2 T \quad (2.15)$$

Sostituendo questa definizione nella 2.13 risulta in via definitiva

$$\lambda \nabla^2 T + H = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.16)$$

che di norma viene indicata con

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_v \rho} \nabla^2 T + \frac{H}{c_v \rho} \quad (2.17)$$

È questa l'equazione generale della conduzione termica.

Il termine  $\lambda/c_v \rho$  si definisce *diffusività termica del mezzo* e si indica con il simbolo  $a$  [ $m^2/s$ ]. Esso esprime la velocità con cui i corpi nel loro interno trasmettono una variazione di temperatura.

Il termine  $\nabla^2(\cdot)$  è l'operatore di Laplace o laplaciano ed è definito in coordinate cartesiane come:

$$\nabla^2(\cdot) = \frac{\partial(\cdot)^2}{\partial x^2} + \frac{\partial(\cdot)^2}{\partial y^2} + \frac{\partial(\cdot)^2}{\partial z^2} \quad (2.18)$$

pertanto l'eq. 2.17 viene espressa con:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) + \frac{H}{c_v \rho} \quad (2.19)$$

Nello studio dei trattamenti termici effettuati sui bomboloni nei forni verticali si farà spesso riferimento all'equazione del calore scritta in coordinate cilindriche  $(r, \phi, z)$ , che permettono di sfruttare eventuali simmetrie. L'eq. 2.17 si modifica in:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial T^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) + \frac{H}{c\rho} \quad (2.20)$$

### 2.2.1 Condizioni al contorno

La soluzione dell'eq. 2.17 e delle successive consente di determinare la funzione  $T = f(x, y, z, t)$  vale a dire le temperature dei vari punti del dominio e calcolare il flusso termico attraverso le superfici. Come per tutte le equazioni differenziali alle derivate parziali, per procedere alla soluzione è necessario indicare le condizioni iniziali (vale a dire la distribuzione di temperatura nell'istante iniziale) e le condizioni al contorno.

Per la determinazione delle condizioni iniziali è sufficiente misurare la temperatura dei corpi in esame (nel nostro caso, del bombolone). Per quanto riguarda le condizioni al contorno, esse possono essere essenzialmente di tre tipi:

- Primo tipo: viene fissata la temperatura sulla superficie del dominio.
- Secondo tipo: viene fissata la derivata della temperatura normale alla superficie.
- Terzo tipo: viene fissata una combinazione lineare fra la temperatura della superficie e la derivata normale alla superficie stessa.

Queste coprono la maggior parte dei casi e sono condizioni al contorno lineari. Ve ne sono tuttavia altre più complicate dal punto di vista matematico e fisico.

Il modello che verrà utilizzato per lo studio del trattamento dei bomboloni prevede l'utilizzo della condizione di primo tipo, quella in cui viene fissata la temperatura sulla superficie del dominio: è chiamata anche condizione di Dirichlet. È stata presa questa decisione in quanto è possibile conoscere in ogni momento la temperatura all'interno del forno attraverso delle termocoppie che misurano la temperatura dell'aria nelle immediate vicinanze della parete: grazie alla presenza dello strato limite, si può ritenere

che tale temperatura approssimi molto bene quella reale del forno e quindi che questo metodo di validazione ben si sposi con la condizione di Dirichlet.

## 2.3 Termine convettivo

L'influenza del termine convettivo in questi problemi non è trascurabile, tuttavia non può essere affrontata in maniera esatta come invece è stato fatto per la conduzione. Per questo motivo si sfrutta la geometria da simulare che permette di ricondursi al caso semplificato per cui la letteratura [7] fornisce numerose correlazioni di uso pratico. Si può quindi definire in questo caso la convezione come uno scambio termico tra una superficie e un fluido in moto che la lambisce. La condizione indispensabile alla realizzazione della convezione è che il fluido sia in moto relativo rispetto alla superficie del corpo solido. Le cause del moto del fluido consentono di operare una classificazione fondamentale nella convezione: si parla infatti di *convezione forzata* quando il moto è prodotto dall'azione di dispositivi meccanici (ad esempio la ventilazione) o comunque indipendenti dalla temperatura, mentre si definisce *convezione naturale* quando il moto trae origine dalla dipendenza della densità del fluido dalla temperatura. La quantità di energia termica scambiata per effetto convettivo vale:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{\infty} - T) \quad (2.21)$$

I termini  $T_{\infty}$  e  $T$  indicano rispettivamente le temperature del fluido lontano dalla superficie sulla quale avviene lo scambio convettivo e quella della superficie stessa. Maggiore è la differenza di temperatura tra aria e componente, più è elevata l'energia termica scambiata per effetto della convezione.

Il termine  $h$  è invece definito come il *coefficiente di scambio convettivo* e dipende da numerosi fattori, quali le proprietà fisiche del fluido, dalle condizioni dinamiche del flusso e dalla geometria della superficie scambiante. Per la determinazione di  $h$ , si ricorre generalmente a correlazioni ricavate mediante campagne sperimentali, attraverso le quali è possibile individuare le grandezze che determinano il coefficiente convettivo. Esse sono:

- le caratteristiche geometriche della superficie lambita dal fluido;
- le proprietà fisiche del fluido che influenzano in modo diretto il campo di moto, quali la densità ( $\rho$ ), la viscosità dinamica ( $\mu$ ), il calore specifico a pressione costante ( $c_p$ ) e la conduttività termica del fluido ( $k$ );

- le cause del processo, come la differenza di temperatura ( $\Delta T$ ) o il coefficiente di espansione termica isobara ( $\beta$ ).

$$h = f(l, \beta, \Delta T, \rho, \mu, k, c_p) \quad (2.22)$$

Adottando le grandezze fondamentali del *SI* quali lunghezza, massa, tempo e temperatura, la 2.22 può essere riscritta grazie al teorema di Buckingham sottoforma di numeri adimensionali:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.23)$$

In cui  $Nu$  è il numero di Nusselt, ed esprime il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e quello scambiato per conduzione. Può essere espresso dalla seguente relazione:

$$Nu = \frac{hl}{k} \quad (2.24)$$

$Pr$  è il numero di Prandtl, esso esprime l'importanza della diffusività cinematica rispetto alla diffusività termica:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.25)$$

$Gr$  è il numero di Grashof: viene utilizzato per misurare gli effetti delle forze di galleggiamento rispetto alle forze viscosse di un fluido. Può essere espresso nella forma:

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \rho^2 \Delta T}{\mu^2} = \frac{\beta g l^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (2.26)$$

Da evidenziare che il termine  $\Delta T = T_\infty - T_f$ , in cui  $T_f$  è detta temperatura di film: essa è la media tra la temperatura della superficie e  $T_\infty$ .

Per la convezione naturale il legame  $f$  della 2.23 si può esprimere come:

$$Nu = C Gr^m Pr^n \quad (2.27)$$

Dove  $m = n$  nel caso in cui vengono trascurate le forze d'inerzia.

Il prodotto  $GrPr$  è detto numero di *numero di Rayleigh*, ed è definito come:

$$GrPr = Ra = \frac{l^3 \beta g \Delta T}{\nu \alpha} \quad (2.28)$$

quindi il numero di Nusselt diventa:

$$Nu = C Ra^m \quad (2.29)$$

Dopo aver calcolato il numero di  $Ra$  ed aver ottenuto per il trattamento termico in esame di essere in regime turbolento sono state trovate le costanti  $C$  ed  $m$  per tale modalità di scambio, trovando quindi la relazione di *Mc Adams*:

$$Nu = 0,138Gr^{0,36}(Pr^{0,175} - 0,55) \quad (2.30)$$

Si può quindi ricavare  $h$  dalla 2.24

$$h = \frac{Nuk}{L} \quad (2.31)$$

## 2.4 Irraggiamento

La terza modalità di trasmissione del calore, che possiamo trovare anche all'interno dei forni è quella dell'irraggiamento. Il trasferimento di calore avviene per mezzo di onde elettromagnetiche ed è presente in tutti i corpi che possiedono temperatura superiore alla temperatura assoluta di 0 K. Il calore si trasferisce quindi anche nel vuoto e se un corpo ha temperatura superiore a circa 800 K emette radiazioni nel visibile (come ad esempio una lampadina ad incandescenza).

L'emissione è fortemente influenzata dalle caratteristiche superficiali del corpo. La quantità di calore associata al fenomeno dell'irraggiamento è proporzionale a  $T^4$  quindi diventa importante alle alte temperature, inoltre più la temperatura alla quale emette il corpo è maggiore minore sarà la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica  $\lambda$ .

L'energia associata ad una radiazione elettromagnetica (trasmessa in pacchetti chiamati quanti) infatti è anche proporzionale alla lunghezza d'onda attraverso la costante di Planck:

$$E = h\frac{c}{\lambda} \quad (2.32)$$

dove  $h$  è la costante di Planck e vale  $6,626006957 \cdot 10^{-34}$  [Js],  $c$  è la velocità della luce nel mezzo e vale circa  $300.000$  km/s.

Per procedere all'individuazione della quantità di energia assorbita da un corpo è necessario definire alcune variabili e coefficienti utili nello studio del problema.

La radiazione incidente su una superficie viene in parte assorbita dalla superficie stessa, in parte riflessa e infine anche trasmessa (fig. 2.2).

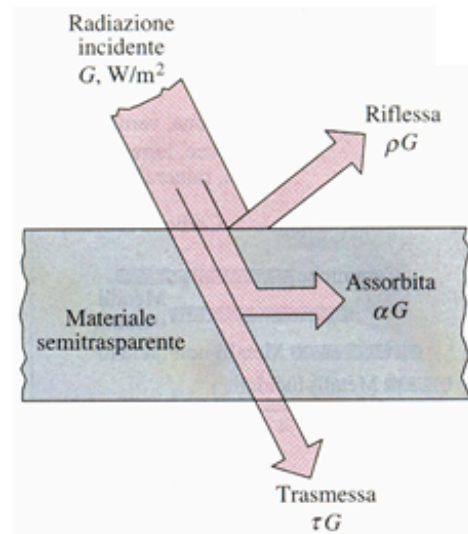


Figura 2.2: Radiazione assorbita, riflessa, trasmessa

Indicando con  $G$  l'irradiazione totale, vale a dire il flusso specifico totale di energia radiante che incide su una superficie, si può scomporre in  $G_{ass}$ ,  $G_{rifl}$  e  $G_{trasm}$ :

$$G = G_{ass} + G_{rifl} + G_{trasm} \quad (2.33)$$

Si definiscono quindi i coefficienti rappresentanti le frazioni di energia totale che possono incidere nei tre modi descritti:

- Coefficiente di assorbimento  $\alpha$

$$\alpha = \frac{G_{ass}}{G} \quad (2.34)$$

- Coefficiente di riflessione  $\rho$

$$\rho = \frac{G_{rifl}}{G} \quad (2.35)$$

- Coefficiente di trasmissione  $\tau$

$$\tau = \frac{G_{trasm}}{G} \quad (2.36)$$

Pertanto in base all'eq. 2.33 si può scrivere:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.37)$$

Per poter esprimere la quantità di energia radiante su qualsiasi corpo, è necessario definire la potenza termica radiante emessa da un corpo nero. Un corpo nero possiede le seguenti proprietà per definizione:

- tutta la radiazione incidente a qualsiasi lunghezza d'onda viene assorbita dalla superficie (quindi  $\alpha = 1$ );
- a pari lunghezza d'onda e temperatura emette più energia di qualsiasi altro corpo;
- emette uniformemente in ogni direzione.

L'energia radiante emessa da un corpo nero (detta anche potere emissivo) si può esprimere grazie alla legge di Stefan-Boltzman:

$$E_n = \sigma T^4 \quad (2.38)$$

con  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$  costante di Stefan-Boltzmann.

A questo punto è possibile conoscere l'emissione di un corpo reale attraverso il coefficiente  $\epsilon$  definito come *emissività*:

$$\epsilon = \frac{E}{E_n} \quad (2.39)$$

in cui  $E$  è l'emissione globale del corpo reale e  $E_n$  è il potere emissivo del corpo nero alla stessa temperatura. Entrambe sono espresse in  $[W/m^2]$  quindi l'emissività  $\epsilon$  è un numero adimensionale compreso tra 0 e 1 visto che per definizione un corpo non può emettere più di un corpo nero.

Da questo punto in poi si adotterà l'approssimazione secondo cui le superfici dei corpi emettono in maniera perfettamente diffusa, cioè non dipendente dalla direzione, e i coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione sono indipendenti dalla lunghezza d'onda. Tali corpi si definiscono corpi grigi, e per la legge di Kirchhoff, l'emissività globale è pari al coefficiente di assorbimento:

$$\epsilon = \alpha \quad (2.40)$$

Per determinare l'entità della potenza termica scambiata per irraggiamento tra due corpi,  $i$  e  $j$ , è necessario conoscere il fattore di vista o fattore di

forma tra le due superfici. Il fattore di vista è una grandezza che dipende esclusivamente dalla geometria delle superfici, e indica la frazione di energia emessa da  $i$  che incide direttamente su  $j$ .

Per conoscere  $F_{i,j}$  bisogna risolvere l'integrale:

$$F_{i,j} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r^2} dA_i dA_j \quad (2.41)$$

Inoltre, chiamate  $A_i$  e  $A_j$  le due superfici interessate dallo scambio per irraggiamento valgono le seguenti proprietà:

$$F_{i,j} A_i = F_{j,i} A_j \quad (2.42)$$

e

$$\sum_j^N F_{i,j} = 1 \quad (2.43)$$

Una superficie grigia e opaca non trasmette energia, pertanto vale  $\tau = 0$ . L'eq. 2.37 diventa quindi:

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \epsilon \quad (2.44)$$

Si può introdurre ora il termine *radiosità*  $B$ , definito come il flusso totale di energia che parte da una superficie (che per un corpo grigio vale):

$$B = G_{r,fl} + E = \rho G + \epsilon E_n = (1 - \epsilon)G + \epsilon E_n \quad (2.45)$$

La potenza  $\dot{Q}$  scambiata da tale superficie (di area  $A$ ) con l'ambiente che la circonda vale:

$$\dot{Q} = A(G - B) \quad (2.46)$$

Il termine  $G$  si può ricavare dall'eq. 2.45 e riscrivere l'eq. 2.49 come:

$$\dot{Q} = A\epsilon \frac{B - E_n}{1 - \epsilon} \quad (2.47)$$

e risulta  $\dot{Q} > 0$  quando la superficie globalmente riceve potenza.

Si consideri ora lo scambio di energia radiante globale tra due superfici 1 e 2 grigie e opache. Indicando con  $\dot{Q}_{12}$  risulta:

$$\dot{Q}_{12} = B_1 A_1 F_{1,2} - B_2 A_2 F_{2,1} = \frac{B_1 - B_2}{\frac{1}{A_1 F_{1,2}}} = \frac{B_1 - B_2}{\frac{1}{A_2 F_{2,1}}} \quad (2.48)$$



Per due superfici che scambiano energia radiante esclusivamente tra loro (e con niente altro) risulta che il flusso globale di energia ceduto dalla superficie 1 ( $-\dot{Q}$ ), supponendo  $T_1 > T_2$ , è pari al flusso scambiato tra le due superfici  $\dot{Q}_{12}$  e ancora pari al flusso dalla superficie 2  $\dot{Q}_2$ : poiché dall'eq. 2.47

$$\dot{Q}_1 = \frac{B_1 - E_{n,1}}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1}} \quad \dot{Q}_2 = \frac{B_2 - E_{n,2}}{\frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}} \quad (2.49)$$

si può scrivere

$$\dot{Q}_{12} = \frac{(E_{n,1} - B_1)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} = \frac{(B_1 - B_2)}{\frac{1}{A_1 F_{1,2}}} = \frac{(B_2 - E_{n,1})}{\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (2.50)$$

Ricordando infine la legge di Stefan-Boltzman (eq. 2.38) per esprimere le emissioni dei corpi neri, si arriva alla forma classica dell'espressione per il calcolo della potenza scambiata per irraggiamento tra le due superfici:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1,2}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (2.51)$$



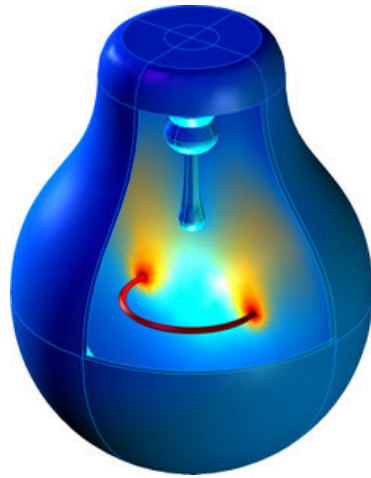
# Capitolo 3

## Validazione

Dovendo simulare agli elementi finiti il comportamento di un centinaio di bomboloni diversi, prima di procedere alla definizione dei parametri di trattamento, è necessario validare il modello creato al simulatore FEM attraverso i risultati di una prima prova sperimentale.

La conoscenza del campo di temperatura nello spazio e nel tempo, per la definizione dei parametri di trattamento, si basa come detto nel cap. 2 sulla risoluzione delle equazioni di trasmissione del calore. Equazioni che sono state risolte per il presente caso di studio attraverso il simulatore FEM Comsol Multiphysics v. 4.0. Questo software (che prima del 2005 veniva chiamato FEMLAB) permette di risolvere svariate applicazioni fisiche e ingegneristiche, attraverso il metodo degli elementi finiti. Del programma fanno parte numerosi moduli, ognuno dei quali riguarda un'applicazione specifica (acustica, analisi CFD, chimica, meccanica strutturale, trasmissione del calore, ecc...). Il modulo che permette di risolvere le equazioni di trasmissione del calore è il *Heat Transfer Module*. Un esempio di output di Comsol è visibile in fig. 3.1, nella quale viene rappresentato il campo di temperatura in una lampadina a incandescenza.

Il solutore agli elementi finiti permette di simulare lo scambio termico comprensivo di tutti e tre i meccanismi di trasmissione. I trattamenti termici in esame sono interessati sia da conduzione che da convezione e irraggiamento, sebbene la soluzione  $T = f(x, y, z, t)$  sia richiesta solo all'interno del volume del bombolone. Di conseguenza la soluzione degli ultimi due tipi di trasmissione del calore è "trasparente" dal punto di vista dell'utente, essendo solamente funzionale alla determinazione dei flussi termici sulle pareti del bombolone.



**Figura 3.1:** *Esempio di output di Comsol, distribuzione del campo di temperatura in una lampadina*

Il software richiede i seguenti input:

- La geometria dei corpi su cui calcolare la soluzione;
- I materiali e le proprietà specifiche dei corpi;
- Le condizioni iniziali, le condizioni al contorno e di interfaccia;
- Discretizzazione spaziale (mesh);
- Discretizzazione temporale.

Per quanto riguarda la mesh e gli step temporali bisognerà tenere conto che più saranno complesse più il tempo impiegato dal simulatore per avere la soluzione sarà maggiore, quindi la scelta fatta ha permesso l'ottimizzazione del rapporto qualità-durata delle simulazioni.

### 3.1 Stato dell'arte

Come descritto nell'introduzione, fino ad oggi, il software utilizzato in azienda forniva solamente la soluzione monodimensionale del profilo di temperatura all'interno del corpo del bombolone. Veniva discretizzato lo spessore in più elementi radiali, sui quali veniva risolto il bilancio termico, espresso in

coordinate polari, con il metodo delle differenze finite. Chiaramente il calcolo, essendo concentrato lungo il raggio anziché sull'intera sezione trasversale, permetteva soltanto di risolvere geometrie estremamente semplici, pertanto il trattamento che era possibile risolvere era solamente in singolo (un bombolone per volta) e trascurando le ogive. Inoltre veniva utilizzato esclusivamente per il rinvenimento, dove la temperatura dell'ambiente circostante si mantiene sempre pressoché costante.

Le ipotesi alla base della soluzione erano:

- Assialsimmetria (della geometria e dei flussi termici);
- Il forno si trova costantemente alla stessa temperatura, pari a quella impostata per il rinvenimento;

Le considerazioni generali di carattere fisico invece:

- Sulla superficie interna è presente soltanto scambio convettivo con l'aria calma del forno;
- Sulla superficie esterna è presente sia scambio convettivo con l'aria del forno che irraggiamento con le pareti e le resistenze del forno.

L'introduzione del simulatore Comsol Multiphysics ha permesso invece di risolvere il trattamento utilizzando geometrie più complesse e facendo ipotesi meno restrittive che hanno portato ad avere risultati sempre più in linea con il problema reale.

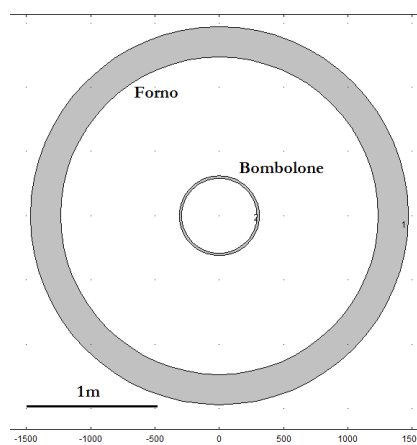
## 3.2 Impostazione delle simulazioni numeriche

### 3.2.1 Geometria

La geometria definisce il dominio sul quale risolvere la legge di trasmissione del calore, e per rendere valida la soluzione deve essere quanto più possibile simile alla geometria reale. Un bombolone possiede una forma non molto complessa in quanto è composto da un cilindro avente le estremità ogivate, pertanto grazie alla propria simmetria tale geometria si presta anche a semplificazioni. Anche l'architettura del forno ha permesso ipotesi semplificative in base alla simmetria, in quanto essendo verticale, del tutto simile

ad un pozzo è anch'esso schematizzabile come un cilindro cavo chiuso alle estremità. E' stato quindi possibile risolvere il caso di studio in esame con l'utilizzo di due geometrie differenti:

- **Modello 2D piano:** si tratta della sezione trasversale del bombolone immerso nel forno, in modo tale da poter studiare ciò che accade sul corpo dello stesso (fig. 3.2);



**Figura 3.2:** *Modello 2D piano, forno e bombolone*



**Figura 3.3:** *Modello 2D assialsimmetrico, forno e bombolone*

- **Modello 2D assialsimmetrico:** sezione longitudinale del bombolone immerso nel forno, per poter individuare le differenze di temperatura tra il corpo e l'ogiva (fig. 3.3).

### 3.2.2 Condizioni iniziali, al contorno e di interfaccia

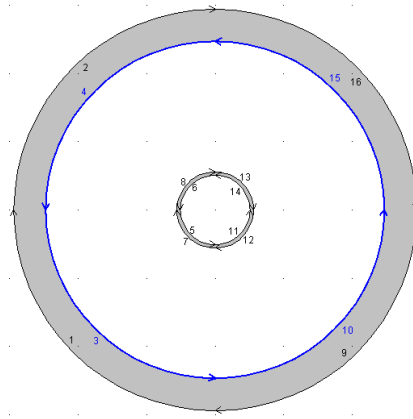
Queste condizioni sono necessarie per risolvere l'equazione di trasmissione del calore, senza le quali non si potrebbe ottenere una soluzione. Il programma Comsol mette a disposizione una serie di condizioni iniziali e condizioni al contorno da applicare sulla geometria creata. In modo particolare, come condizione iniziale richiede essenzialmente una temperatura media di ciascun corpo a inizio trattamento, mentre per quanto riguarda le condizioni al contorno e di interfaccia la questione è più articolata.

Il trattamento termico da simulare è quello di bonifica, in particolar modo le fasi di riscaldamento della tempra e del rinvenimento (vedi cap. 1): i due trattamenti quindi vengono eseguiti in maniera differente per tempi e temperature, pertanto le condizioni iniziali, al contorno e di interfaccia per le due fasi saranno leggermente diverse (sebbene concettualmente analoghe). I due differenti modelli utilizzati (modello 2D piano e modello 2D assialsimmetrico) non comportano invece l'utilizzo di condizioni differenti, se non quella di assialsimmetria del secondo modello generata automaticamente dal programma.

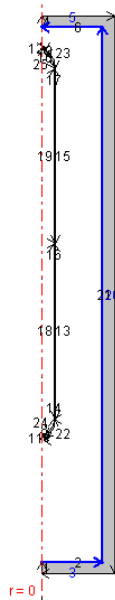
Per quanto riguarda gli scambi termici, che avvengono all'interfaccia solido-aria sulle pareti del bombolone, le condizioni impostate sono state quelle di convezione e irraggiamento:

- **Convezione:** l'aria calda presente nel forno scalda il bombolone per effetto di uno scambio di calore convettivo, proporzionale alla differenza di temperatura e al coefficiente convettivo (variabile anch'esso con la temperatura);
- **Irraggiamento:** è presente scambio termico sottoforma di onde elettromagnetiche tra tutte le superfici che sono all'interno del forno, vale a dire su tutto il bombolone e su tutte le pareti interne del forno. Le emissività saranno però diverse per l'acciaio del bombolone e per il refrattario delle pareti del forno. Il fattore di vista è calcolato automaticamente dal simulatore.

**Condizioni al contorno** Le condizioni al contorno, come detto nel cap. 2 sono quelle di Dirichlet: esse prevedono che venga indicata la temperatura su una superficie di contorno del dominio, del dominio della quale è noto in ogni istante il valore. Per la presente analisi è stata impostata la temperatura delle pareti del forno (fig. 3.4 e 3.5), ipotizzando che sia pari a quella dell'aria presente nel forno, misurata grazie alle cinque termocoppie presenti.



**Figura 3.4:** Condizioni al contorno impostate su Comsol: temperatura del forno, modello 2D piano

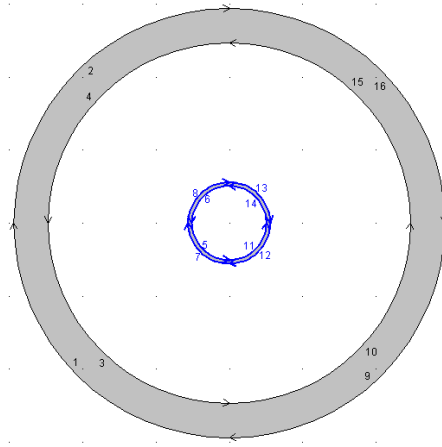


**Figura 3.5:** Condizioni al contorno impostate su Comsol: temperatura del forno, modello 2D assialsimmetrico



**Condizioni di interfaccia** Sono da impostare per gestire l'accoppiamento tra diversi domini in cui valgono equazioni o tecniche risolutive differenti, se la fisica del problema lo consente. In questo caso sono quelle che riguardano le superfici del bombolone su cui è necessario gestire la convezione con l'aria e l'irraggiamento con le pareti del forno (o del bombolone stesso, lungo la superficie stessa).

Per quanto riguarda la convezione, la quantità di energia termica scambiata tra l'aria e le superfici del bombolone (fig. 3.6 e 3.7) vale  $h(T_{amb} - T)$ , dove  $h$  è il *coefficiente di scambio convettivo* tra il dominio su cui calcolare la distribuzione di temperatura e l'ambiente circostante, e  $T_{amb}$  è la temperatura dell'aria del forno. Il coefficiente  $h$ , come visto nel cap. 2, dipende da numerosi fattori, quali la geometria del corpo e le condizioni dell'ambiente.

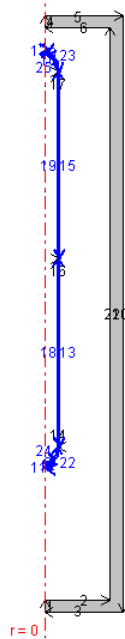


**Figura 3.6:** Condizione di interfaccia impostata su Comsol: convezione dell'aria sulle pareti del bombolone, modello 2D piano

La quantità di energia scambiata invece per effetto dell'irraggiamento vale  $C_{const}(T_F^4 - T^4)$ , dove  $T_F$  è la temperatura dell'ambiente che circonda le radiazioni elettromagnetiche, quindi quella dell'aria del forno (in base alle ipotesi viste in precedenza).  $C_{const}$  è il prodotto tra l'emissività del corpo  $\epsilon$  e la costante di Stephan-Boltzmann  $\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ :

$$C_{const} = \epsilon\sigma \quad (3.1)$$

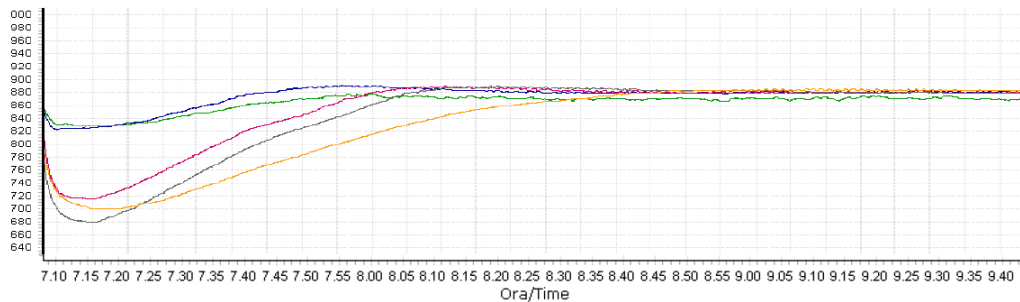
L'emissività della superficie è una proprietà del materiale. Si ricorda inoltre che il software calcola automaticamente il fattore di vista, necessario per la determinazione di  $C_{const}$ .



**Figura 3.7:** Condizione di interfaccia impostata su Comsol: convezione dell'aria sulle pareti del bombolone, modello 2D assialsimmetrico

**Condizioni specifiche per il Trattamento di Tempra** Il bombolone arriva al trattamento di tempra con una temperatura iniziale pari a quella ambiente, quindi  $20^{\circ}\text{C}$ ; la temperatura iniziale del forno non è di semplice individuazione, infatti nonostante le procedure di trattamento indicano che è possibile inserire il bombolone nel forno solo quando questo raggiunge la temperatura target per il quale è stato impostato il trattamento, non appena vengono aperte le porte del forno la temperatura scende immediatamente di circa  $100 - 150^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura del forno è stata quindi modellata come una rampa formata da due segmenti: il tratto a regime è rappresentato da un segmento orizzontale con temperatura costante pari a quella necessaria al trattamento. Il transitorio è invece modellato con una retta obliqua: per stimare il punto iniziale e il punto finale sono stati analizzati report di trattamenti passati. Nella fig. 3.8 è riportato l'andamento temporale della temperatura misurata dalle termocoppie del forno poste a diverse quote durante un singolo trattamento. Come si vede, al variare della quota, cambiano anche i punti che definiscono la rampa (questo perché la zona superiore viene investita dall'aria a  $T_{amb}$  quando vengono aperte le porte del forno), di conseguenza la condizione al contorno di temperatura imposta potrebbe essere disomogenea lungo la direzione verticale del forno. Tuttavia si è scelto di imporre una temperatura omogenea per due motivi:



**Figura 3.8:** Report della temperatura nel forno durante un trattamento di Tempra

- dal punto di vista fisico le spinte di galleggiamento tendono a uniformare la distribuzione spaziale della temperatura;
- dal punto di vista ingegneristico, scegliendo fra le cinque termocoppie quella con intercetta più bassa, ci si è messi nella condizione peggiore garantendo più affidabilità al risultato.

Mediando tale temperatura tra quelle di diversi trattamenti termici si sono ottenuti il valore iniziale e finale della rampa.

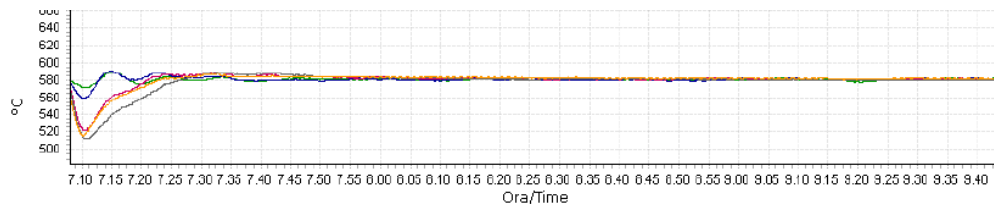
Non sono ritenute significative le variazioni di temperatura di  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  dovute allo spegnimento delle resistenze comandato dal termostato del forno.

**Condizioni specifiche per il Trattamento di rinvenimento** Dopo il riscaldamento di tempra il bombolone viene immediatamente immerso in acqua di tempra (una soluzione di acqua e polimeri) per garantire un brusco raffreddamento al materiale tale da far avvenire la trasformazione martensitica. L'acqua di tempra ha una temperatura compresa tra i  $15^{\circ}\text{C}$  e i  $65^{\circ}\text{C}$ , (salendo si verificherebbe la separazione dei polimeri dall'acqua e si correrebbe il rischio di raffreddare troppo velocemente, provocando tensioni e cricche sul bombolone). Per questo la temperatura dell'acqua di tempra è costantemente controllata e raffreddata in un circuito di refrigerazione.

Dopo essere stato circa 15 minuti all'interno della vasca di tempra il bombolone viene inserito dapprima nella vasca di lavaggio, poi nel forno di rinvenimento in modo tale da conferire al materiale il giusto mix di resistenza meccanica e tenacità.

La temperatura iniziale del bombolone è più alta di quella ambiente, ed è pari a circa  $40^{\circ}\text{C}$  (misurata attraverso un pirometro di bassa temperatura). Se per il trattamento di tempra inoltre la temperatura del forno durante il

trattamento non si poteva considerare costante perché l'inflessione di temperatura era notevole, in questo caso la si può considerare costante. Il forno impiega un tempo notevolmente basso rispetto alla durata del trattamento per arrivare in temperatura, la quale ha inoltre una flessione decisamente trascurabile rispetto alla precedente fig. 3.9.



**Figura 3.9:** Report della temperatura nel forno durante un trattamento di Rinvenimento

Si può ipotizzare quindi che per tutta la durata delle simulazioni la temperatura sia costante, pari a quella impostata del trattamento.

### 3.2.3 Discretizzazione spaziale e temporale

Una volta definita geometria e condizioni al contorno rimangono da stabilire i parametri per effettuare le simulazioni:

- discretizzazione spaziale (mesh)
- discretizzazione temporale (step di calcolo)

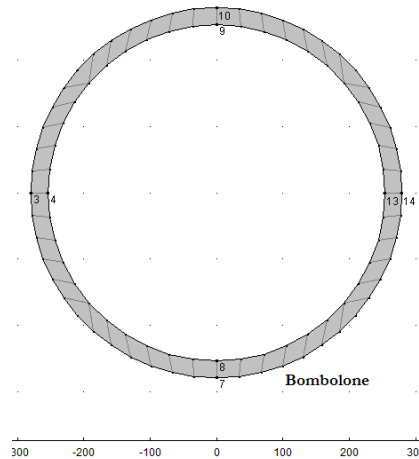
Per quanto riguarda la mesh da utilizzare, Comsol permette di utilizzare qualsiasi tipo di elemento finito: con forma triangolare o quadrangolare, sia del primo ordine che di ordine superiore. Una mesh più fitta, vale a dire costituita da elementi di piccola dimensione, è in grado di dare una soluzione più accurata, in quanto questa viene calcolata in più punti del dominio, ma il tempo impiegato dal calcolatore per arrivare alla soluzione è maggiore. Una mesh più lasca permette tempi di calcolo minori a discapito della qualità della soluzione.

Per quanto riguarda invece la discretizzazione temporale è puramente definita dall'utente, impostando istante iniziale, finale e step temporale. Lo stesso discorso fatto per la mesh vale anche per la discretizzazione temporale: minore

è il passo che viene impostato, maggiori saranno l'accuratezza della soluzione ma anche il tempo di calcolo. Per poter scegliere in maniera ottimale questi parametri sono state fatte delle simulazioni preliminari per verificare di quanto cambiasse la soluzione al variare di questi parametri, e i risultati ottenuti hanno mostrato che nessuno dei fattori (tipo di elemento finito, grandezza mesh, step temporali) risulta significativo nel range esplorato: quindi si sono utilizzati i valori che portassero a risolvere un trade-off tra qualità della soluzione e durata del calcolo.

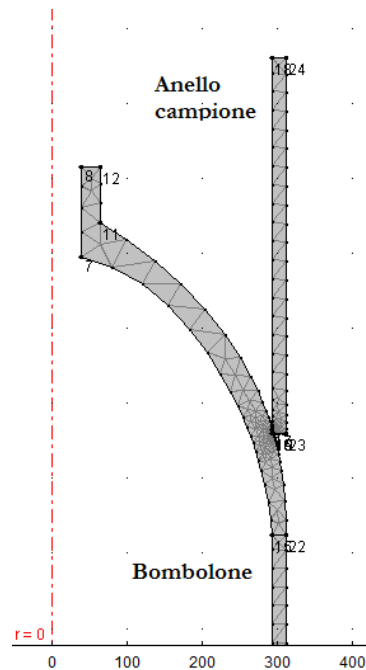
In modo particolare:

- Sono stati utilizzati elementi finiti quadrangolari del secondo ordine per il modello 2D piano, ed elementi finiti triangolari sempre del secondo ordine per il modello 2D assialsimmetrico: questo perché il primo non avendo una geometria complessa o punti critici permetteva l'utilizzo di una griglia conforme e strutturata (fig. 3.10); per il modello assialsimmetrico si è preferito optare per gli elementi triangolari arrangiati in una griglia non strutturata perché erano presenti nel dominio dei punti critici, che avrebbero potuto mandare in crisi un elemento quadrangolare o una griglia strutturata (ad esempio nelle ogive e in prossimità dell'interfaccia con l'anello, fig. 3.11).



**Figura 3.10:** Mesh, modello 2D sezione trasversale

- Per quanto riguarda la dimensione della mesh, come è stato possibile vedere nella prima prova sperimentale, la temperatura tra interno ed esterno non ha differenze significative. Questo ha permesso di impostare un solo elemento sullo spessore del corpo del bombolone,



**Figura 3.11:** Mesh, modello 2D assialsimmetrico

in quanto utilizzando poi elementi del secondo ordine permetteva di trovare la soluzione in tre punti nello spessore.

- Lo step temporale è stato scelto pari a 1 s come il  $\Delta t$  di campionamento delle termocoppie della prima prova strumentata, mentre simulazioni effettuate con altre discretizzazioni temporali (ad esempio di 5s o di 0,1s) hanno dato i medesimi risultati.

### 3.3 Prima prova sperimentale

Parallelamente allo sviluppo del lavoro di tesi, una delle azioni intraprese dall'azienda per studiare ciò che accade all'interno del forno durante il trattamento di un singolo pezzo, è stata quella di effettuare una campagna sperimentale misurando per tutta la durata del trattamento la temperatura su più parti del bombolone. In modo particolare le misure erano utili al fine di:

- Monitorare la temperatura del forno per ottenere una certificazione di qualità;

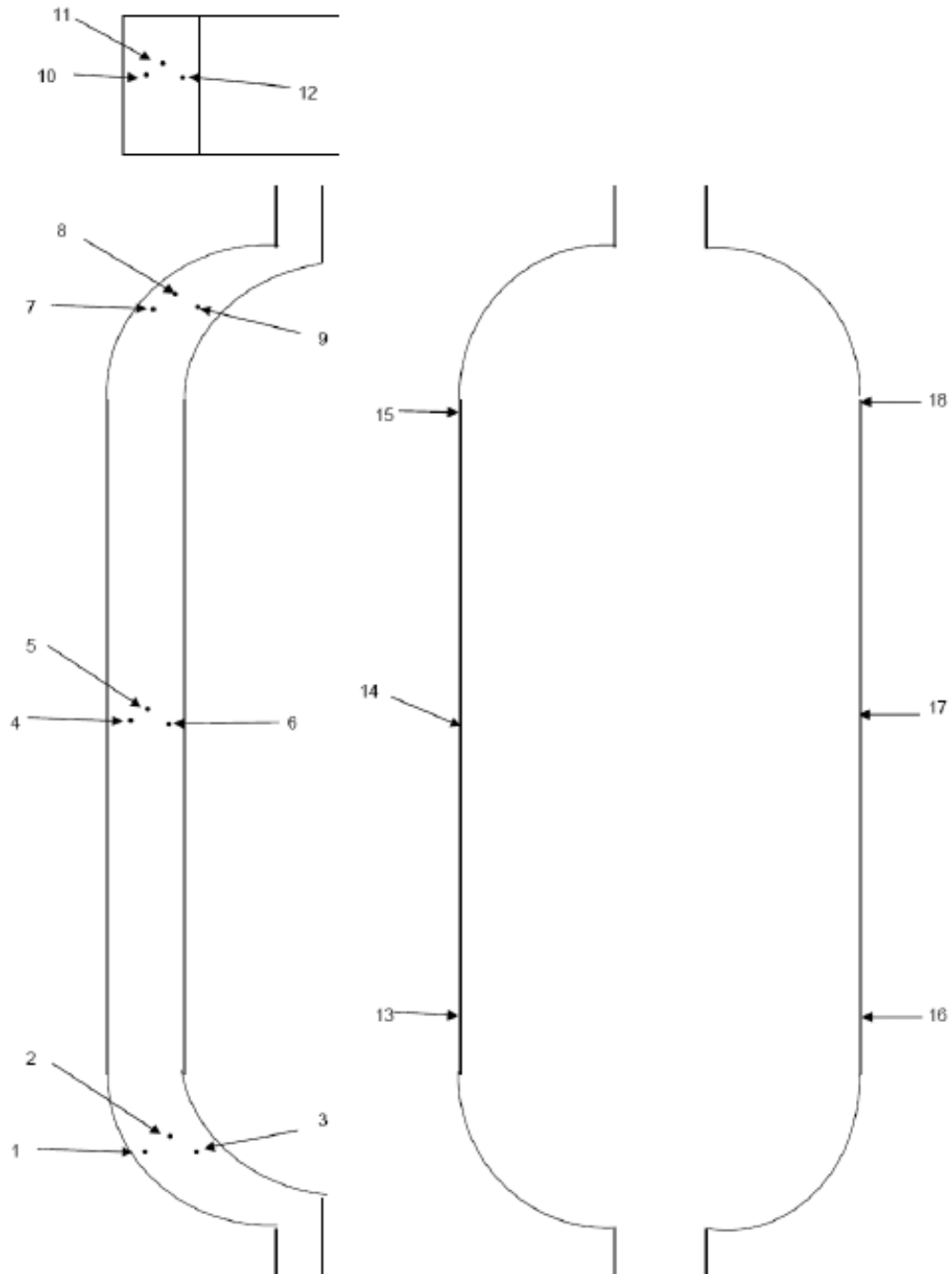
- Valutare le differenze di trattamento tra il corpo del bombolone e l'anello campione per le prove meccaniche (preso da un tubo della stessa colata del bombolone);
- Verificare l'efficacia del trattamento nelle parti più spesse e meno irraggiate del bombolone, quali le ogive.
- Validare il modello costruito sul simulatore Comsol Multiphysics

Il bombolone è stato strumentato attraverso delle termocoppie fissate al corpo mediante dei supporti saldati (fig. 3.12). In totale sono state posizionate 18 termocoppie, sia all'interno della parete che sulla superficie esterna del corpo del bombolone, delle ogive di testa e di fondo e infine sull'anello campione, inserito come "testimone" del trattamento nel forno (fig. 3.13).

Durante la campagna sperimentale sono state eseguite due repliche della misura dell'intero trattamento, ed entrambe sono state effettuate utilizzando gli stessi parametri di trattamento.



**Figura 3.12:** *Strumentazione del bombolone*



**Figura 3.13:** Posizione termocoppie sul bombolone durante la prima prova sperimentale



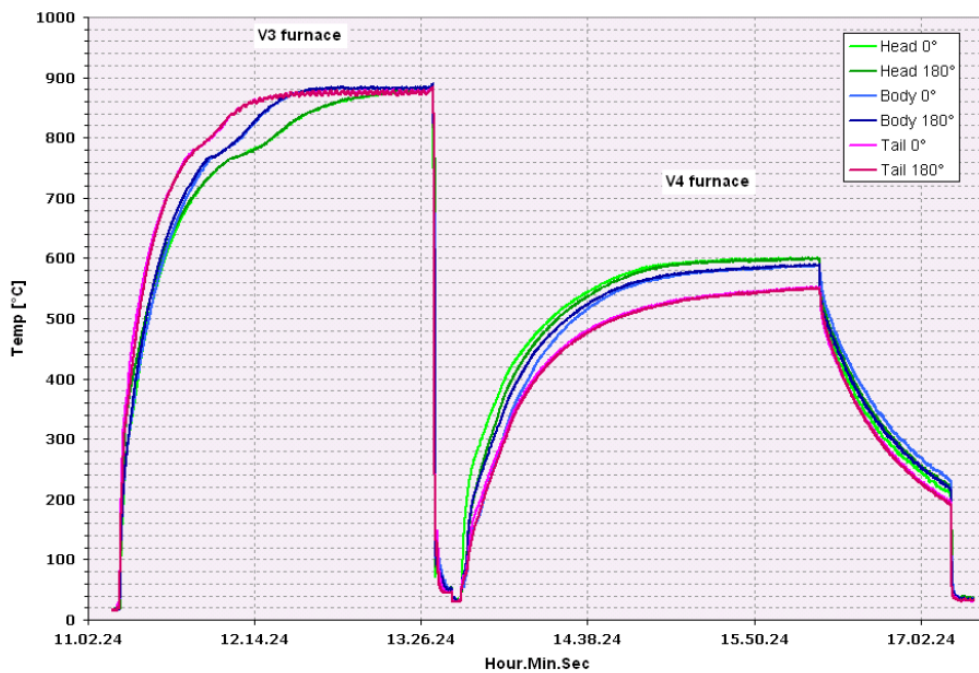
### 3.3.1 Prima replica

Per il trattamento termico di bonifica della prima delle due repliche sono stati impostati i parametri riportati in tab. 3.1:

Trattamento	Temperatura	Tempo
Tempra	2h 15m	880°C
Rinvenimento	2h 30m	600°C

**Tabella 3.1:** Parametri del trattamento di bonifica per la prima prova strumentata

Gli output delle termocoppie (dalla n° 13 alla n° 18 di fig. 3.13) posizionate sulla superficie esterna sono stati riportati in fig. 3.14:



**Figura 3.14:** Quadro generale della prima replica: prima prova strumentata

Considerazioni:

- Non c'è una sostanziale differenza tra le termocoppie posizionate simmetricamente sul bombolone, quindi si può considerare omogeneo il

riscaldamento lungo la circonferenza del forno, fatto che ha permesso di effettuare l'ipotesi di assialsimmetria.

- In entrambe le fasi di riscaldamento si rilevano disomogeneità tra le varie parti del bombolone (corpo, ogiva di testa e di fondo): in particolare modo nel rinvenimento ciò è confermato dalle temperature registrate dalle termocoppie del forno (non tutte le cinque zone di cui è composto erano alla temperatura impostata).

Di questa replica si è deciso quindi di ritenere accettabili soltanto i dati ricavati dalla termocoppia posizionata sulla superficie esterna del corpo durante il trattamento di tempra in quanto si è ipotizzato che nonostante il forno non funzionasse alla perfezione, questa zona del bombolone fosse quella che abbia meno risentito di questo malfunzionamento.

### 3.3.2 Seconda replica

Una seconda replica è stata effettuata, dopo un'accurata manutenzione del forno, per controllare se le disomogeneità di riscaldamento riscontrato nella prima replica fosse stato risolto oppure i risultati ottenuti fossero confermati. Il bombolone utilizzato per la seconda replica è lo stesso della prima, così come i parametri impostati per il trattamento (tab. 3.1). I dati trovati dalle termocoppie 13 - 18 di fig. 3.13 posizionate sulla superficie esterna del bombolone sono riportate in fig. 3.15

Considerazioni:

- E' stata confermata l'omogeneità della temperatura registrata lungo la direzione circonferenziale del bombolone, quindi l'assialsimmetria è ancora una volta rispettata
- Durante la fase di tempra si sono riscontrate ancora forti disomogeneità lungo la direzione verticale del forno a causa del mal funzionamento delle resistenze del forno
- Rinvenimento avvenuto in maniera corretta, omogeneamente su tutta la lunghezza del bombolone. Le termocoppie del forno confermano questo fatto

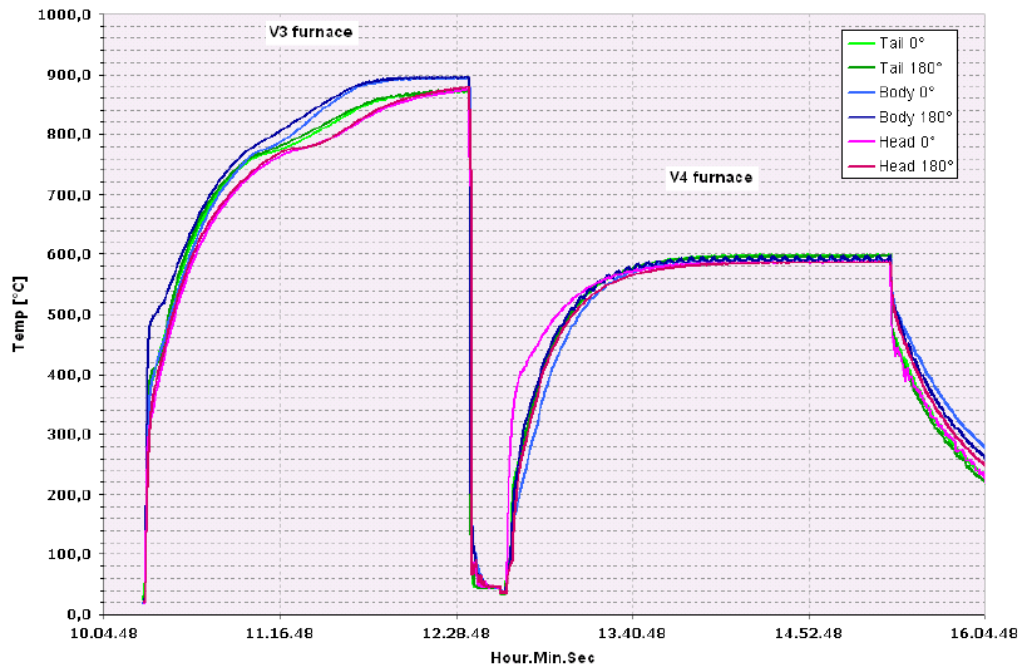


Figura 3.15: Quadro generale della seconda replica: prima prova strumentata

Della seconda replica si è deciso di ricavare quindi i dati del trattamento di rinvenimento di tutte le 18 termocoppie utilizzate per la misura.

## 3.4 Confronto prova sperimentale vs. FEM

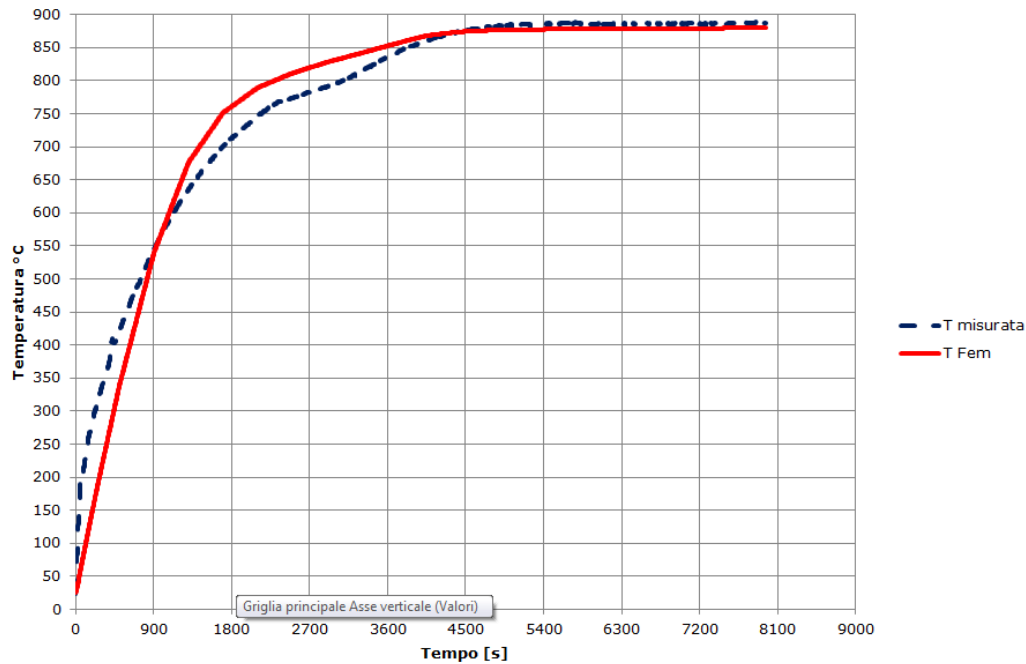
Per verificare la bontà delle simulazioni effettuate si è deciso di confrontare i risultati ottenuti con i dati della prova strumentata: in modo particolare, per le considerazioni fatte nei paragrafi 3.3.1 e 3.3.2, la fase di tempra è stata confrontata con la tempra della prima replica, mentre il trattamento di rinvenimento con quello della seconda replica.

### 3.4.1 Trattamento di tempra

Il riscaldamento di tempra è stato confrontato con la prima replica della prova strumentata, dove nonostante il trattamento non sia stato omogeneo lungo la verticale del forno, è stato possibile estrarre i dati delle termocoppie posizionate a metà bombolone. Allo stesso modo dal simulatore si sono estratti

i valori della temperatura negli stessi punti dove erano posizionate le termocoppie. Il tempo impiegato dal simulatore per trovare la soluzione è stato di circa 30 s (su un processore *Intel Core i7*), e i risultati ottenuti mostrano la bontà della simulazione per entrambi i modelli (2D trasversale e 2D assial-simmetrico), fig.3.16 e 3.17.

Osservando i grafici si può notare come la soluzione trovata dal simu-

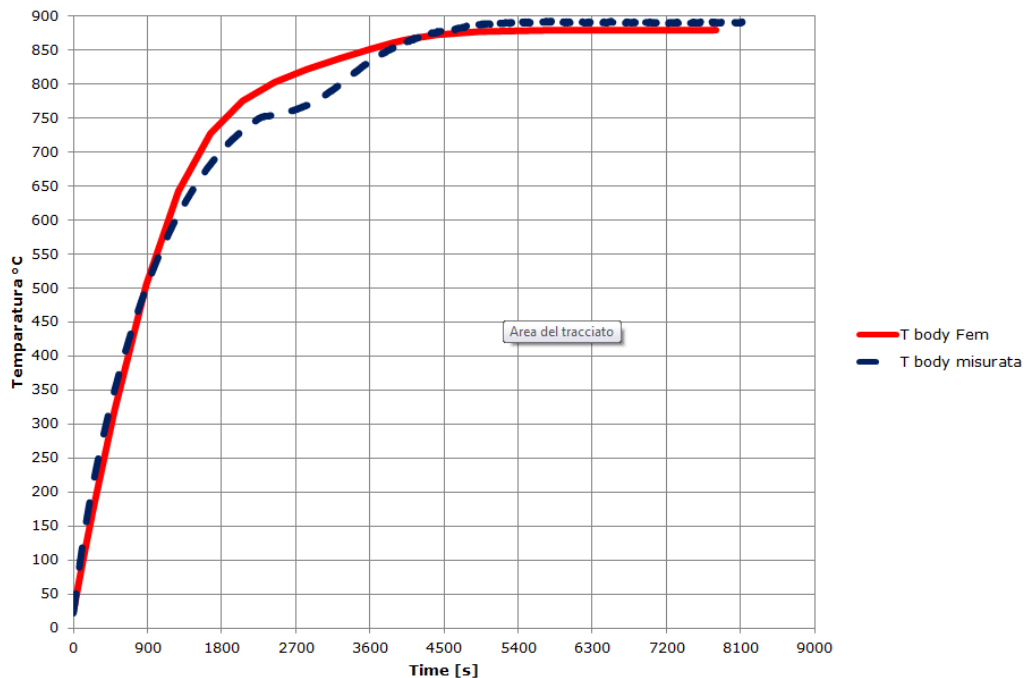


**Figura 3.16:** *Tempra, confronto modello sezione trasversale 2D*

latore sia del tutto simile ai dati sperimentali: intorno alla temperatura di 750°C entrambi i modelli differiscono in maniera più marcata dai dati del FEM, ma questo è da imputare al calore latente di trasformazione di fase dell'acciaio, non simulabile attraverso il semplice modulo Heat Transfer di Comsol. Queste condizioni al contorno e questa geometria verranno quindi utilizzate in seguito per implementare le nuove condizioni di trattamento di tempra su tutti i bomboloni prodotti.

### 3.4.2 Trattamento di rinvenimento

La buona riuscita della seconda replica ha permesso l'utilizzo dei dati sperimentali di tutte le 18 termocoppie, quindi è stato possibile verificare anche la bontà del modello assialsimmetrico oltre che confermare l'efficacia



**Figura 3.17:** *Tempra, confronto modello 2D assialsimmetrico*

del modello 2D della sezione trasversale. Per quanto riguarda quest'ultimo è stato confrontato ancora una volta con i valori di temperatura provenienti dal corpo del bombolone (fig.3.18) mentre il modello 2D assialsimmetrico è stato comparato sia alla temperatura del corpo che a quella dell'ogiva di testa che a quella dell'anello campione calzato sull'ogiva superiore (fig.3.19). La simulazione FEM approssima in maniera perfetta i dati sperimentali di entrambi i modelli, segno che i parametri impostati e le condizioni al contorno sono stati ipotizzate nella maniera corretta.

Da segnalare è il confronto tra i dati sperimentali misurati sull'ogiva di testa e quelli ricavati dalla simulazione FEM: a parità di istante temporale vi è una differenza di circa  $50^{\circ}\text{C}$ , mentre a parità di temperatura i dati sperimentali differiscono di circa 7 - 8 minuti. Il risultato è comunque da ritenere valido in quanto per il caso di studio interesserà il tempo impiegato dall'intero bombolone ad arrivare in temperatura, quindi una differenza di 7 - 8 minuti su un trattamento che dura almeno un paio d'ore è trascurabile. Un'altra considerazione gioca a favore dei dati ricavati dalla simulazione: lo spessore dell'ogiva è sempre di difficile individuazione se non misurato pezzo per pezzo in quanto in fase di forgiatura viene controllato solo il diametro esterno. Per la geometria disegnata al simulatore si è impostato un valore di spessore dell'ogiva pari a 2,5 volte quello del corpo, ma nel punto dove è stata inserita la termocoppia questo potrebbe essere stato di qualche millimetro

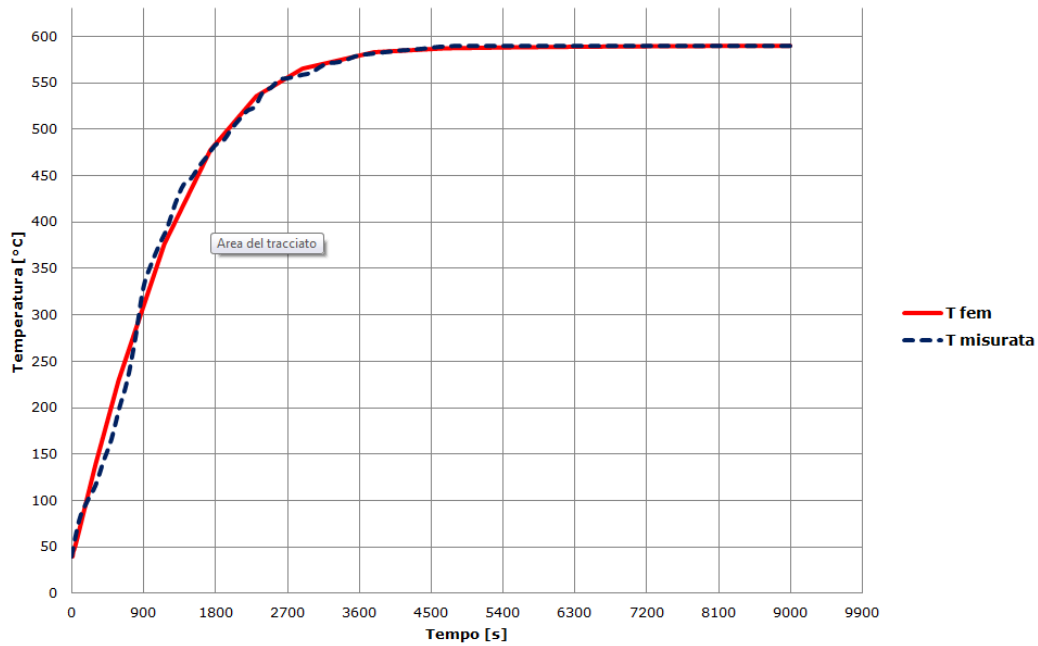


Figura 3.18: Rinvenimento, confronto modello sezione trasversale 2D

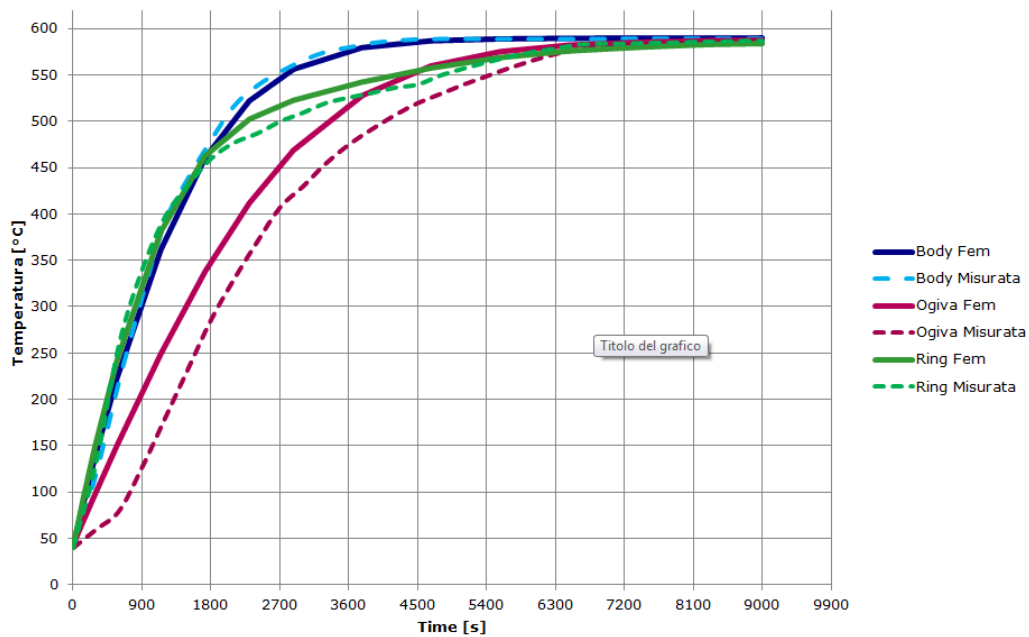


Figura 3.19: Rinvenimento, confronto modello 2D assialsimmetrico

maggiore, e questo giustificerebbe il leggero ritardo dei dati sperimentali. Possiamo concludere che il modello di trasmissione del calore risolto attraverso

so le simulazioni con Comsol Multiphysics approssima in maniera corretta l'andamento di temperatura del bombolone durante le fasi di riscaldamento della tempura e del rinvenimento.





## Capitolo 4

# Nuove Condizioni di Trattamento

Dopo aver verificato la correttezza dei risultati delle simulazioni attraverso i dati sperimentali della prima prova strumentata, si sono analizzate anche le altre condizioni di trattamento termico. Non essendo però possibile effettuare tante campagne sperimentali, quante sono le famiglie di bomboloni prodotte, si è stabilito di utilizzare sempre il simulatore Comsol Multiphysics per implementare le nuove condizioni, sia per la tempra che per il rinvenimento. Oltre quindi a simulare il trattamento in singolo per tutti i tipi di bombolone prodotti è stato portato avanti un ulteriore modello che simula anche i trattamenti in doppio (due bomboloni trattati nel forno contemporaneamente) e in multiplo (con quattro o sei bomboloni trattati a seconda della loro dimensione).

Le nuove condizioni di trattamento riguarderanno quindi quelle in singolo di tutti i bomboloni, oltre che, a seconda delle modalità che verranno descritte in seguito, quelle in multiplo per alcune categorie di bombolone. In modo particolare per tutti questi prodotti e trattamenti si vogliono individuare la durata del trattamento e la temperatura da impostare al forno.

Attraverso il simulatore si calcolerà (come fatto cap.3) la durata della rampa di salita, mentre per quanto riguarda poi la fase di mantenimento si farà riferimento alle regole stabilite dalla normativa (VdTüv) che variano in base allo spessore e al diametro. Infine, per stabilire la temperatura di trattamento, verranno analizzate le prove meccaniche passate effettuate sull'anello campione da inserire insieme al bombolone nel forno a pozzo.

## 4.1 Trattamento in doppio e multiplo

Per poter ottimizzare le prestazioni dell'impianto, è previsto il trattamento di più bomboloni contemporaneamente all'interno del forno. Il numero di bomboloni da trattare contemporaneamente è stato stabilito già in passato in base a diametro, spessore e lunghezza dei bomboloni in modo da non superare né la potenza termica del forno né la portata del carro ponte. Il trattamento multiplo viene effettuato attraverso l'utilizzo di particolari strutture di sostegno che permettono l'aggancio di più bomboloni:

- **Trattamento in doppio:** per bomboloni di diametro compreso tra  $559mm$  e  $622mm$  (diametro massimo a disposizione), viene utilizzata una struttura simile a quella per il trattamento singolo, che presenta però un aggancio in più (fig. 4.1).



Figura 4.1: *Struttura per il trattamento in doppio*

- **Trattamento a 4:** per bomboloni di diametro compreso tra  $419mm$  e  $470mm$  si utilizza una struttura a grappolo con 4 postazioni (fig. 4.2).



Figura 4.2: Struttura per il trattamento a 4

- **Trattamento a 6:** per bomboloni di diametro compreso tra  $323mm$  e  $356mm$  si utilizza una struttura a grappolo con 6 postazioni (fig. 4.3).

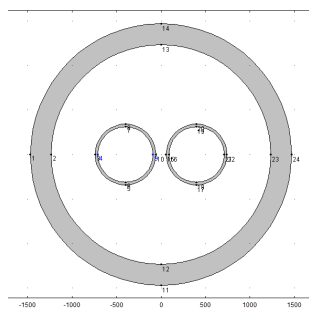


Figura 4.3: Struttura per il trattamento a 6

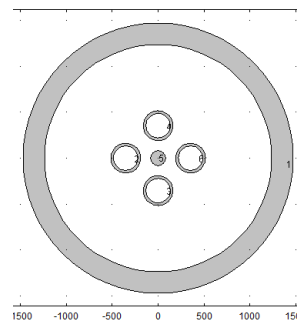
È previsto un ulteriore tipo di trattamento termico per bomboloni aventi piccola lunghezza, ed è quello di trattare in serie: i bomboloni vengono appesi l'uno all'altro in verticale fino a raggiungere la profondità massima del forno. Per quest'ultima configurazione di trattamento non verranno condotte ulteriori simulazioni, perché secondo le ipotesi fatte successivamente (cap.4.2.1) si potrà considerare questo tipo di trattamento analogo a quello di un bombolone avente una lunghezza pari a quella della serie.

Le condizioni di trattamento sono notevolmente diverse fra i trattamenti in singolo e quelli in doppio, poiché in quest'ultima configurazione vi sono zone non pienamente irraggiate dal forno che hanno bisogno di più tempo per andare in temperatura. L'implementazione dei nuovi modelli e le successive simulazioni saranno necessarie proprio per cercare di quantificare il tempo che impiegano queste zone per arrivare alla temperatura impostata, garantendo così un trattamento omogeneo su tutto il bombolone.

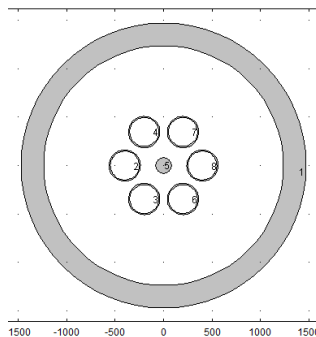
Con questa nuova condizione, è stato possibile riprodurre solamente la geometria 2D piana della sezione trasversale dei bomboloni inseriti nel forno durante un trattamento multiplo, in quanto l'ipotesi di assialsimmetria non è più valida. Viceversa si è verificato che una simulazione 3D (che avrebbe permesso di ottenere il profilo di temperatura nelle ogive) per quanto accurata, è risultata essere troppo onerosa e lunga per il calcolatore.



**Figura 4.4:** *TRT in doppio*



**Figura 4.5:** *TRT multiplo x4*



**Figura 4.6:** *TRT multiplo x6*

## 4.2 Analisi preliminare

I bomboloni che possono essere prodotti in azienda differiscono principalmente per spessore e diametro, e per ognuna di queste combinazioni è disponibile una vasta gamma di lunghezze del corpo. Il numero di simulazioni da effettuare risulta così essere elevato senza prima effettuare un'analisi che potrebbe evidenziare eventuali fattori non significativi al fine della determinazione dei parametri di trattamento.

Con l'analisi seguente sono stati così presi in considerazione i possibili fattori di influenza e analizzati per il trattamento singolo. Nel caso in cui venissero individuate delle variabili geometriche (o di setup del forno) non significative per il corretto svolgimento del trattamento, il numero di simulazioni si potrebbe ridurre.

### 4.2.1 Analisi TRT singolo

Dopo un'analisi qualitativa del trattamento in singolo, i fattori ritenuti significativi sono:

- Spessore del corpo
- Diametro
- Lunghezza del corpo
- Temperatura del forno impostata per il trattamento

Facendo variare questi fattori su più livelli, è possibile individuare quali sono più influenti per la fase di riscaldamento del trattamento. Questa analisi è stata però effettuata soltanto per il rinvenimento in quanto nella fase di tempra la temperatura impostata al forno in ogni trattamento è sempre 880°C e quindi durante questa fase si avrebbe un fattore in meno su cui indagare.

La fase di riscaldamento del bombolone per cui si dovranno fornire i parametri è comprensiva di rampa di riscaldamento fino alla temperatura target e mantenimento. Con la presente analisi si vuole far luce sugli aspetti della prima di queste due fasi in quanto per il mantenimento verranno utilizzate le normative.

Si è stabilito che la rampa di salita debba terminare non appena il punto

meno irraggiato dell'ogiva (visibile attraverso il modello 2D assialsimmetrico di fig. 4.7) raggiunge la temperatura target, definita come:

$$T_{target} = T_{rinv} - 10^{\circ}C \quad (4.1)$$

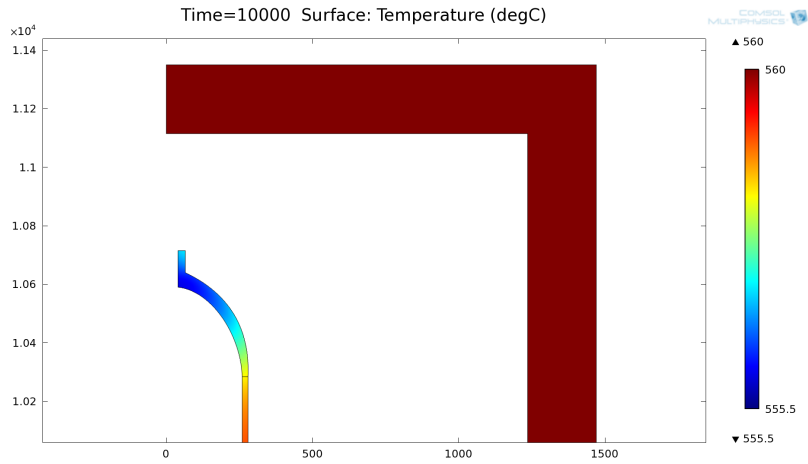


Figura 4.7: Distribuzione di temperatura sull'ogiva del bombolone al raggiungimento della temperatura target

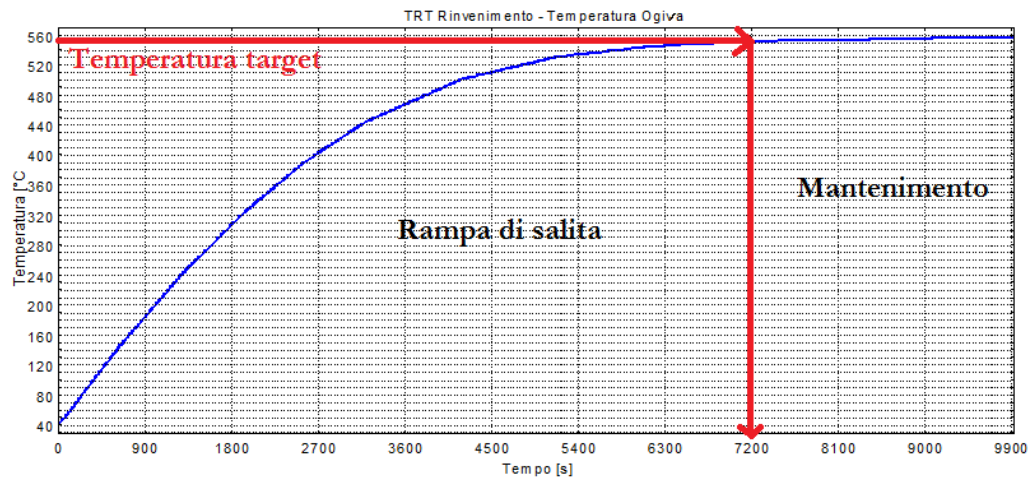


Figura 4.8: Individuazione della temperatura target e della rampa di salita

È stata definita questa temperatura come limite per della rampa di salita in quanto nessun punto del bombolone utilizzando queste equazioni raggiungerà la temperatura del forno, ma al massimo vi tenderà asintoticamente;

inoltre si può notare come intorno a tale temperatura inizi una sorta di mantenimento (fig. 4.8). Sono state effettuate in totale 12 simulazioni di un piano fattoriale, facendo variare i quattro fattori su tre livelli. Il valore dei fattori mantenuti fissi sono quelli tipici della produzione. È stata utilizzata la medesima mesh per tutte le simulazioni e la stessa discretizzazione temporale (start = 0s, stop = 10000s, step = 5s). Il calcolatore ha impiegato in media 40s per trovare ogni soluzione.

Si riportano ora i risultati analizzando singolarmente ogni fattore considerato:

- **Spessore:** il valore dello spessore è definito da quello del tubo fornito dal laminatoio, e non varia durante il ciclo produttivo di un bombolone. I valori limite sono 12,3 mm e 30,3 mm ed è possibile produrre bomboloni con qualsiasi valore di spessore all'interno di questo range.

In tab. 4.1 e in fig. 4.9 i risultati al variare dello spessore:

#	S [mm]	D [mm]	L [mm]	T [°C]	$t_{salita}$ [s]
1	<b>12,3</b>	622	3579	630	4530
2	<b>21</b>	622	3579	630	6725
3	<b>30,3</b>	622	3579	630	8010

**Tabella 4.1:** *Analisi preliminare, risultati al variare dello spessore*

Lo spessore risulta essere al termine dell'analisi il fattore che ha più influenza sulla determinazione della durata del trattamento: le rampe di salita differiscono infatti anche di 30 minuti (1800 s) l'una dall'altra. Anche per minime differenze di spessore sarà necessario quindi effettuare simulazioni per la determinazione dei parametri di trattamento.

- **Diametro:** il diametro è il fattore con il quale vengono classificati i recipienti, e come presentato nell'introduzione, allo stato dell'arte si producono bomboloni aventi diametro compreso tra 323 mm e 622 mm.

In tab. 4.2 e in fig. 4.10 i risultati al variare del diametro:

#	S [mm]	<b>D</b> [mm]	L [mm]	T [°C]	$t_{salita}$ [s]
4	18,1	<b>323,9</b>	3579	630	4035
5	18,1	<b>470</b>	3579	630	4995
6	18,1	<b>622</b>	3579	630	5250

**Tabella 4.2:** *Analisi preliminare, risultati al variare del diametro*

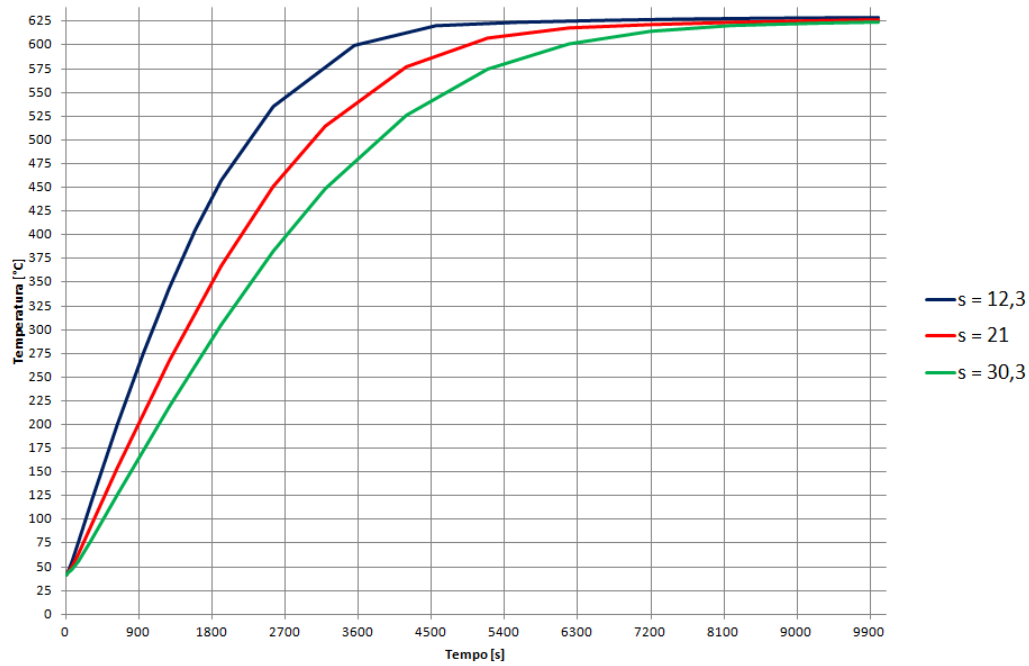


Figura 4.9: Analisi preliminare, risultati al variare dello spessore

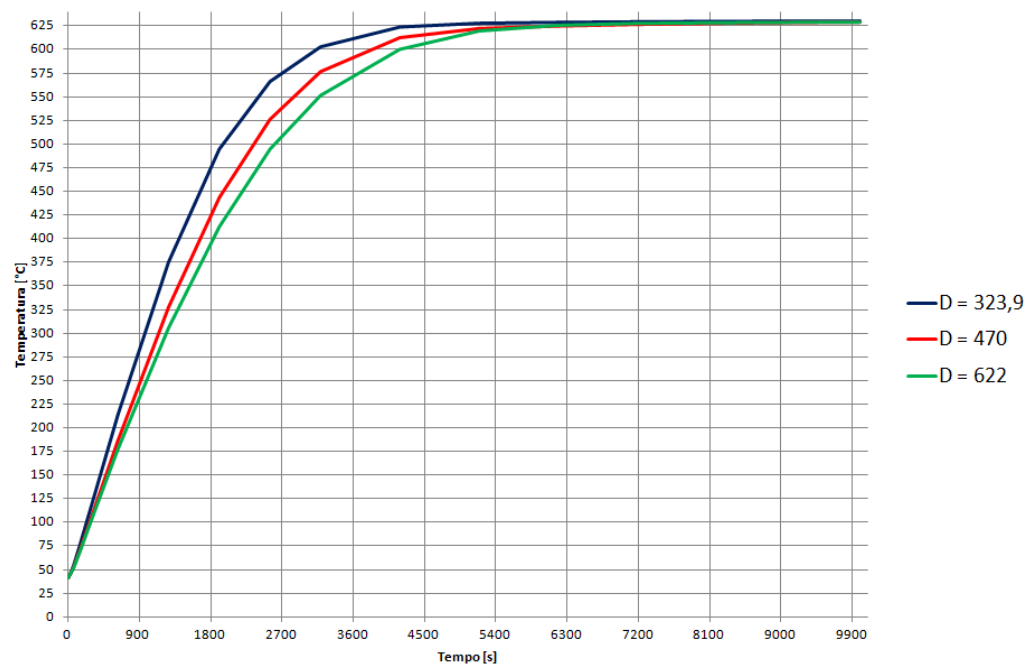


Figura 4.10: Analisi preliminare, risultati al variare del diametro

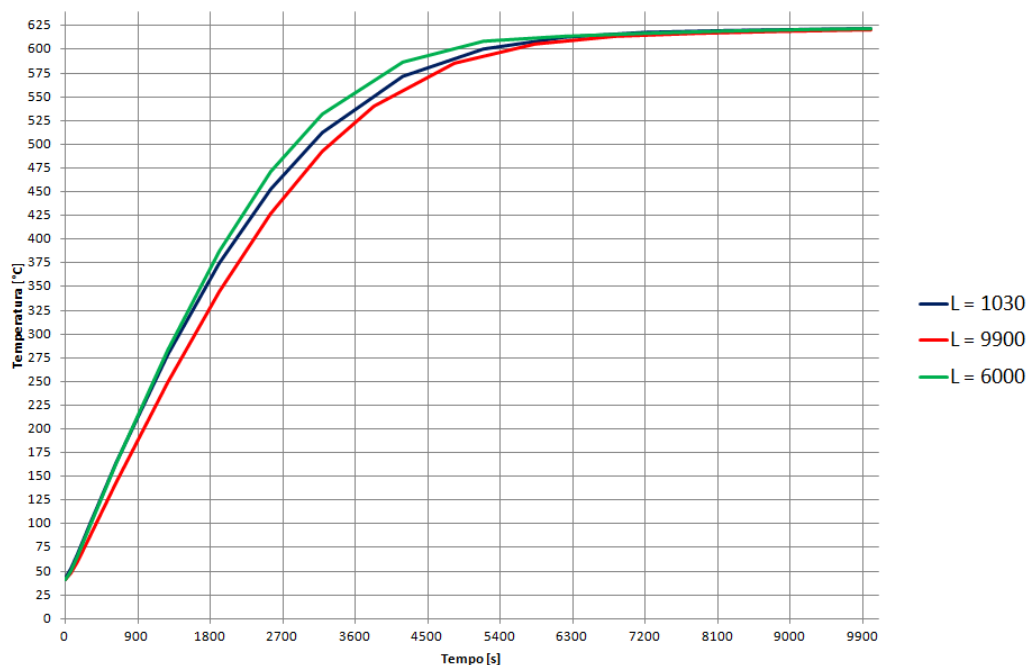


Il diametro è risultato anch'esso significativo anche se in maniera minore dello spessore: vi sono infatti differenze nell'ordine dei 20 minuti tra il livello massimo e il minimo. Il diametro sarebbe stato comunque un fattore da considerare poiché, in base al suo valore, vengono classificati i bomboloni e inoltre vengono effettuati diversi tipi di trattamenti multipli, come visto nella sez. 4.1.

- **Lunghezza:** diametro e spessore definiscono la famiglia di bomboloni, e per ognuna delle loro combinazioni è presente una vasta gamma di lunghezze complessive (vale a dire corpo più ogive), che vanno da un minimo di 1030 *mm* ad un massimo di 9900 *mm*. In tab. 4.3 e in fig. 4.11 i risultati al variare della lunghezza:

#	S [mm]	D [mm]	L [mm]	T [°C]	$t_{salita}$ [s]
7	19,5	622	<b>1030</b>	630	5735
8	19,5	622	<b>6000</b>	630	6095
9	19,5	622	<b>9900</b>	630	6310

**Tabella 4.3:** *Analisi preliminare, risultati al variare della lunghezza*



**Figura 4.11:** *Analisi preliminare, risultati al variare della lunghezza*

La lunghezza è possibile ritenerla non significativa in quanto tra i valori limite la differenza è di 10 circa minuti, quindi poco rispetto ai 30 minuti dello spessore. Inoltre per ogni famiglia di bombolone presente in archivio la gamma di lunghezza varia tendenzialmente nell'intorno di 2 o 3 metri e raramente abbiamo valori limite come quelli con cui sono state fatte queste simulazioni (costruiti ad hoc per l'analisi preliminare): questo riduce ancora di più le differenze di durata della rampa di salita tra bomboloni della stessa famiglia. Considerare la lunghezza un fattore non significativo permette di ridurre in modo importante il numero di simulazioni da lanciare (da 250 tipi di bomboloni circa di cui simulare tempra e rinvenimento, a circa una cinquantina di famiglie).

Questa semplificazione permette di studiare i trattamenti effettuati in serie (vedi sez. 4.1) come il trattamento di un singolo bombolone di dimensioni pari alla lunghezza complessiva della serie.

- **Temperatura del forno:** a seconda della temperatura con la quale viene effettuato, il rinvenimento le caratteristiche meccaniche ottenibili possono variare. In modo particolare, più la temperatura del forno è elevata, più la resistenza meccanica sarà inferiore rispetto a quella iniziale, a favore invece di una più alta tenacità e duttilità. La temperatura alla quale effettuare il rinvenimento, secondo le norme e specifiche applicabili, può variare tra 560°C e 630°C.

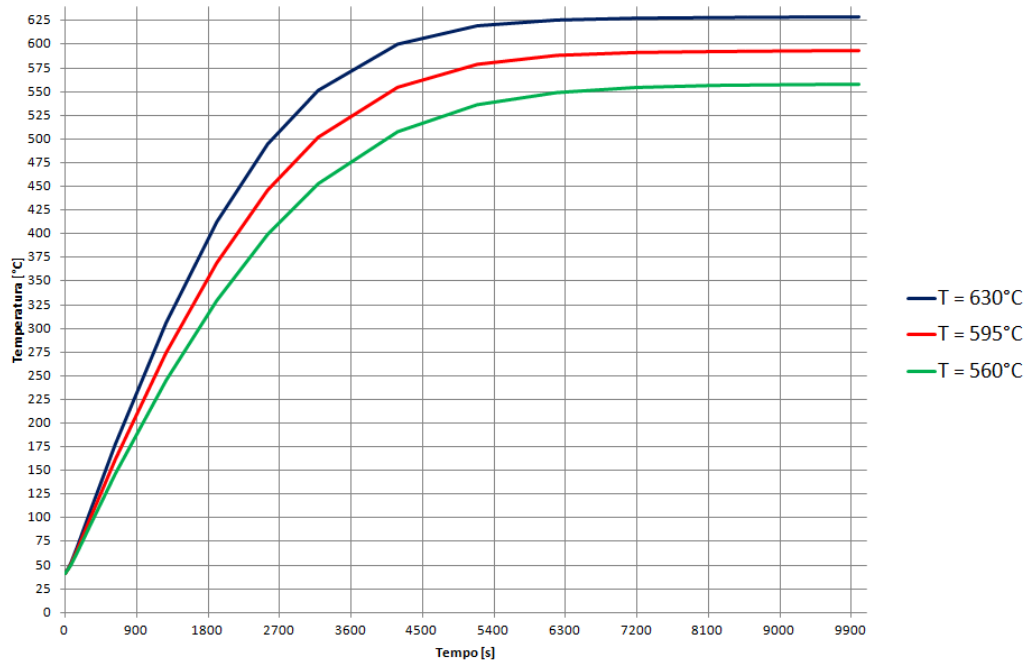
Per quanto riguarda la temperatura durante la fase di tempra, rimarrà sempre pari a 880°C in quanto non influisce sulle caratteristiche meccaniche finali.

In tab. 4.4 e in fig. 4.12 i risultati al variare della temperatura impostata al forno di rinvenimento:

#	S [mm]	D [mm]	L [mm]	T [°C]	$t_{salita}$ [s]
10	18,1	622	3579	<b>560</b>	5460
11	18,1	622	3579	<b>595</b>	5305
12	18,1	622	3579	<b>630</b>	5250

**Tabella 4.4:** *Analisi preliminare, risultati al variare della temperatura del forno*

Il fattore temperatura del forno risulta essere quello meno influente, con una differenza minima nell'ordine dei minuti. Questo si è rivelato essere un enorme vantaggio in quanto permetterà di svolgere tutte le simulazioni senza dover prima stabilire la temperatura del trattamento; tale temperatura verrà modificata soltanto in un secondo momento in



**Figura 4.12:** *Analisi preliminare, risultati al variare della temperatura del forno*

base alle caratteristiche meccaniche desiderate. Per la determinazione di questo parametro si rimanda al cap. 4.3

#### 4.2.2 Analisi TRT doppio e multiplo

La seconda parte dell'analisi preliminare si è concentrata invece sui trattamenti multipli, per cercare di quantificare il ritardo della zona meno irraggiata dal forno per effetto della presenza di più bomboloni contemporaneamente, in quanto allo stato dell'arte questo non era mai stato analizzato.

I trattamenti multipli vengono effettuati in base al diametro del bombolone (sez. 4.1), quindi non è stato possibile simulare casi limite come per la precedente analisi, ma ci si è limitati solamente a svolgere una simulazione per ogni modalità di trattamento e a quantificare il ritardo. Si vuole ricavare per le tre modalità di trattamento la differenza della durata del riscaldamento per due punti sul corpo del bombolone, vale a dire quello meno irraggiato dal forno (punto B fig. 4.13 e seguenti), e quello diametralmente opposto (punto A fig. 4.13 e seguenti). Le geometrie utilizzate sono quelle descritte nella sez. 4.1 in particolare modo quelle riguardanti il rinvenimento, mentre la mesh e lo step temporale sono quelli utilizzati sia per la prima parte dell'analisi

preliminare (sez. 4.2.1) che per la fase di validazione. Si considera conclusa la rampa di salita non appena la temperatura raggiunta dai punti è pari alla temperatura target definita dall'eq. 4.1.

In tabella 4.5 si riassumono i risultati:

Tipo TRT	D [mm]	S [mm]	L [mm]	$T_{trt}$ [°C]	$T_A$ [s]	$T_B$ [s]	diff. [s]
doppio	622	19,4	6917	570	4490	4910	420
multi x4	419	18,5	4835	630	7256	10800	3544
multi x6	323,9	12,3	3255	630	6295	8910	2615

**Tabella 4.5:** *Analisi preliminare TRT multiplo*

Considerazioni:

- **Trattamento in doppio:** i risultati sono diagrammati in fig. 4.13; il campo di temperatura raffigura l'istante temporale in cui il punto A raggiunge la temperatura target.

La differenza tra le rampe di salita è nell'ordine di 10 minuti circa. E' una differenza lieve rispetto alla durata totale, segno che il fatto di trattare contemporaneamente due bomboloni si è rivelata un'ottima strategia produttiva, che permette di risparmiare un tempo notevolmente elevato e di mantenere elevata la qualità del recipiente.
- **Trattamento multiplo x 4:** i risultati sono diagrammati in fig. 4.14. Il punto B, quello meno irraggiato del forno, raggiunge la temperatura target addirittura un'ora dopo rispetto al punto A: questo ritardo è da imputare al fatto che per trattare 4 bomboloni contemporaneamente viene utilizzata una struttura (fig. 4.2) dotata di un palo di sostegno che rallenta notevolmente la fase di riscaldamento del bombolone. Nonostante questo fatto, la produttività è stata incrementata sfruttando il trattamento multiplo a 4, ed è in fase di studio una speciale struttura per poter appendere i 4 bomboloni dall'alto analogamente al caso dei trattamenti in doppio, che permetterebbe di eliminare il palo centrale facendo risparmiare ulteriormente tempo.
- **Trattamento multiplo x 6:** i risultati sono diagrammati in fig. 4.15. La differenza tra le rampe di salita tra i punti A e B nel caso del trattamento a 6 bomboloni si attesta intorno ai 45 minuti. Per questo tipo di trattamenti multipli vale lo stesso discorso fatto per quelli a 4 bomboloni: la configurazione della struttura (fig. 4.3) è una delle principali responsabili del ritardo.

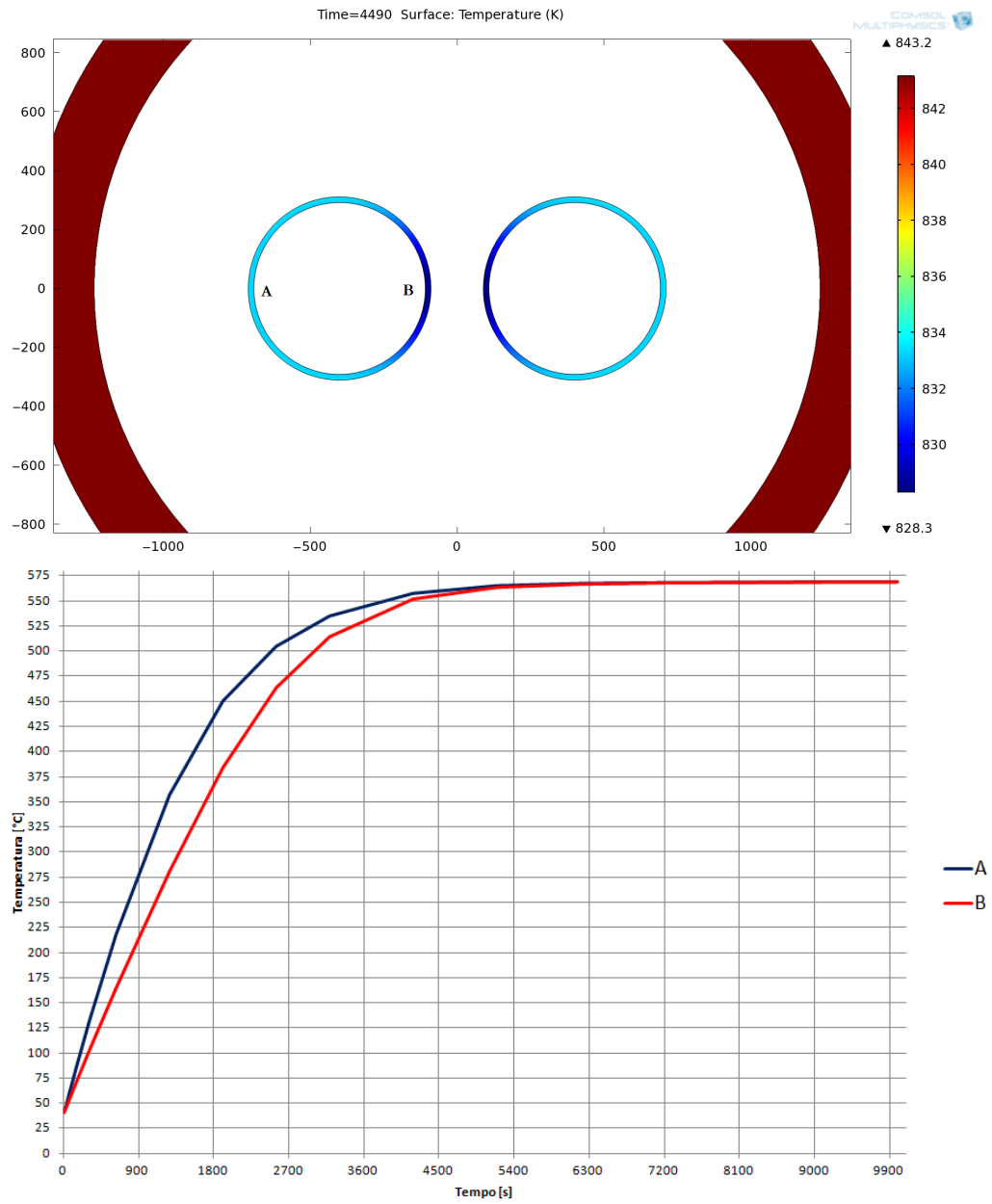


Figura 4.13: Analisi preliminare, trattamento in doppio

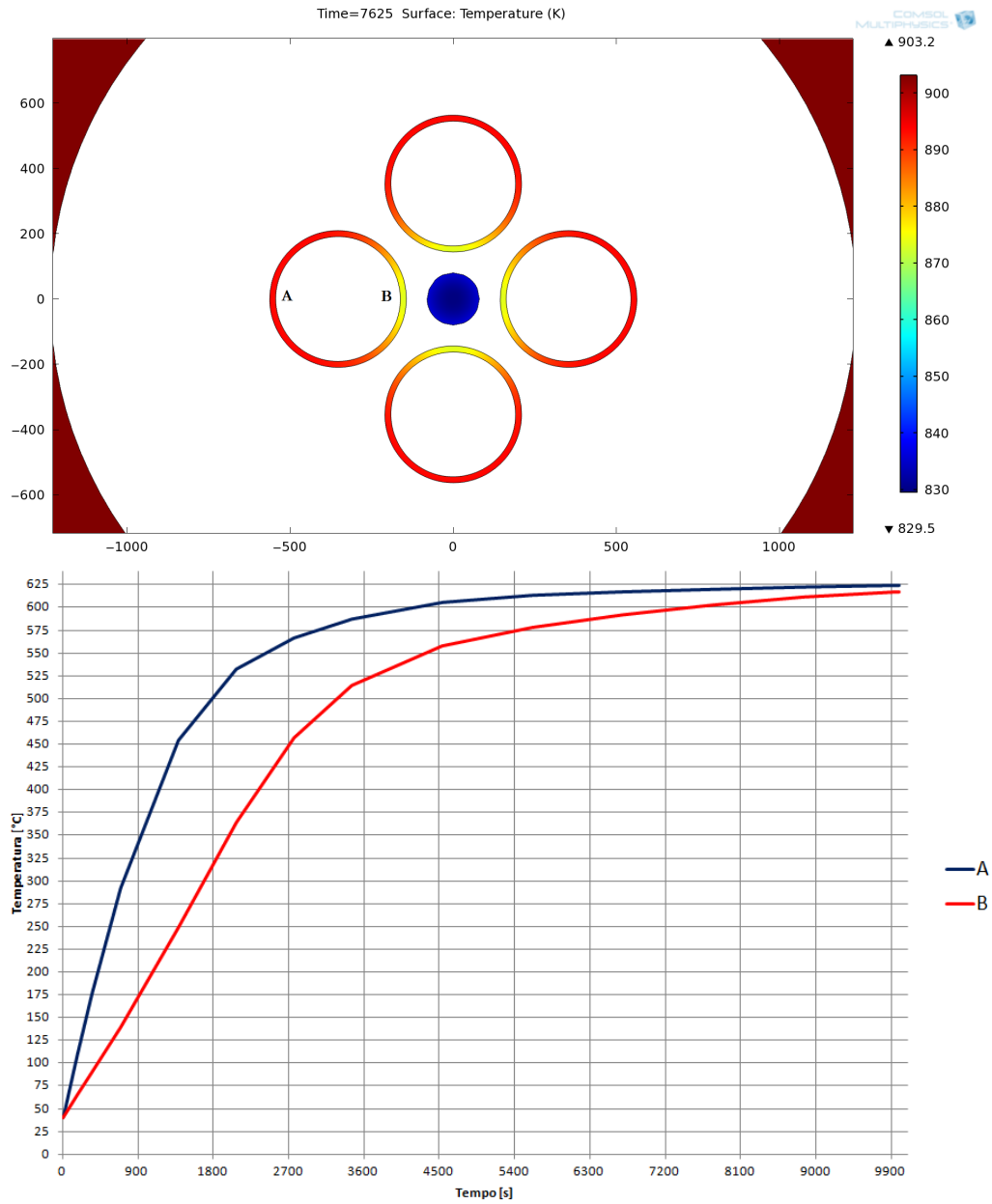


Figura 4.14: Analisi preliminare, trattamento multiplo  $\times 4$

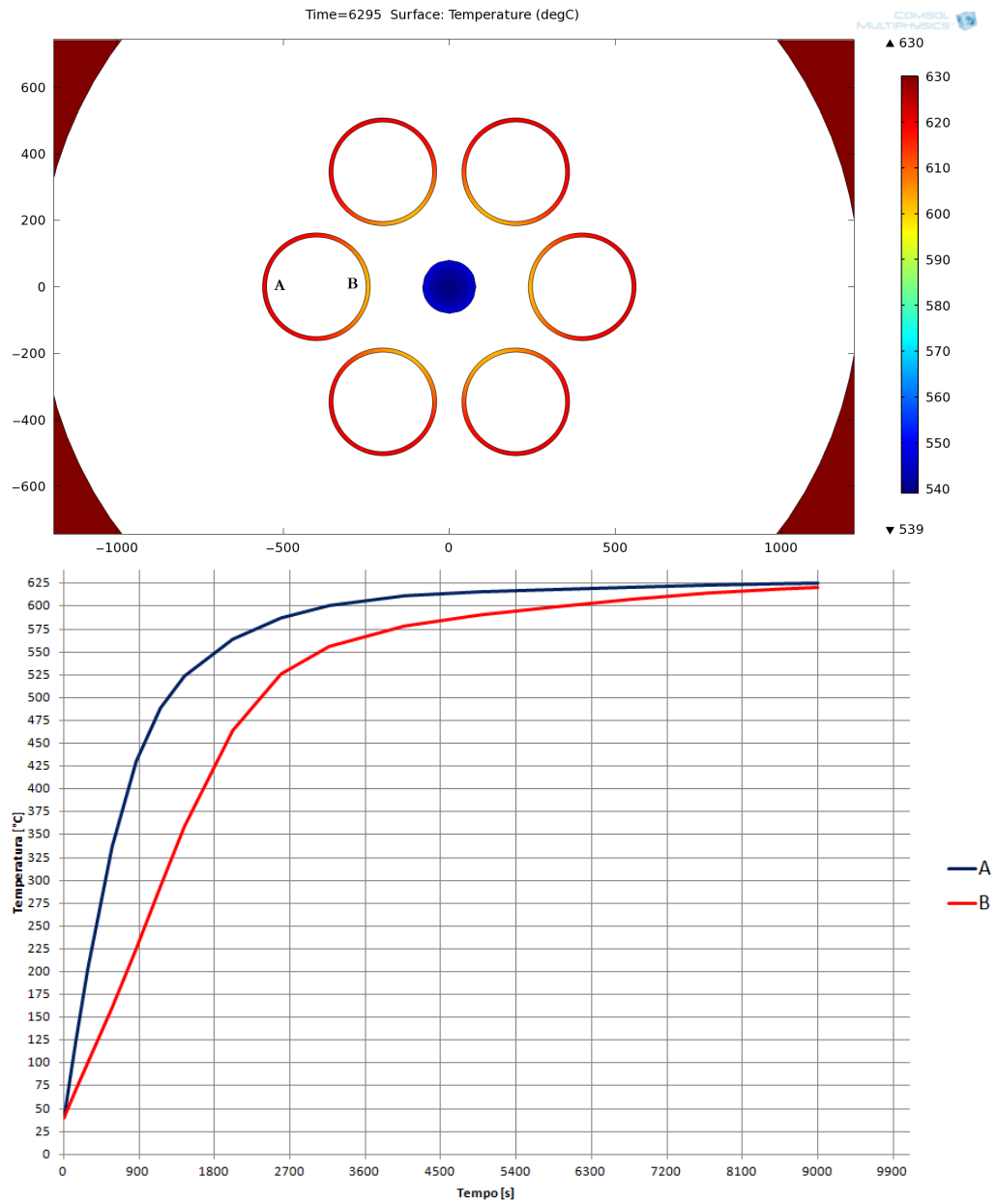


Figura 4.15: Analisi preliminare, trattamento multiplo x6

## 4.3 Individuazione dei nuovi parametri di trattamento

Per ogni famiglia di bombolone e per i vari tipi di trattamento termico si ricaveranno ora durata e temperatura per le fasi di riscaldamento della tempra e del rinvenimento.

Grazie al fatto per cui è possibile considerare la temperatura non significativa per la determinazione della durata del rinvenimento, è stato possibile separare questa parte di lavoro in due fasi: la prima prevede l'individuazione della durata del trattamento (indipendentemente dalla temperatura), in un secondo momento è stata invece ricavata la temperatura del forno sulla base di risultati delle prove meccaniche avvenute in ( si ricorda che la temperatura di austenitizzazione è sempre pari a 880°C e non è influente sulle caratteristiche del materiale).

Grazie all'analisi preliminare è stato possibile poi ridurre il numero di simulazioni da lanciare. Più precisamente da 211 bomboloni a 59 famiglie (pari diametro e spessore) per cui trovare la durata di trattamento, sia tempra che rinvenimento, sia singolo che multiplo a seconda dei diametri.

### 4.3.1 Determinazione della durata

Per la determinazione della durata di tempra e rinvenimento ci si è avvalsi di due strumenti: il simulatore Comsol Multiphysics ha permesso di stabilire la durata della fase di riscaldamento, mentre i *fogli materiale VdTüv* hanno permesso di definire la durata del mantenimento.

La durata totale viene quindi definita come:

$$t_{TRT} = t_{riscaldamento} + t_{mantenimento} \quad (4.2)$$

Il tempo di riscaldamento è definito come quel tempo in cui il bombolone raggiunge in ogni suo punto la temperatura target (eq. 4.1). Il tempo di mantenimento è definito dalla normativa in base all'acciaio utilizzato per la produzione (tab. 4.6). Il mantenimento non dipende dalle modalità di trattamento, ma solo ed esclusivamente dal valore dello spessore del corpo del bombolone.

**Esempio di calcolo** Viene riportato di seguito un esempio di calcolo riferito ad uno dei tanti bomboloni presenti a database per comprendere meglio la determinazione della durata del trattamento. La simulazione effettuata per



Acciaio	Trattamento	Mantenimento
27 CrMo 4	Tempra	3 min/mm di spessore, minimo 30 min
	Rinvenimento	5 min/mm di spessore, minimo 30 min
34 CrMo 4	Tempra	1 min/mm di spessore, minimo 15 min
	Rinvenimento	2 min/mm di spessore, minimo 30 min

**Tabella 4.6:** *Tempi di mantenimento VdTüv*

calcolare la durata della rampa di salita è stata effettuata con impostazioni della mesh già descritte nell'analisi preliminare. Lo step temporale è stato aumentato a 5s per ridurre la durata delle simulazioni, e questo cambiamento, come visto nella sez. 4.2 non sarà influente per la determinazione della durata. Il processo di individuazione della durata è differente per i trattamenti singoli e multipli.

- **Trattamento singolo:** Per il trattamento singolo, è stato utilizzato il modello 2D assialsimmetrico della sezione longitudinale, individuando il tempo in cui il punto meno irraggiato sull'ogiva raggiungeva la temperatura target. Ricordiamo infine che la temperatura impostata per il trattamento di rinvenimento non influisce sulla durata della fase di riscaldamento, sulla base di quanto osservato in fase di analisi preliminare. Si riportano in tab. 4.7 e in fig. 4.16 i risultati della simulazione:

D [mm]	S [mm]	L [mm]	Acciaio	$T_{TRT}$ [°C]	$t_{salita}$ [s]
559	25,7	8920	34 CrMo 4	580	8070

**Tabella 4.7:** *Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento, esempio di calcolo*

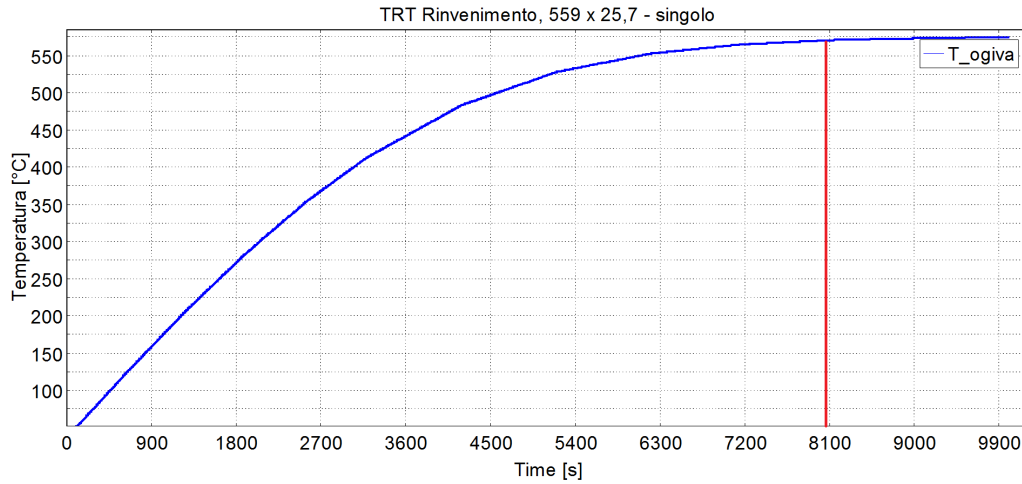
A questo punto si somma al tempo trovato quello di mantenimento: per l'acciaio utilizzato vale 2 min/mm (in base alla tab. 4.6);

$$t_{\text{mantenimento}} = 2[\text{min/mm}] \cdot 25,7[\text{mm}] = 51,4[\text{min}] = 3084[\text{s}] \quad (4.3)$$

$$t_{TRT} = t_{\text{salita}} + t_{\text{mantenimento}} \quad (4.4)$$

$$t_{TRT}[\text{s}] = 8070[\text{s}] + 3084[\text{s}] = 11154[\text{s}] \approx 3[\text{h}] \quad (4.5)$$

- **Trattamento doppio/multiplo:** Per quanto riguarda il trattamento in doppio l'individuazione della durata del trattamento risulta essere



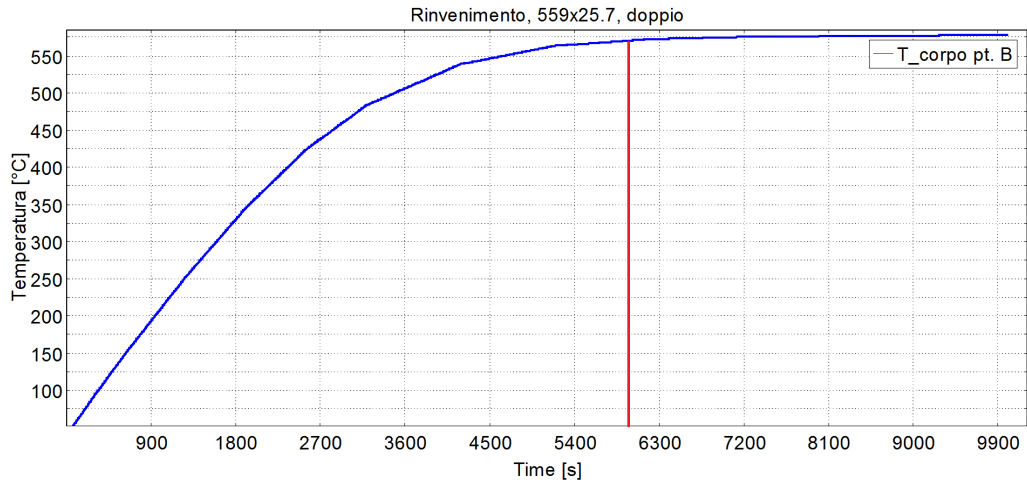
**Figura 4.16:** Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento, esempio di calcolo

più articolata; utilizzando lo stesso bombolone dell'esempio precedente sono stati necessari sia il modello 2D assialsimmetrico che quello 2D della sezione trasversale per il trattamento in doppio 4.4. Quest'ultimo è stato utilizzato per individuare il tempo impiegato dal punto più vicino all'altro bombolone (punto B, figura 4.13) per raggiungere la temperatura target. Per ipotesi questo modello è indice di ciò che accade in una sezione lontana dalle ogive (come la sezione a metà bombolone), quindi bisognerà aggiungere del tempo per permettere anche all'ogiva di arrivare in temperatura. Il ritardo dell'ogiva rispetto al corpo si determina attraverso il modello 2D assialsimmetrico; infine come per il trattamento singolo è necessario sommare al tempo trovato quello di mantenimento (si ricorda che il tempo di mantenimento è lo stesso sia per il trattamento singolo che quello doppio). Si riportano in tab. 4.8 e in fig. 4.17 i risultati della simulazione: A questo punto

D [mm]	S [mm]	L [mm]	Acciaio	$T_{TRT}$ [°C]	$t_{salita,doppio}$ [s]
559	25,7	8920	34 CrMo 4	580	5975

**Tabella 4.8:** Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento, esempio di calcolo per un trattamento in doppio

è necessario sommare al risultato ottenuto il ritardo per effetto della presenza dell'ogiva: questo ritardo si trova calcolando la differenza tra il momento in cui arriva in temperatura l'ogiva e quello in cui arriva in



**Figura 4.17:** Risultati della simulazione per determinare la durata della fase di riscaldamento con la geometria 2D della sezione trasversale del bombolone, esempio di calcolo per un trattamento in doppio

temperatura il corpo.

$$t_{ritardo_{ogiva}} = t_{salita_{ogiva}} - t_{salita_{corpo}} \quad (4.6)$$

D [mm]	S [mm]	L [mm]	Acciaio	$T_{TRT}$ [°C]	$t_{ritardo_{ogiva}}$ [s]
559	25,7	8920	34 CrMo 4	580	2870

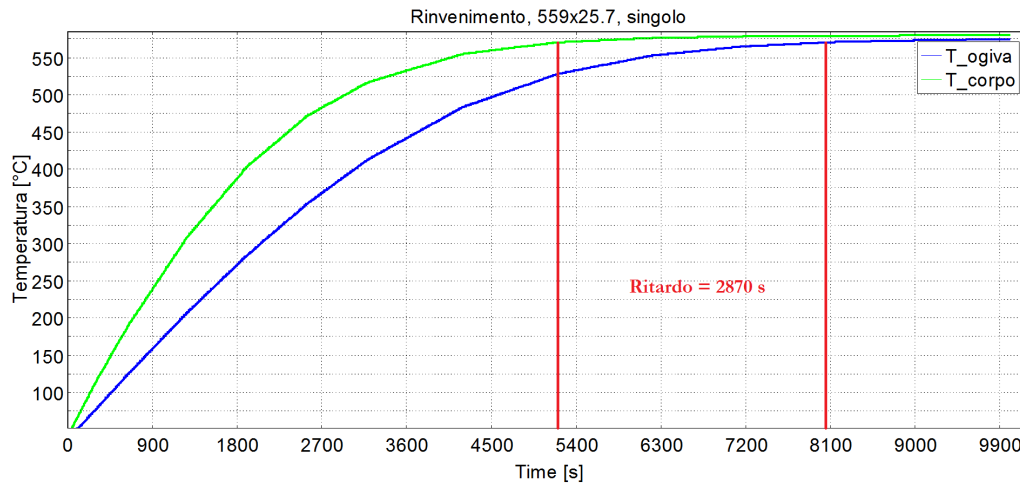
**Tabella 4.9:** Risultati simulazione per determinare il ritardo dell’ogiva, esempio di calcolo con modello 2D assialsimmetrico

Infine, come per il trattamento singolo, si somma ancora una volta il tempo di mantenimento secondo quanto prescritto nella normativa.

Riassumendo, in totale si ha:

$$t_{TRT} = t_{salita_{doppio}} + t_{ritardo_{ogiva}} + t_{mantenimento} \quad (4.7)$$

$$t_{TRT}[s] = 5975[s] + 2870[s] + 3084[s] = 11929[s] \approx 3h15min \quad (4.8)$$



**Figura 4.18:** *Determinazione ritardo ogiva, esempio di calcolo con modello 2D assialsimmetrico*

### 4.3.2 Temperatura

Il secondo parametro di trattamento termico che è necessario stabilire è la temperatura del forno di rinvenimento. Se per la fase di tempra la temperatura del forno deve solamente superare i punti critici del materiale (vedi cap. 1) e non è significativa per conferire al materiale le dovute caratteristiche meccaniche, per quanto riguarda il rinvenimento è fondamentale scegliere la temperatura corretta: mentre quindi la temperatura del forno di tempra è sempre costante, un rinvenimento effettuato a temperatura maggiore conferisce al materiale più tenacità, mentre se si tratta ad una temperatura minore le caratteristiche meccaniche saranno superiori.

La determinazione di tale temperatura non passa più attraverso la risoluzione delle equazioni di trasmissione del calore, ma osservando i risultati delle prove meccaniche, che sono stati raccolte al termine dei vari trattamenti termici effettuati durante tutto il periodo di tesi. Per permettere lo svolgimento delle prove meccaniche, viene trattato insieme al bombolone (nei medesimi forni e nelle medesime vasche) un anello campione, che secondo normativa deve essere significativo del trattamento avvenuto sul recipiente. Le prove meccaniche (di trazione, di resilienza e durezza) vengono effettuate quindi sull'anello, per evitare di dover danneggiare un bombolone (cosa che invece avviene con le bombole, prendendone una a campione per ogni campagna di trattamenti, a causa del minor costo delle stesse).

Le proprietà meccaniche analizzate sono:

- Carico di rottura
- Carico di snervamento
- Durezza
- Resilienza
- Allungamento %

Sebbene tutte queste proprietà meccaniche siano dipendenti dalla temperatura, si sono utilizzate soltanto le prime tre per la determinazione della temperatura ottimale: carico di rottura, carico di snervamento e durezza sono infatti strettamente correlate tra loro e dal punto di vista normativo sono le più restrittive; queste proprietà inoltre nel range di temperatura utilizzato per il rinvenimento subiscono una variazione più significativa. Le prove meccaniche campionate durante il periodo sono il risultato di trattamenti effettuati con i vecchi parametri.

I diagrammi in fig. 4.19, 4.20 e 4.21 mostrano le principali caratteristiche meccaniche al variare della temperatura per i due acciai *34CrMo4* e *27CrMo4* con cui vengono realizzati i bomboloni:

In base quindi alle caratteristiche meccaniche desiderate è stato scelto il valore di temperatura ottimale per il trattamento.

### 4.3.3 Parametro di rinvenimento

La temperatura però non è il solo parametro che influisce sulle caratteristiche meccaniche durante il rinvenimento. Seppur in maniera minore anche la durata della permanenza nel forno del bombolone influisce sul risultato delle prove meccaniche.

Per valutare contemporaneamente l'effetto di questi fattori si può utilizzare il *parametro di Hollomon - Jaffe*. È stato dimostrato che questo parametro descrive i cambiamenti della durezza (e quindi delle altre caratteristiche meccaniche ad essa direttamente correlate) al variare di tempo e temperatura. Esso è definito come:

$$P = T(k + \log t) \tag{4.9}$$

dove  $T[K]$  è la temperatura impostata per il rinvenimento,  $k$  è una costante che per gli acciai assume un valore pari a 20; infine  $t[h]$  è la durata del trattamento. Il parametro di rinvenimento è legato alla durezza del materiale

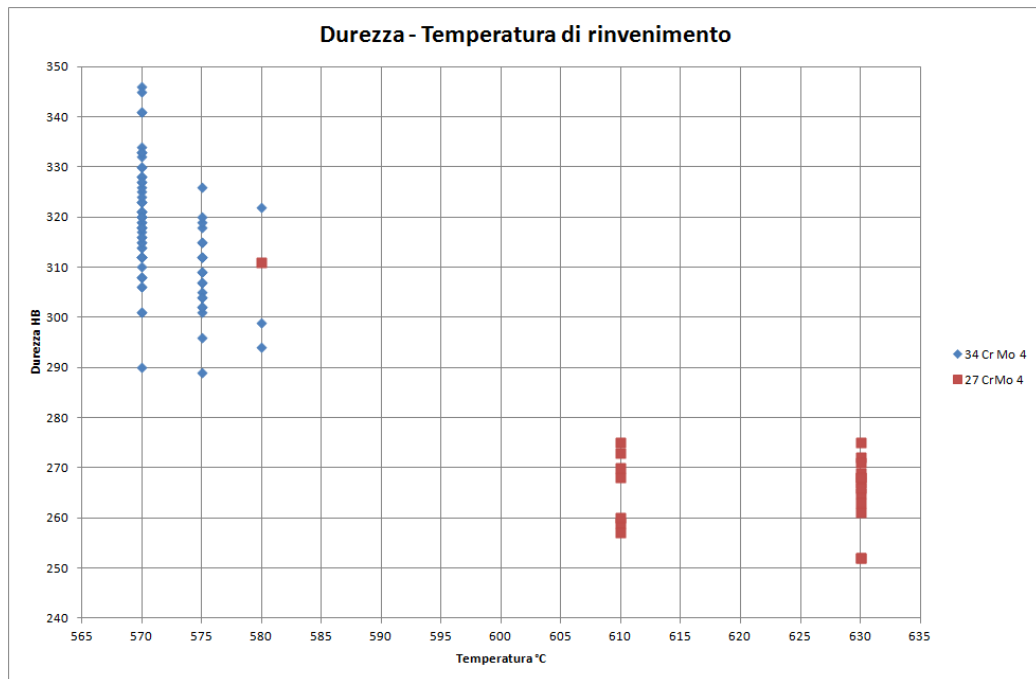


Figura 4.19: Durezza in funzione della temperatura di rinvenimento, risultati delle prove meccaniche

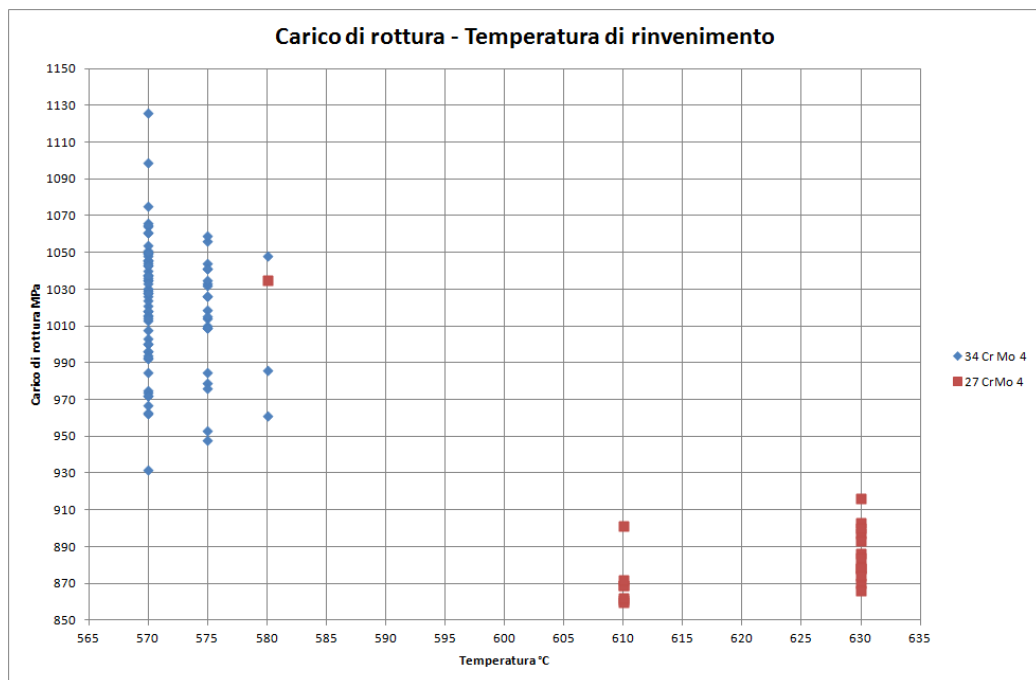


Figura 4.20: Carico di rottura in funzione della temperatura di rinvenimento, risultati delle prove meccaniche

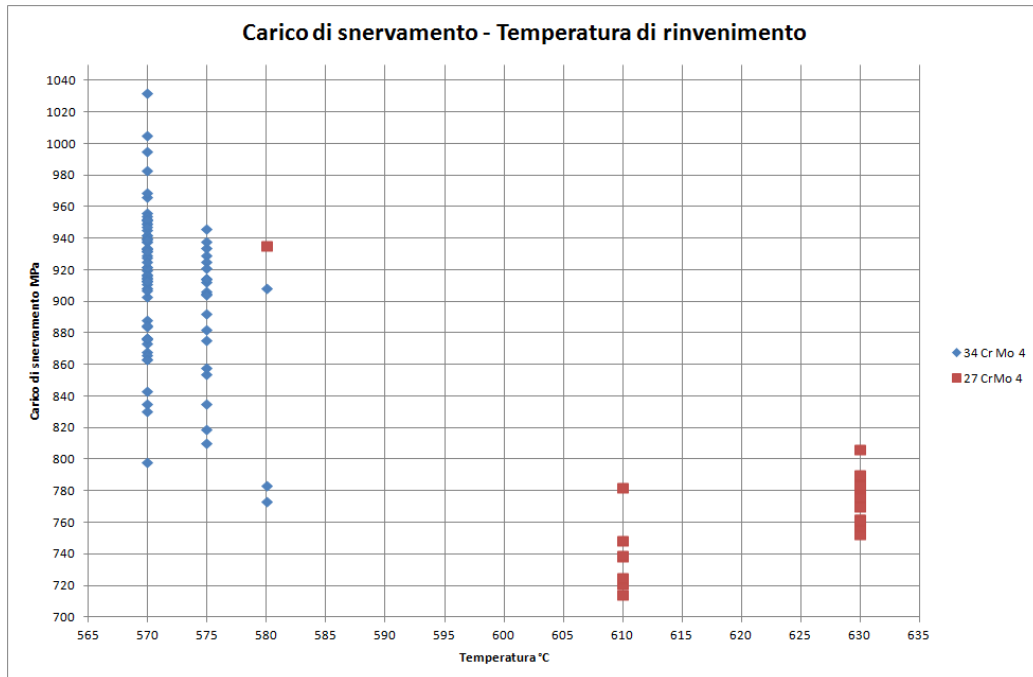


Figura 4.21: Carico di snervamento in funzione della temperatura di rinvenimento, risultati delle prove meccaniche

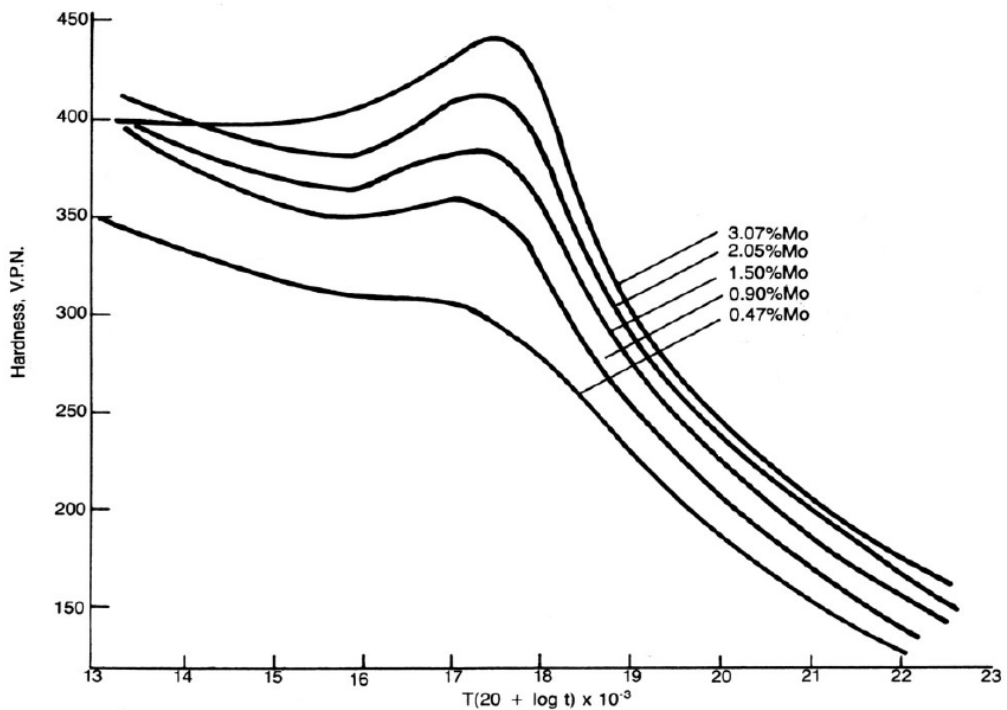


Figura 4.22: Durezza in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe

attraverso il grafico in figura 4.22. Per la determinazione della temperatura corretta è stato necessario tener conto quindi anche della durata del trattamento ricavata dalle simulazioni.

Il parametro di rinvenimento appena descritto ha permesso di effettuare delle correzioni sul valore di temperatura inserita nel database: per famiglie di bomboloni la cui durata di trattamento trovata attraverso le simulazioni, differisce in maniera importante da quella impostata in precedenza, è stato corretto il valore di temperatura in modo da mantenere costante il parametro di rinvenimento (e quindi le caratteristiche meccaniche) con i vecchi trattamenti.

**Esempio di calcolo** Famiglie di bomboloni la cui durata di trattamento individuata discostava notevolmente dal tempo utilizzato in precedenza erano per esempio quelli aventi un diametro di  $323,9\text{mm}$  e spessore di  $12,3\text{mm}$ . Il trattamento previsto per questi bomboloni è quello multiplo, 6 pezzi contemporaneamente nel forno di trattamento. I parametri utilizzati in precedenza per il rinvenimento erano i seguenti:

Diametro [mm]	323,9
Spessore [mm]	12,3
Lunghezza [mm]	1810
Snervamento [MPa]	$\geq 665$
Rottura [MPa]	$780 \leq Rm \leq 980$
Durezza [HB]	$230 \leq HB \leq 305$
<b>durata Rinv.</b>	<b>2h 30min</b>
$T_{Rinv}$ [°C]	<b>630</b>

**Tabella 4.10:** Parametri di rinvenimento utilizzati in precedenza, esempio di calcolo

Utilizzando l'eq. 4.9 si può calcolare il parametro di rinvenimento per queste condizioni di trattamento:

$$P_{old} = T_{old}(k + \log t_{old}) = 18422,4 \quad (4.10)$$

Inserendo invece la nuova durata, individuata attraverso le simulazioni e i fogli di materiale VdTüv, pari a 3h 45min, il parametro di Hollomon - Jaffe diventa (la temperatura in questo calcolo è rimasta costante rispetto al precedente):

$$P_{new} = T_{old}(k + \log t_{new}) = 18581 \quad (4.11)$$



Per mantenere il parametro di rinvenimento il più possibile vicino alle vecchie condizioni ritenute accettabili, e quindi ottenere caratteristiche meccaniche in linea ai trattamenti precedenti, è necessario correggere ora il valore di temperatura. Utilizzando un risolutore come quello di Microsoft Excel, si ricava la nuova temperatura minimizzando la differenza tra  $P_{old}$  e  $P_{new}$  mantenendo costante questa volta il tempo di trattamento. La nuova temperatura trovata è pari a 622 °C, che impostata al forno si arrotonda a 620°C.

I nuovi parametri per il trattamento termico di rinvenimento sono quindi espressi in tab. 4.11

Diametro [mm]	323,9
Spessore [mm]	12,3
Lunghezza [mm]	1810
Snervamento [MPa]	$\geq 665$
Rottura [MPa]	$780 \leq Rm \leq 980$
Durezza [HB]	$230 \leq HB \leq 305$
<b>durata Rinv.</b>	<b>3h 45min</b>
$T_{Rinv}$ [°C]	<b>620</b>

**Tabella 4.11:** Nuovi parametri di rinvenimento calcolati con il coefficiente di Hollomon-Jaffe, esempio di calcolo

La creazione del database, contenente per ogni tipo di bombolone, tempi e temperature di trattamento, è stata terminata all'inizio del mese di luglio 2012, ma in quanto know-how aziendale è stato possibile pubblicarne solo una parte nella presente tesi (tab. 4.12). Nella tabella, tutte le dimensioni ( $L$ ,  $s$ ,  $D$ ) sono in [mm], mentre le temperature sono in [°C]

$D$	$s$	$L$	$Acc.$	$Tipo TRT$	Tempra		Rinv.	
					$T$	$t$	$T$	$t$
323.9	12.3	3255	27CrMo4	x 6	880	2h 30m	620	3h 45m
355.6	14	5729	34CrMo4	x 6	880	2h	575	4h
419	18.5	4356	27CrMo4	x 4	880	3h 15m	605	4h 45m
470	30.3	9900	27CrMo4	singolo	880	3h 15m	570	4h 15m
508	22	4930	34CrMo4	doppio	880	2h 10m	575	2h 45m
559	23	1700	27CrMo4	singolo	880	2h 55m	625	4h
559	15.7	5050	34CrMo4	doppio	880	1h 45m	570	2h 30m
610	18.8	6975	34CrMo4	singolo	880	1h 30m	575	2h
622	19.1	9400	27CrMo4	doppio	880	2h 45m	625	3h 30m
622	25.3	5800	34CrMo4	singolo	880	2h	570	2h 45m

**Tabella 4.12:** *Parte del database dei parametri di trattamento termico per tutti i bomboloni*

## Capitolo 5

# Confronto con prova sperimentale

Venerdì 20 luglio 2012 è stata effettuata una prova sperimentale, in cui veniva monitorato il trattamento termico di bonifica in doppio eseguito nei forni a pozzo verticali. Lo scopo della prova, attraverso la misurazione della temperatura del bombolone, è stato quello di:

- Verificare la bontà del Modello 2D della sezione trasversale del trattamento in doppio implementata attraverso Comsol Multiphysics (fig. 4.4);
- Monitorare la temperatura nella zona meno irraggiata dal forno, vale a dire la zona tra i due bomboloni;
- Assicurare un trattamento omogeneo su tutte le parti dei bomboloni (corpo e ogive);
- Verificare che il trattamento venga eseguito nella stessa maniera su entrambi i bomboloni;
- Assicurarsi che il trattamento eseguito sull'anello campione sia indice del trattamento eseguito sui bomboloni;

I bomboloni utilizzati per la prova strumentata sono degli avanzi di un lotto già lavorato e trattato in passato: tuttavia questo fatto non è un problema per il monitoraggio della temperatura durante il trattamento termico. L'anello campione che verrà inserito nel forno come testimone dell'intero trattamento non è stato invece bonificato precedentemente, pertanto può essere utile per

ricavare le caratteristiche meccaniche del materiale a fine trattamento.

La misurazione della temperatura sul corpo del bombolone durante il trattamento verrà effettuata mediante l'utilizzo di termocoppie.

I bomboloni da trattare sono raffigurati in fig. 5.1, mentre le specifiche e le caratteristiche meccaniche richieste sono riportate in tab. 5.1.

S [mm]	D [mm]	L [mm]	Acciaio
25,7	559	8920	34 CrMo4
$R_{s,min}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]		Range Durezza [HB]
730	$950 \leq R_m \leq 1100$		274 - 334

**Tabella 5.1:** Specifiche dei bomboloni della prova strumentata



**Figura 5.1:** Bomboloni per la prova strumentata

Con riferimento alla mappa dell'impianto (fig. 1.16) il bombolone con le termocoppie già installate verrà preparato al trattamento nella *loading/unloading area*, dove verrà agganciato alla struttura in doppio. Seguirà il trattamento di alta temperatura nel forno V3. Al termine di questa fase il bombolone verrà raffreddato velocemente nella *quenching pool*, vasca di tempra contenente acqua e polimeri. Successivamente passerà nella *washing pool* per un breve periodo di tempo per permettere il lavaggio del liquido temprante dal bombolone. Infine subirà il rinvenimento nel forno V4, per poi raffreddare in aria calma sospeso al paranco del carroponte. Non è stato possibile far

raffreddare il bombolone nei pozzi *cooling well* date le dimensioni troppo elevate dei due bomboloni rispetto al tiro del carro ponte.

## 5.1 Preparazione della prova sperimentale

I bomboloni da trattare sono stati individuati, insieme all'anello campione, nel magazzino e sono stati preparati al trattamento eseguendo una prima operazione di lavorazione dei bocchelli, per permettere l'aggancio dei recipienti alla struttura per il trattamento in doppio attraverso delle cravatte calzate sulla scanalatura creata.



**Figura 5.2:** Tornitura dei bocchelli



**Figura 5.3:** Cravatta per fissaggio dei bomboloni alla struttura di trattamento in doppio

Questa è un'operazione da effettuare prima del posizionamento delle termocoppie, perché altrimenti in fase di tornitura i cavi per la misurazione della temperatura interferirebbero con la macchina a controllo numerico.

La misura della temperatura viene effettuata, come per le prove eseguite nel 2008, attraverso delle termocoppie di tipo K, adatte ad un campo di temperatura che varia da  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1260^{\circ}\text{C}$  circa. Le termocoppie sono lunghe  $50\text{m}$  per permettere un'agevole movimentazione del bombolone senza avere strattoni per effetto dei cavi. Sono state utilizzate 10 termocoppie poste su entrambi i bomboloni e sull'anello campione.

La fig. 5.4 presenta lo schema di posizionamento delle termocoppie e sarà utilizzata come riferimento quando verranno descritti i risultati della prova. Questa figura mostra inoltre la configurazione di carico del forno utilizzata per il trattamento, vale a dire due bomboloni affiancati, ad una distanza di circa  $800\text{mm}$  tra gli assi e l'anello campione nel mezzo, davanti ai due corpi,

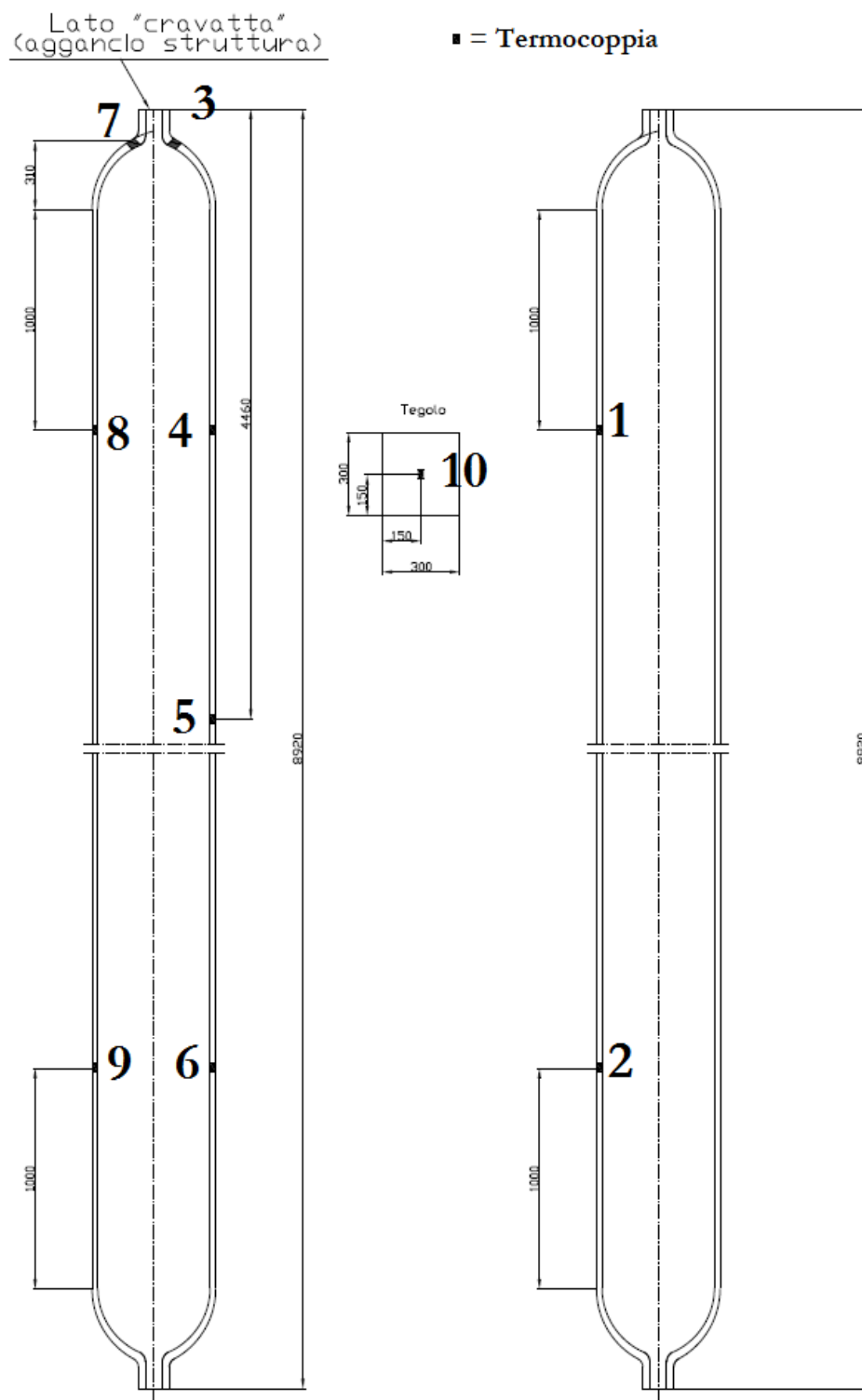
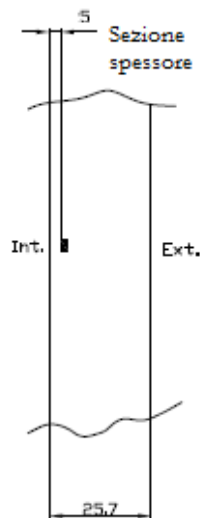


Figura 5.4: Posizione termocoppie per la prova strumentata

in modo tale da interferire il meno possibile durante il processo.

Tutte le termocoppie sono state posizionate all'interno dello spessore, a circa  $5\text{mm}$  dalla parete interna (fig. 5.5 e 5.6): questo perché tra parete interna ed esterna non ci sono differenze significative di temperatura come si era potuto vedere sia dalla prova strumentata del 2008 che dalle successive simulazioni. Inoltre così facendo le termocoppie non risentono del diretto irraggiamento del forno, che potrebbe portare a valori errati della temperatura.



**Figura 5.5:** Fori per il posizionamento delle termocoppie nello spessore del bombolone

**Figura 5.6:** Posizione termocoppie nello spessore, in prossimità del diametro interno

La posizione e la distribuzione delle varie termocoppie sui bomboloni e sull'anello campione sono state determinate in base agli obiettivi della prova:

- 7 termocoppie sul primo bombolone (dalla n° 3 alla n° 9 di fig. 5.4). Questa decisione è stata presa per monitorare le differenze tra la zona interna più vicina all'altro bombolone, e quindi meno irraggiata, e la zona esterna più vicina alle resistenze ed alla parete del forno; l'altro obiettivo, con questo posizionamento è quello di capire le differenze tra la temperatura dell'ogiva e quella del corpo; infine per verificare che non vi siano differenze fra il trattamento della parte bassa del bombolone e la parte alta;
- 2 termocoppie sul secondo bombolone (dalla n° 1 alla n° 2 di fig. 5.4) per garantire che il trattamento venga effettuato su entrambi i bomboloni nella stessa maniera.

- 1 termocoppia sull'anello (o tegolo) campione (la n° 10 di fig. 5.4), che verrà appeso mediante una catena alla struttura di trattamento in doppio: questa termocoppia servirà per verificare se l'anello è un buono stimatore del trattamento effettuato sui bomboloni, controllando le differenze di temperatura che vi sono tra i due. Servirà inoltre per stabilire se la posizione scelta dall'anello durante il trattamento è quella che garantisce un trattamento omogeneo tra i 3 corpi presenti nel forno.

Dopo aver preparato i bocchelli dei bomboloni e individuato la posizione ottimale delle termocoppie, si è passati al fissaggio delle termocoppie stesse. Questa operazione è necessaria per garantire il continuo contatto tra la testa della termocoppia e il bombolone: è allo stesso tempo un'operazione delicata perché non possono essere saldate direttamente al corpo del bombolone in quanto questo collegamento potrebbe alterare i risultati delle misurazioni.

Si riportano le fasi della preparazione delle termocoppie sul bombolone:

1. Individuazione della posizione delle termocoppie sul bombolone in base ai riferimenti di fig.5.4 e preparazione della zona per il taglio dei tegoli (fig. 5.7);



**Figura 5.7:** *Individuazione della posizione delle termocoppie sul bombolone*

2. Taglio dei tegoli su cui verranno poi fissate le termocoppie, e identificazione degli stessi attraverso i relativi numeri: questa operazione è



stata necessaria in quanto non è possibile raggiungere il diametro interno direttamente dall'esterno date le dimensioni elevate del bombolone (fig. 5.8).



**Figura 5.8:** *Taglio dei tegoli*

3. Viene effettuato un foro sulla superficie interna del tegolo tagliato (già mostrato in fig.5.5); questo per poter inserire le termocoppie all'interno dello spessore e per poterle fissare.
4. Parte delle matasse di cavi delle termocoppie viene srotolata e inserita nel bombolone per il fissaggio (fig. 5.9);
5. La parte terminale delle termocoppie (la testa) viene modellata e inserita nel foro appena preparato (fig. 5.10);
6. Per evitare il distacco delle termocoppie dal corpo del bombolone durante la prova è necessario fissarle attraverso un supporto saldato creato appositamente per questo caso di studio. Come detto in precedenza è importante non saldare le termocoppie per non avere alterazione nei dati da campionare (fig. 5.11);
7. Le termocoppie vengono numerate in base alle indicazioni di fig.5.4: tale numero sarà necessario per identificare anche il canale di acquisizione dei dati durante il trattamento e per visualizzare in seguito i risultati (fig. 5.12);



**Figura 5.9:** *Inserimento termocoppie all'interno del bombolone*



**Figura 5.10:** *Posizionamento delle termocoppie*



Figura 5.11: Fissaggio termocoppie con un supporto saldato al bambolone

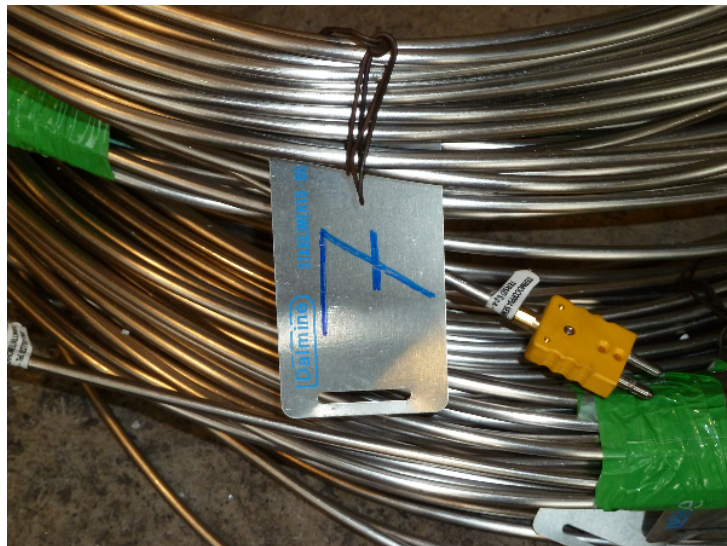


Figura 5.12: Identificazione termocoppie

8. I tegoli vengono di nuovo saldati con del materiale di apporto (sempre acciaio) nella loro sede sul bombolone (fig. 5.13).



**Figura 5.13:** Saldatura dei tegoli nella loro posizione originaria

9. Infine è avvenuto il fissaggio delle termocoppie sull'anello campione: essendo il diametro interno facilmente accessibile non c'è stato bisogno di tagliare un tegolo, ma semplicemente è stata inserita la termocoppia nel foro e ancorata al supporto. Sull'anello sono stati effettuati anche due fori per permettere il passaggio della catena necessaria ad agganciarlo alla struttura di trattamento.

Il giorno della prova, il 20 luglio 2012, i bomboloni sono stati trasferiti dall'officina meccanica (dove era avvenuta l'installazione delle termocoppie) all'impianto per il trattamento termico, per procedere alle successive fasi di preparazione prima del trattamento vero e proprio.

Dopo aver posizionato i bomboloni nella *loading/unloading area* è stato necessario srotolare le matasse delle termocoppie e legare i vari cavi assieme, in modo tale da rendere più semplice la movimentazione: questa operazione è durata circa un paio d'ore (fig. 5.14 e fig. 5.15).

Successivamente le termocoppie sono state collegate al registratore attraverso la propria spina di collegamento e fissate mediante del filo di ferro in modo tale da assicurare il costante accoppiamento e non avere distacco dei cavi dal registratore durante la prova (fig. 5.16).

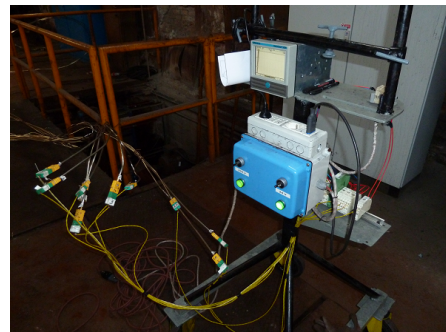
Il registratore permette l'acquisizione del segnale delle termocoppie: riceve in ingresso i 10 segnali delle termocoppie in Volt. I dati in ingresso vengono



**Figura 5.14:** *Matasse delle termocoppie da srotolare*



**Figura 5.15:** Preparazione dei cavi delle termocoppie



**Figura 5.16:** Collegamento delle termocoppie al registratore

trasformati in milliampere grazie ad un convertitore, e successivamente riscaldati attraverso un coefficiente moltiplicativo. Viene visualizzata così a display la temperatura in °C. Il  $\Delta t$  di campionamento è pari a 1 s, tempo più che sufficiente per visualizzare le variazioni di temperatura viste le dimensioni dell'oggetto da riscaldare.

Dopo aver collegato correttamente le termocoppie, il bombolone è stato agganciato alla struttura come avviene per tutti i trattamenti effettuati per la produzione. Per eseguire questa operazione viene utilizzata la struttura per il trattamento in doppio (fig. 4.1). Attraverso dei perni, bloccati con del filo di ferro, il bombolone viene fissato alla struttura in acciaio. L'anello campione, viene invece collegato alla struttura attraverso una catena ad anelli, e posizionato tra i 2 bomboloni (fig. 5.17 e fig. 5.18).



**Figura 5.17:** *Collegamento bombolone - struttura per il trattamento in doppio*

A questo punto il bombolone e l'anello sono pronti per effettuare la prova di trattamento in doppio.

## 5.2 Risultati della prova sperimentale

La prova strumentata è iniziata alle 12:05 e terminata alle 19:41 per un totale di 7h e 36min. I parametri impostati al forno per il trattamento termico (tab. 5.2) sono stati ricavati dal database creato attraverso le simulazioni per



**Figura 5.18:** Configurazione di trattamento in doppio

il bombolone in esame (l'esempio di calcolo effettuato nella sez. 4.3 riguarda proprio questo tipo di bombolone).

Trattamento	Temperatura	Tempo
Tempra	2h 20m	880°C
Rinvenimento	3h 15m	570°C

**Tabella 5.2:** Parametri del trattamento di bonifica per la prova strumentata in doppio

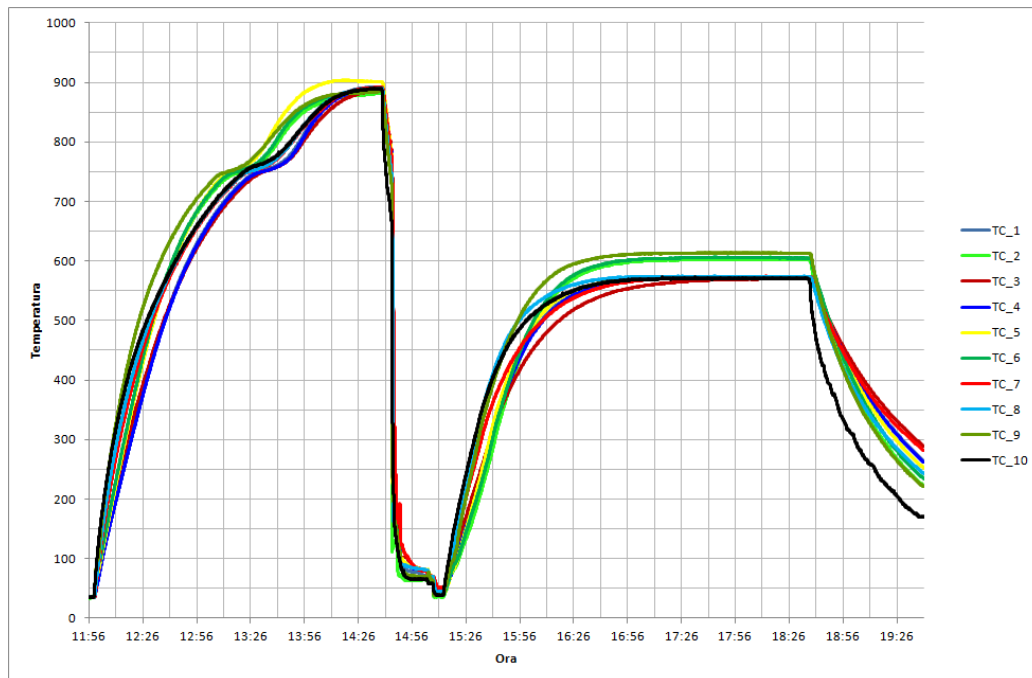
Il trattamento effettuato è stato quello di bonifica e durante la prova non si sono riscontrati problemi per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, pertanto il registratore è stato in grado di campionare i dati per tutta la durata del trattamento. Le fasi principali del trattamento sono state 4 (riassunto in tab. 5.3 e andamento della temperatura rappresentato in fig. 5.19:

1. Il bombolone è stato inserito nel forno V3 di alta temperatura alle 12:00 ed estratto alle 14:40;
2. La fase di tempra è durata dalle 14:40 alle 15:13, compresa di brusco raffreddamento in acqua e polimeri seguita dal lavaggio;
3. Il rinvenimento ha avuto inizio alla fine del lavaggio ed è terminato alle 18:38;

4. L'ultima fase di raffreddamento ha avuto inizio dopo il rinvenimento ed è stata terminata alle 19:41, quando la temperatura del bombolone è scesa al di sotto dei 250°C. Al termine di questa fase è terminato anche il campionamento.

Fase	Inizio	Fine	Durata
Austenitizzazione	12:00	14:40	2h 40m
Tempra in acqua e polimeri	14:41	15:09	28m
Lavaggio	15:10	15:12	2m
Rinvenimento	15:13	18:37	3h 24m
Raffreddamento in aria	18:38	19:41	1h 3m

**Tabella 5.3:** Prova strumentata, sintesi delle singole fasi



**Figura 5.19:** Prova strumentata, andamento della temperatura durante tutto il trattamento

Si distinguono in maniera netta le 4 fasi del trattamento.

Vediamo ora in dettaglio la fase di austenitizzazione fig. 5.20 e la fase di rinvenimento fig. 5.21: Si riportano inoltre in fig. 5.22 e 5.23 i dati ricavati dalle termocoppie che misurano la temperatura dell'aria del forno durante le due fasi:



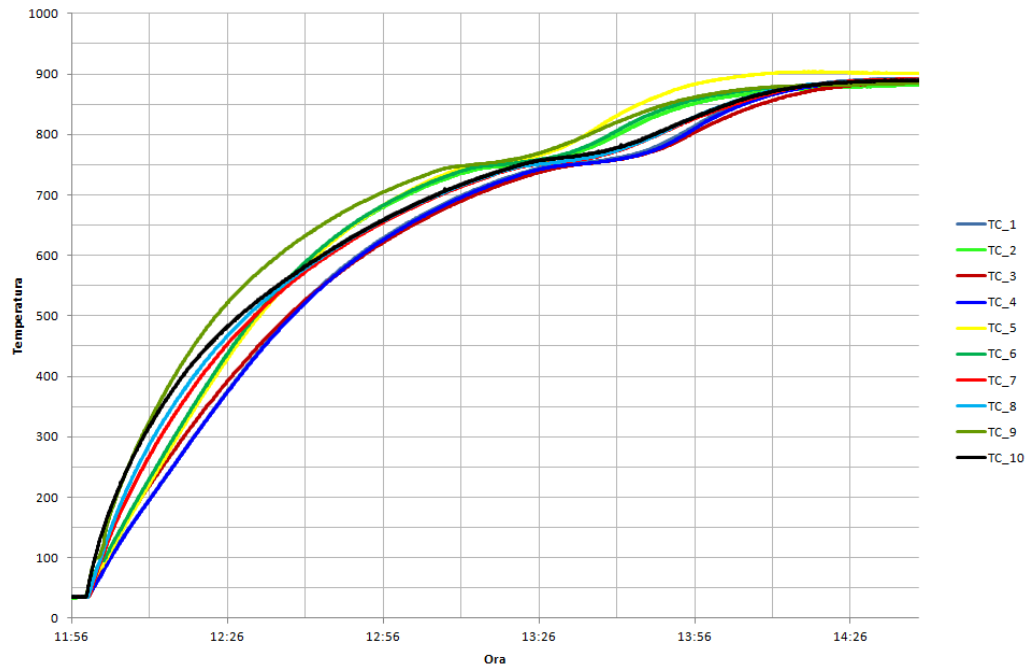


Figura 5.20: Prova strumentata, dettaglio della fase di austenitizzazione

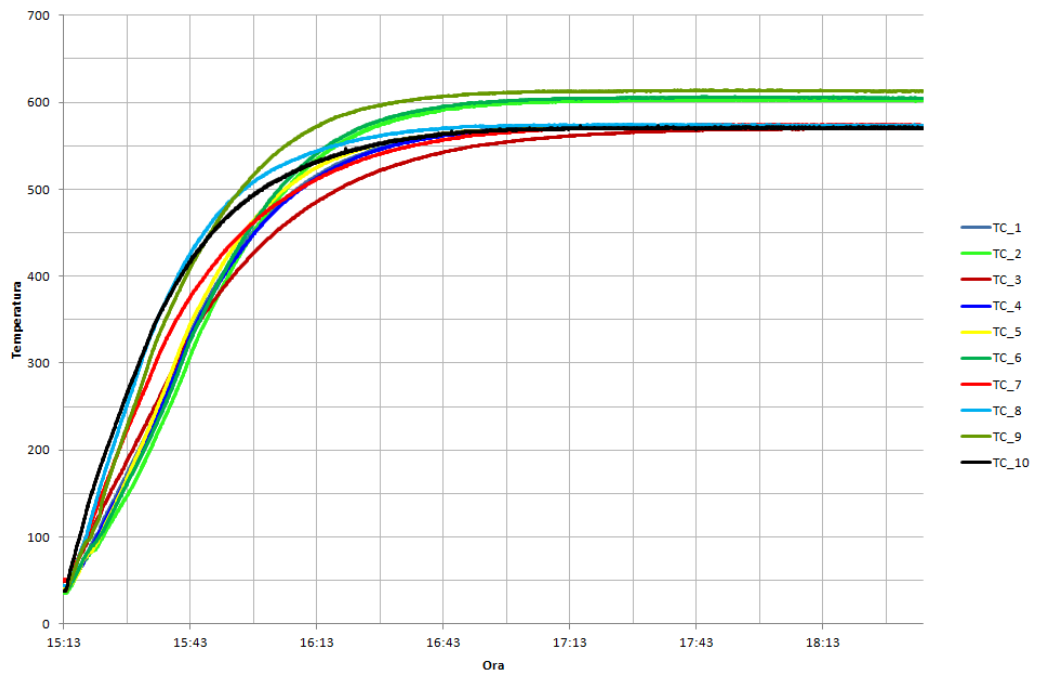


Figura 5.21: Prova strumentata, dettaglio della fase di rinvenimento

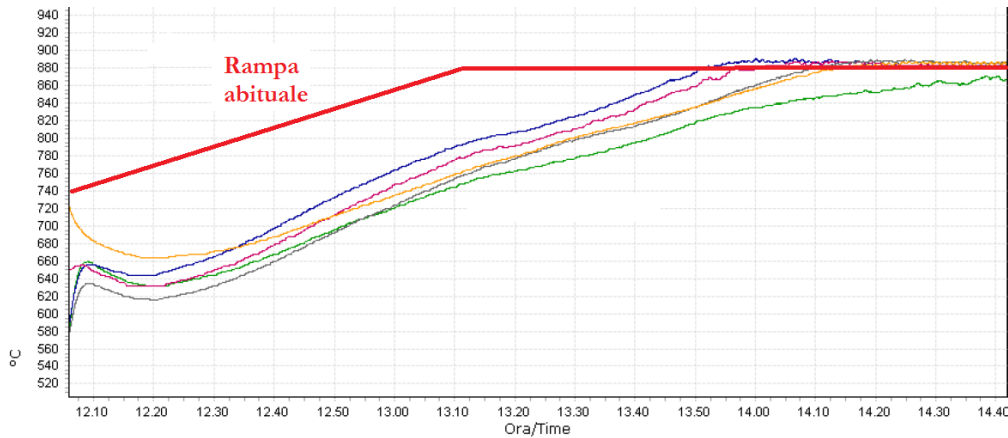
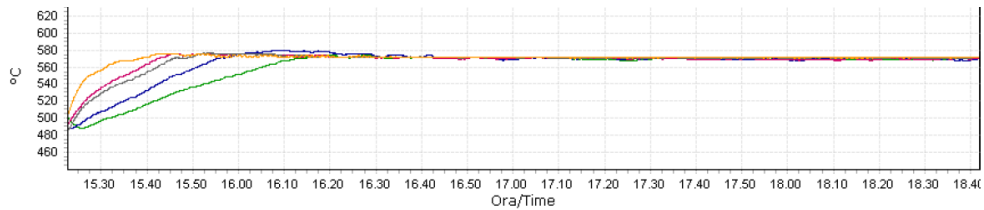


Figura 5.22: Temperatura del forno V3 durante il trattamento di austenitizzazione

**Considerazioni Generali** In fase di austenitizzazione tutte le parti del bombolone, anche quelle più spesse e anche l'anello, sono riuscite a raggiungere la temperatura di trattamento. Per far sì che questo accadesse è stato però necessario prolungare il trattamento di 20 minuti rispetto ai parametri impostati inizialmente. È stata presa questa decisione perché in fase di caricamento il forno è stato aperto per molto più tempo rispetto a quanto accade solitamente, per permettere agli operatori di movimentare correttamente i cavi delle termocoppie, e questo ha fatto sì che la temperatura all'interno del forno scendesse di molto, fino addirittura a  $640^{\circ}\text{C}$ . Questo fatto ha causato quindi un rallentamento della rampa del forno per arrivare agli  $880^{\circ}\text{C}$  impostati e quindi anche il bombolone ha risentito di questo ritardo. In fig. 5.22 si può notare come solitamente la rampa duri poco più di un'ora, mentre quella per il trattamento in esame è durata ben 2 ore, e inoltre una delle zone del forno non è arrivata nemmeno in temperatura.

Un'ulteriore considerazione da fare su questa fase del trattamento è quella che intorno alla temperatura di  $750^{\circ}\text{C}$  tutte le termocoppie presentano un flesso, indice che la temperatura è rimasta costante per circa 10/15 minuti. Questo fatto è dovuto al calore latente di trasformazione di fase del ferro: a quelle temperature infatti la ferrite  $\alpha$  inizia a trasformarsi in austenite  $\gamma$ , ed essendo endotermica, la trasformazione richiede calore, pertanto la temperatura del bombolone rimane per un periodo costante, per poi crescere quanto tutta la ferrite si è trasformata in austenite.

Questo fenomeno è confermato anche dalla temperatura del forno: alla medesima ora (intorno alle 13:20) anche le termocoppie che misurano l'aria del forno segnalano un flesso appena accennato.



**Figura 5.23:** *Temperatura del forno V4 durante il trattamento di rinvenimento*

Il trattamento di rinvenimento è avvenuto senza particolari problemi di carattere pratico per quanto riguarda il caricamento del forno, e la rampa come al solito ha occupato un tempo minimo rispetto alla durata totale del trattamento (fig. 5.23):

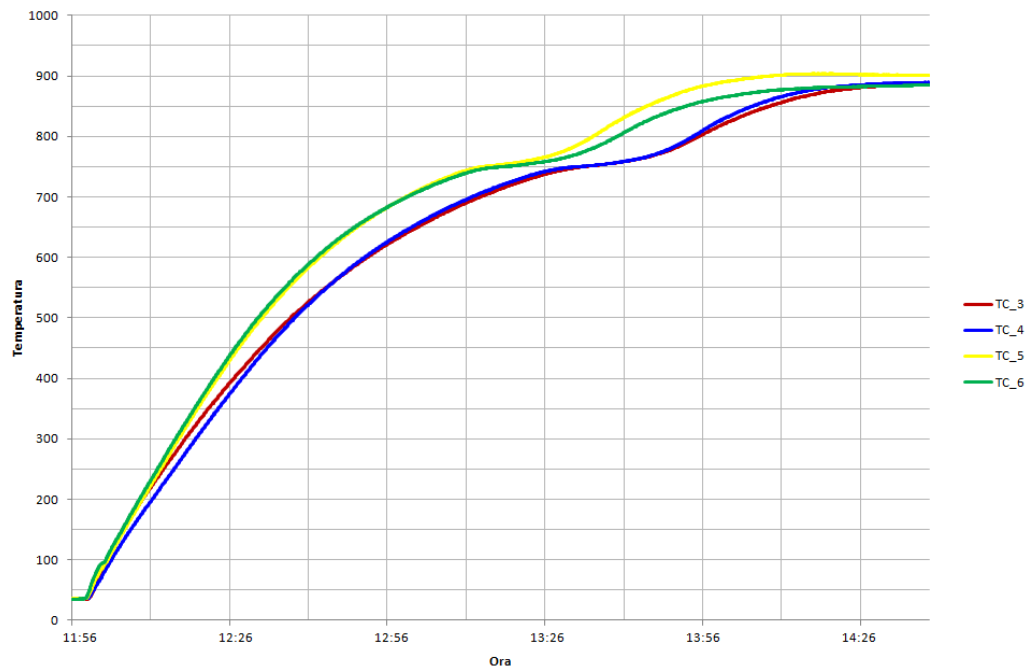
Tutte le parti del bombolone, compreso l'anello campione, hanno raggiunto la temperatura di trattamento di 570°C e hanno mantenuto tale temperatura secondo quanto prescrive la normativa in maniera corretta.

Da segnalare un'incoerenza tra la misura delle termocoppie del forno e quelle sulla parte bassa del bombolone: le termocoppie 2, 6 e 9, che sono state fissate nella parte bassa del bombolone (in riferimento alla fig. 5.4) segnano una temperatura differente di circa 35/40°C rispetto a quella misurata della termocoppie del forno. Questo fatto è causato da un'errata taratura delle termocoppie del forno della zona bassa in particolare, infatti sia per le altre zone, che per il trattamento di austenitizzazione, la temperatura campionata è coerente con quella del bombolone; ciò permette di escludere un problema connesso alle termocoppie e/o al sistema di acquisizione dati.

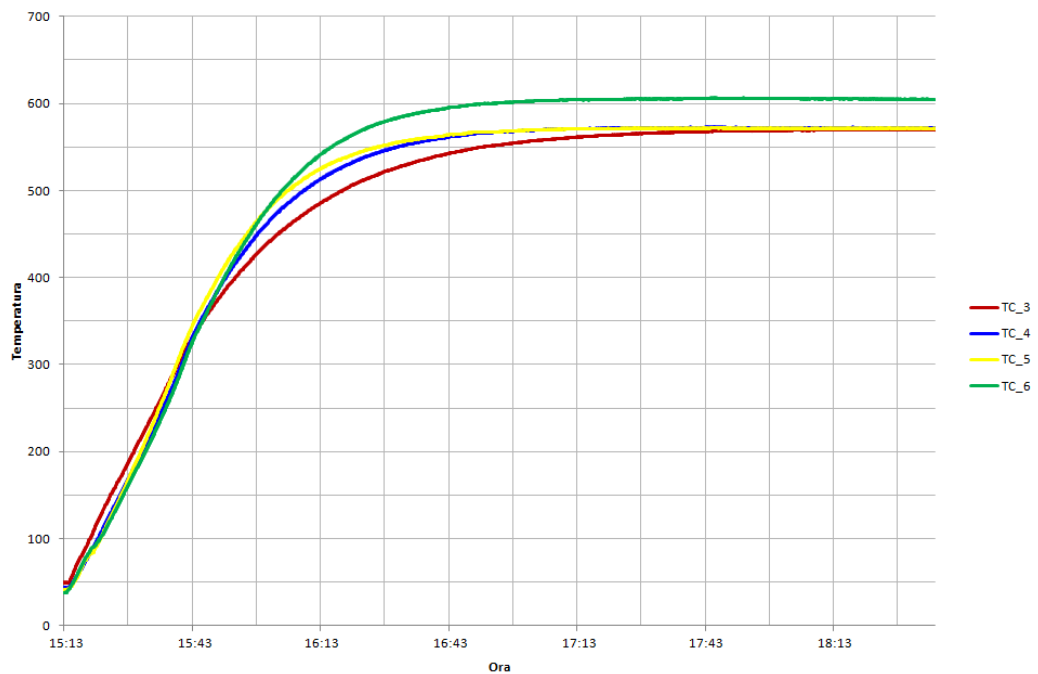
**Considerazioni in base agli obiettivi della prova** Uno degli obiettivi della prova è quello di verificare che il trattamento venisse eseguito in maniera omogenea sul bombolone. Per verificare questo è possibile osservare le termocoppie 3, 4, 5, 6 (vedi fig. 5.4) per entrambe le fasi di riscaldamento (fig. 5.24 e fig. 5.25).

Il riscaldamento è pressoché omogeneo su tutte le parti del bombolone, a meno dell'errata taratura delle termocoppie del forno di rinvenimento. In modo particolare, nel forno di alta temperatura la zona alta sembrerebbe arrivare dopo in temperatura ( $TC_4$ , rispetto a  $TC_5$  e  $TC_6$ ), mentre nella parte bassa non vi sono grosse differenze tra le varie zone se non fosse per l'errata taratura delle termocoppie del forno che fanno crescere in modo anomalo la  $TC_6$ . L'ogiva arriva dopo in temperatura perché possiede uno spessore maggiore rispetto alle altre parti del corpo del bombolone.

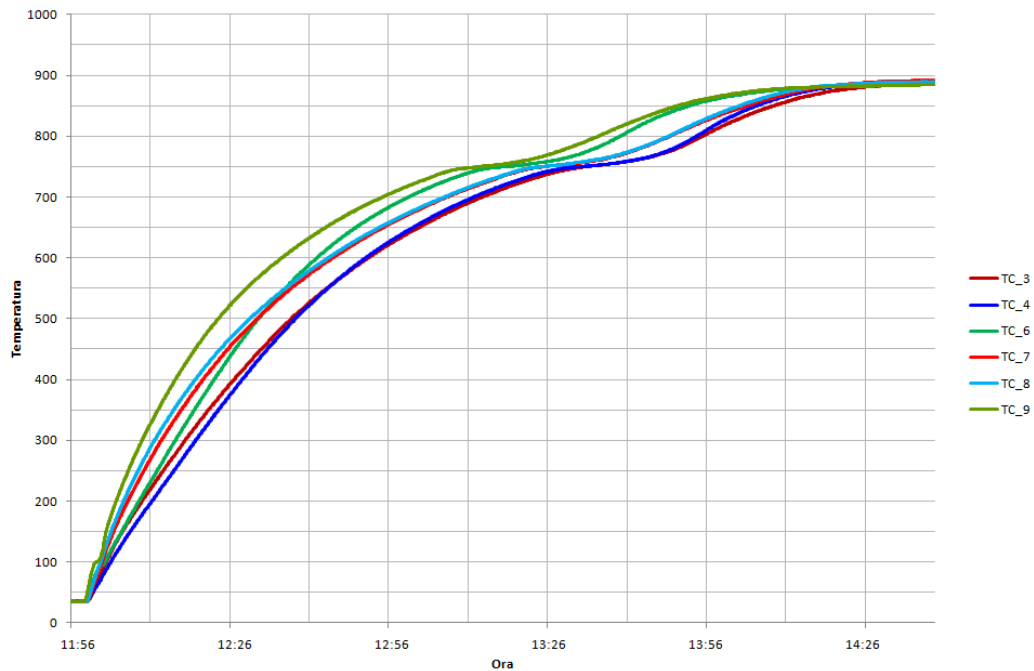
Si può concludere che il trattamento è comunque omogeneo su tutte le parti



**Figura 5.24:** Temperature a confronto tra le varie parti del bombolone durante l'austenitizzazione



**Figura 5.25:** Temperature a confronto tra le varie parti del bombolone durante il rinvenimento



**Figura 5.26:** Temperature a confronto tra zona più o meno irraggiata del bombolone durante l'austenitizzazione

del bombolone per entrambi i trattamenti.

Sul singolo bombolone è possibile controllare le differenze tra la zona più vicina all'altro bombolone e quella diametralmente opposta, per verificare cosa accade nella zona meno irraggiata (fig. 5.26 e fig. 5.27). Questo confronto si esegue attraverso i dati delle termocoppie  $TC_8$  e  $TC_4$  nella parte alta, delle  $TC_9$  e  $TC_6$  nella parte bassa e delle  $TC_7$  e  $TC_3$  nell'ogiva, sempre per entrambi i trattamenti. Per tutti i confronti considerati, la zona esterna più irraggiata, com'era prevedibile, arriva in temperatura prima della zona interna affacciata al secondo bombolone. La differenza è di circa una ventina di minuti tra interno ed esterno.

Un altro obiettivo era quello di verificare che entrambi i bomboloni subissero lo stesso trattamento, e per verificare questo si sono posizionate due termocoppie anche sul secondo bombolone ( $TC_1$  e  $TC_2$ ). I dati ricavati da queste termocoppie possono essere confrontati con le termocoppie ad esse simmetriche sul primo bombolone (rispettivamente  $TC_4$  e  $TC_6$ ) e i risultati sono riportati nelle fig. 5.28 e fig. 5.29:

La simmetria è perfettamente rispettata, il che significa che il trattamento avviene in maniera identica sui due bomboloni. L'andamento della temperatura sembra essere quasi coincidente per le termocoppie a confronto. Nella fase di rinvenimento viene ancora evidenziato il problema della termocoppia

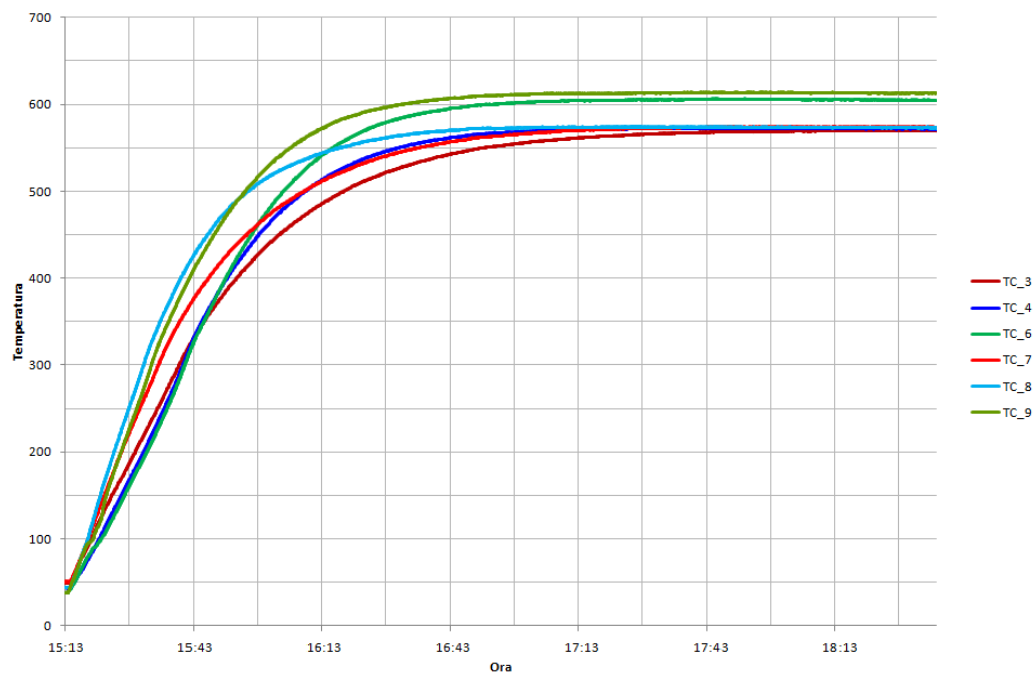


Figura 5.27: Temperature a confronto tra la zona più irraggiata e meno irraggiata del bombolone durante il rinvenimento

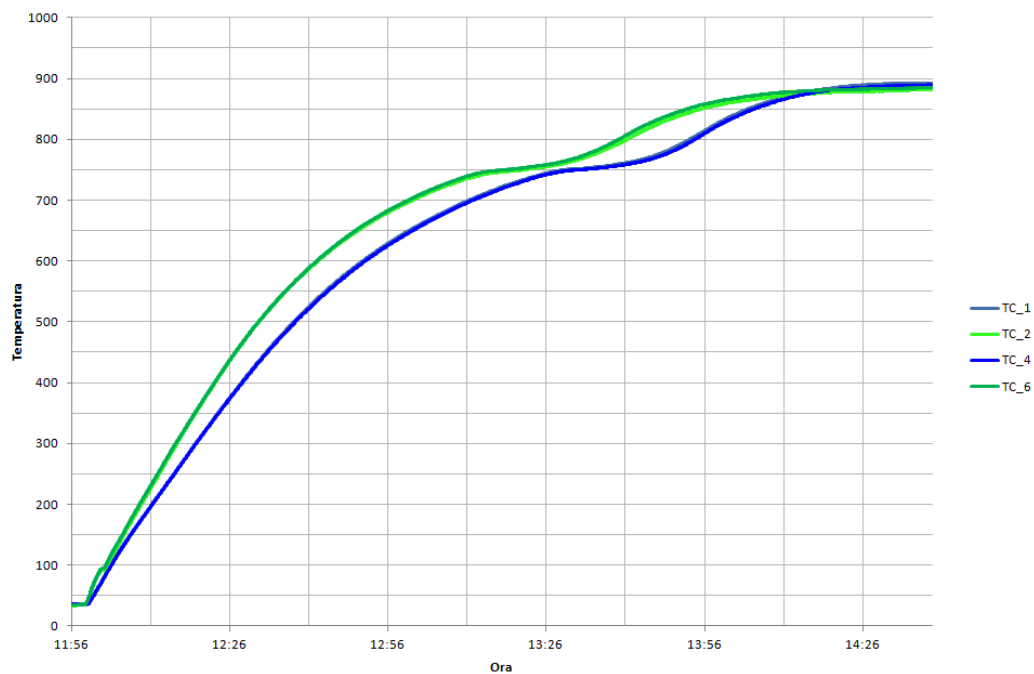
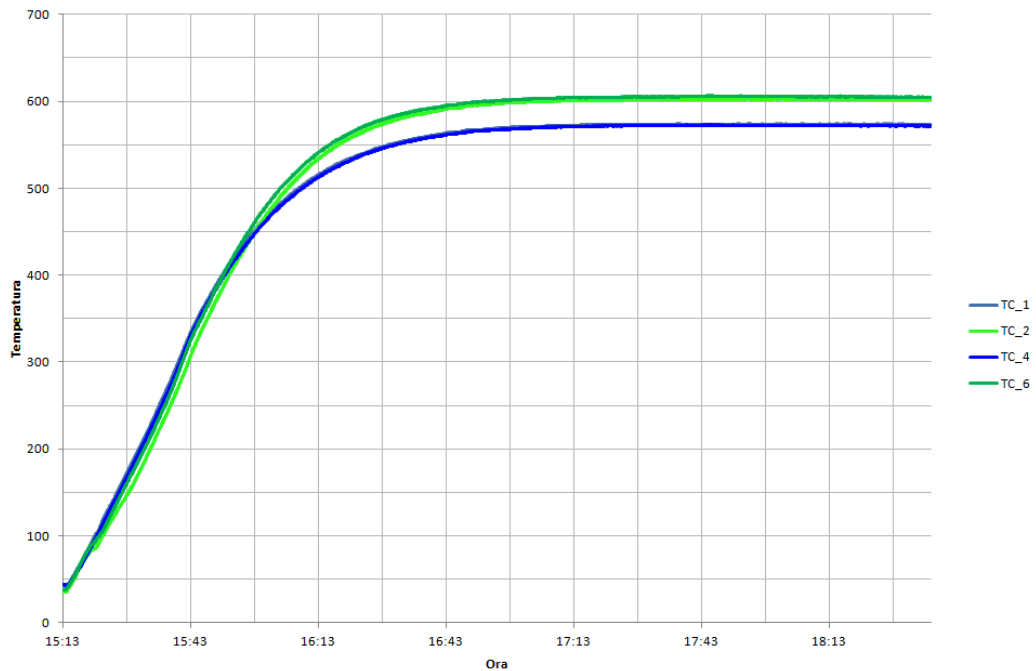


Figura 5.28: Temperature a confronto tra i due bomboloni durante l'austenitizzazione



**Figura 5.29:** *Temperature a confronto tra i due bomboloni durante il rinvenimento*

del forno della parte bassa che non è tarata correttamente.

Per completezza vengono riportati i diagrammi delle altre due fasi di trattamento, la tempra in acqua quench e il raffreddamento in aria calma alla temperatura ambiente.

Per quanto riguarda la fase di tempra (fig. 5.30) si può affermare che è passato parecchio tempo prima che il bombolone finisse nella vasca di raffreddamento, questo perché sempre a causa dei cavi delle termocoppie, la movimentazione è stata particolarmente complicata. Una volta inserito il bombolone nella vasca di tempra il raffreddamento è avvenuto in maniera omogenea.

Un fenomeno particolarmente interessante è accaduto sull'ogiva, testimoniato dalle termocoppie 3 e 7: inizialmente il bombolone si raffredda in maniera omogenea in tutti i punti monitorati dalle termocoppie, mentre ad un certo punto avviene la formazione di bolle di vapore all'interno del bombolone per effetto dell'ebollizione dell'acqua di tempra all'interno del recipiente che, essendo all'interno non può essere incanalata nel circuito di raffreddamento. Queste bolle ristagnano a cavallo dell'ogiva, la quale per inerzia termica si riscalda leggermente per poi ritornare a raffreddarsi una volta che il vapore è fuoriuscito dal bocchello.

Per quanto riguarda la fase di raffreddamento (fig. 5.31) non vi è nulla

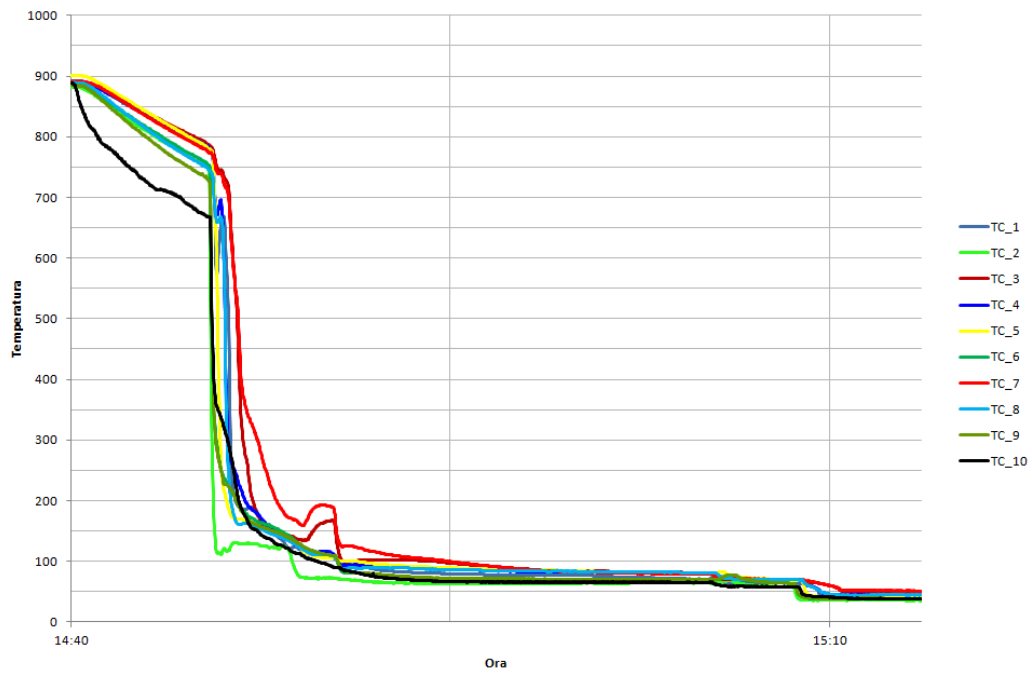


Figura 5.30: Temperatura durante la fase di tempra in acqua quench

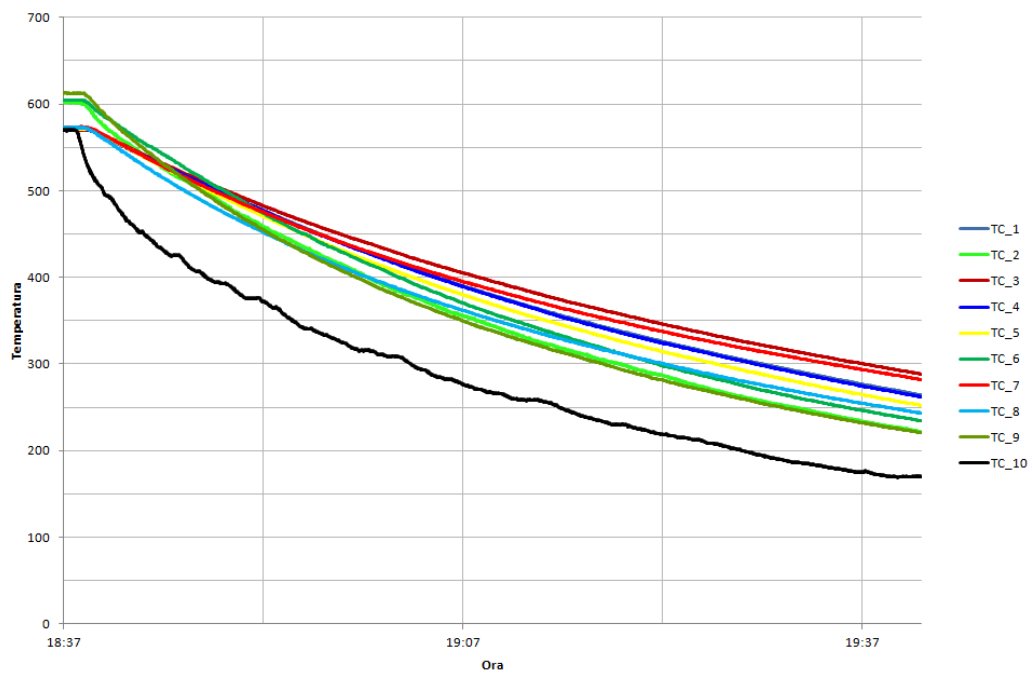


Figura 5.31: Temperatura durante la fase di raffreddamento in aria



da segnalare, se non il tempo impiegato dal pezzo per scendere interamente sotto la temperatura di 250°C. Sotto tale temperatura non può più avvenire la trasformazione martensitica e quindi è possibile raffreddare in acqua più velocemente fino a temperatura ambiente per migliorare la produttività e la sicurezza. Il tempo impiegato per arrivare al di sotto di tale temperatura è stato di circa 1h, pertanto in base a questo saranno stilate nuove procedure per gli operatori di trattamento.

### 5.3 Confronto simulazioni con risultati sperimentali

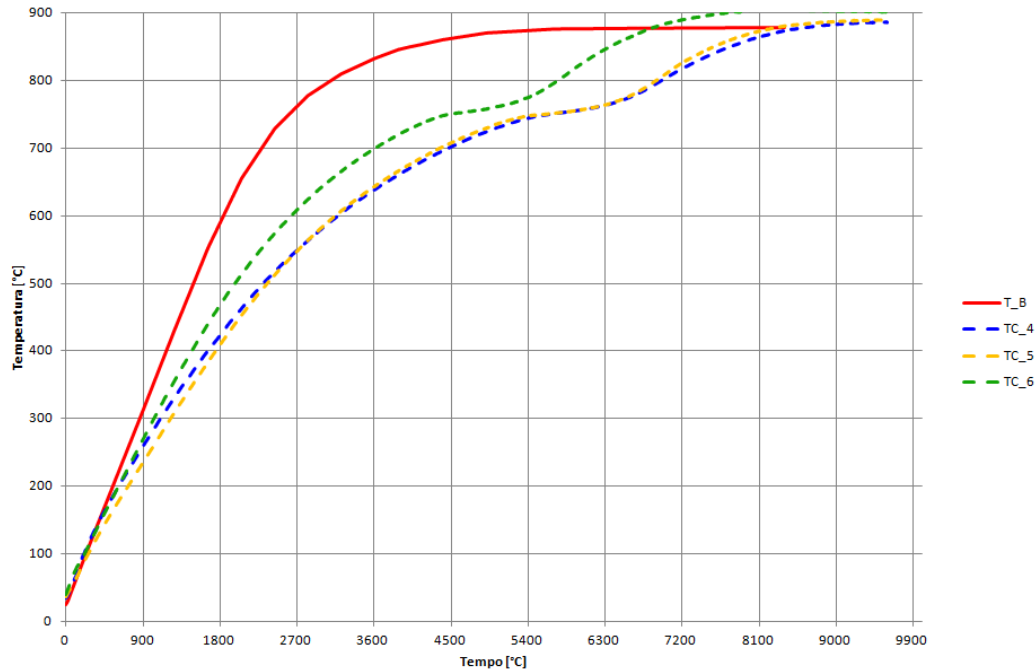
L'ultimo obiettivo dello svolgimento della prova ancora da verificare è anche quello più importante dal punto di vista della presente tesi, vale a dire quello del confronto dei risultati della prova sperimentale appena descritta con i risultati ottenuti dalle simulazioni.

I confronti da fare sono essenzialmente due:

- Verificare la bontà del modello 2D della sezione trasversale di forno e bombolone (fig. 4.4) per i punti che stanno sul corpo del bombolone;
- Verificare che la durata della rampa di salita dell'ogiva e la durata del mantenimento siano in linea con quanto individuato attraverso le simulazioni.

Per verificare il primo degli obiettivi è necessario confrontare i risultati delle simulazioni provenienti dal modello per il trattamento in doppio (in particolare modo, i risultati del punto B di fig. 4.13) con le termocoppie  $TC_4$  e  $TC_5$  (ricordiamo che la  $TC_6$  segnava una temperatura diversa da quella impostata nel forno di rinvenimento e non è stata utilizzata per il confronto). E' stato fatto questo confronto in quanto il punto B era quello che è stato utilizzato per determinare la durata del trattamento.

- **Trattamento di austenitizzazione** La soluzione trovata attraverso il simulatore Comsol non è in linea con i risultati della prova sperimentale (fig. 5.32). La causa è da ricercarsi in fig. 5.22 in cui è possibile osservare la differenza tra la rampa abituale, impostata anche per le



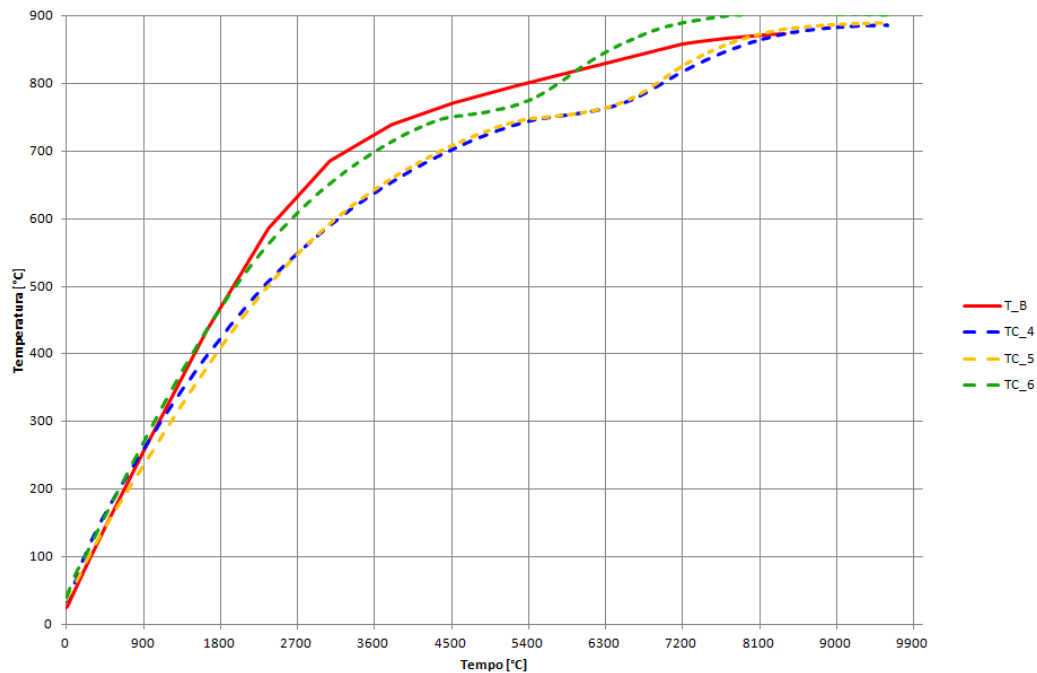
**Figura 5.32:** *Trattamento di austenitizzazione, confronto con simulazioni TRT in doppio*

simulazioni, del forno di alta e quella che effettivamente è stata registrata durante la prova in doppio. La temperatura iniziale del forno differisce di circa  $100^{\circ}\text{C}$ , e prima di arrivare in temperatura il forno impiega 2h contro l'ora impostata per le simulazioni. Come già spiegato in precedenza, questo è successo in quanto il forno di austenitizzazione è stato aperto per un tempo notevolmente lungo a causa della difficoltosa movimentazione del bombolone; un altro motivo è da ricercare nel notevole peso dei bomboloni da scaldare che mettono a dura prova la capacità di riscaldamento del forno.

I risultati delle simulazioni FEM sono fortemente suscettibili alla rampa di salita del forno, e per questo è stato fatto un ulteriore confronto per la prima fase di riscaldamento. Analizzando la fig. 5.22 è stato possibile ricavare la legge con cui il forno si è riscaldato durante la prova, per poter mettere a confronto i risultati sperimentali con il modello creato sul simulatore per i trattamenti in doppio. La rampa di salita ha inizio alla temperatura di  $660^{\circ}\text{C}$  ( $933,15\text{K}$ ) ed è durata 2h ( $7200\text{s}$ ). La sua equazione da impostare al simulatore è la seguente:

$$T = 933,15 + 0,3055t \quad (5.1)$$

dove  $T$  è la temperatura istante per istante del forno, mentre  $t$  è il tempo trascorso dall'inizio del trattamento in secondi. È stata lan-



**Figura 5.33:** *Trattamento di austenitizzazione, confronto con simulazioni TRT in doppio con la rampa reale*

ciata una nuova simulazione e i risultati sono stati confrontati ancora con quelli della prova sperimentale: questi sono notevolmente migliorati modificando la rampa di riscaldamento del forno. Questo è segno che il modello FEM creato approssima in maniera corretta il reale trattamento di alta temperatura.

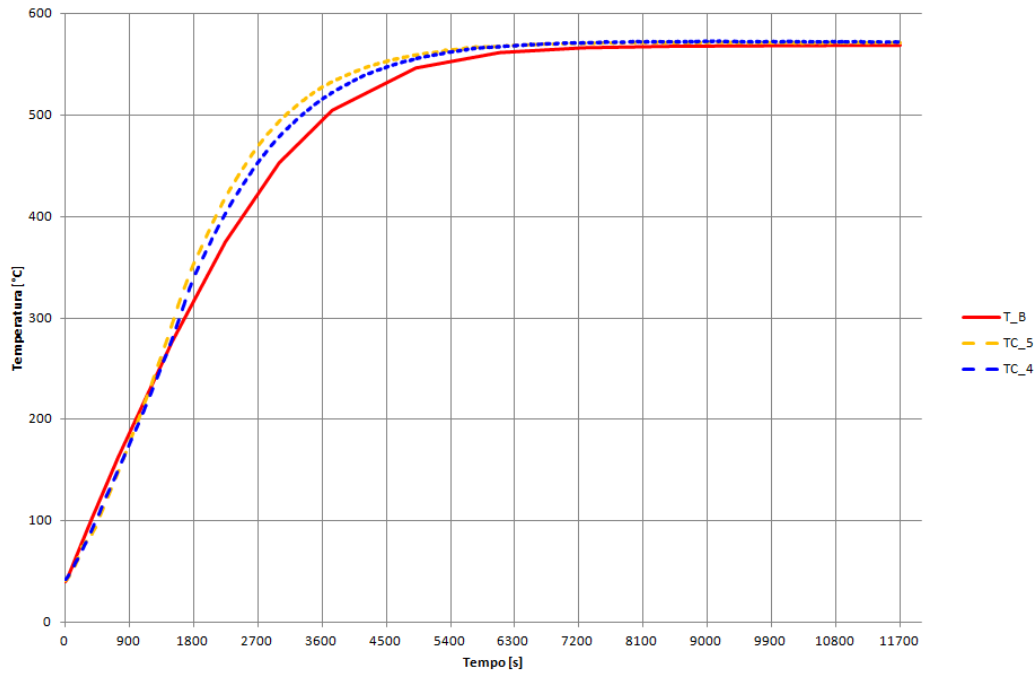
Per effetto dell'errata rampa di partenza inoltre, sarà possibile effettuare la seconda verifica solo con il trattamento di rinvenimento.

- **Trattamento di rinvenimento** I dati sperimentali provenienti dalle stesse termocoppie del precedente confronto sono stati confrontati con i risultati delle simulazioni anche per il trattamento di rinvenimento (fig. 5.34).

Le simulazioni sono pienamente in linea con la prova sperimentale, conferma del fatto che il simulatore riesce ad approssimare in maniera ottimale il trattamento reale.

Per la seconda verifica da fare, è necessario confrontare il tempo impiegato dal punto dell'ogiva strumentato con la terza termocoppia con quello calcolato attraverso le simulazioni descritto nel cap. 4.13.

Secondo il metodo descritto in quel capitolo, non è possibile confrontare direttamente le storie delle termocoppie con i risultati delle simulazioni,



**Figura 5.34:** *Trattamento di rinvenimento, confronto con simulazioni TRT in doppio*

perché per individuare il tempo di trattamento dell’ogiva, sono stati utilizzati sia il modello 2D trasversale che quello assialsimmetrico. Verrà effettuato quindi un confronto puramente quantitativo (tab. 5.4).

Ogiva	Inizio TRT	Arrivo a $T_{target}$	Durata
Simulazioni	–	–	2h
Dati TC_3	15:13	17:09	1h 56m

**Tabella 5.4:** *Confronto tra simulazioni e dati sperimentali sull’ogiva*

Le simulazioni hanno individuato in maniera corretta il tempo impiegato dall’ogiva per arrivare in temperatura, con soltanto il 3% di errore. Il confronto sul tempo di mantenimento invece è riportato in tab. 5.5:

Il mantenimento avrebbe potuto durare anche 13 minuti in meno, ma è comunque un tempo troppo basso perché abbia influenza sulle caratteristiche meccaniche del pezzo; infatti ricordiamo che durante il rinvenimento l’influenza maggiore sulle proprietà meccaniche è data dalla temperatura.

Mantenimento	Inizio	Fine	Durata
Normativa	–	–	1h 15m
Dati TC_3	17:09	18:37	1h 28m

**Tabella 5.5:** *Confronto tra il mantenimento secondo normativa e dati sperimentali*

In conclusione si può affermare che per il trattamento di rinvenimento i parametri impostati si sono rivelati corretti, confermando la bontà del simulatore FEM nel trovare il comportamento del bombolone durante questa fase di trattamento.

Per quanto riguarda invece la fase di austenitizzazione i dati sperimentali sono stati influenzati notevolmente dalla rampa di riscaldamento del forno, cosa che ha fatto prolungare il trattamento di circa 15 minuti e non è stato quindi possibile trarre delle conclusioni in merito ai parametri impostati per questo trattamento. Tuttavia dopo aver modificato questa rampa ponendola pari a quella reale, i risultati delle simulazioni erano perfettamente in linea con i dati sperimentali: questo indica che la legge con cui il forno si riscalda ha un enorme influenza sulla durata del trattamento.

## 5.4 Revisione dei parametri

Per poter meglio approssimare il comportamento del forno a quello reale e per capirne a fondo l'influenza sulla durata del trattamento si è stabilito di analizzare varie rampe di salita del forno in funzione delle caratteristiche geometriche del bombolone o dei bomboloni da inserire nel forno di alta temperatura. In modo particolare si sono analizzate varie rampe di riscaldamento in funzione del peso dei bomboloni inseriti all'interno del forno, in quanto si presuppone che più massa sia presente nel forno, più tempo impieghi questo per ad arrivare in temperatura. La rampa utilizzata fino a questo momento aveva la seguente equazione:

$$T = 1016 + 0,0344 * t \quad (5.2)$$

ed aveva una durata di 3895s, vale a dire poco più di un'ora. Da un'analisi successiva è stata ricavata una retta di regressione che esprime la durata della rampa in funzione della massa complessiva dei bomboloni inseriti nel forno (la temperatura iniziale è stata stabilita a 743 °C come per le simulazioni

lanciate per trovare i parametri precedenti). Essa è:

$$t_{rampa} = 1621,95 + 0,5968 \cdot m_{bomboloni} \quad (5.3)$$

Per  $m_{bomboloni}$  si intende massa complessiva, quindi per un trattamento multiplo è necessario moltiplicare la massa del singolo bombolone per il numero di pezzi nel forno.

Inserendo il tempo della rampa utilizzata in precedenza, è possibile ricavare il peso massimo per cui tale rampa è ancora accettabile, mentre per pesi superiori sarà necessario calcolarne di nuove:

$$m_{attuale} = \frac{3895[s] - 1621,95[s]}{0,5968[\frac{kg}{s}]} = 3808,4[kg] \approx 4000kg \quad (5.4)$$

Quindi per carichi fino a 4000  $kg$  la rampa utilizzata in precedenza va bene, ma per carichi superiori è necessario trovarne delle altre.

Scorrendo il database dei prodotti, il massimo carico possibile del forno è quello di 6600  $kg$ . Si è stabilito così di utilizzare tre diverse rampe per la determinazione della durata del trattamento di austenitizzazione (fig. 5.35):

- RAMPA A, fino a 4000  $kg$  si utilizza la stessa rampa utilizzata in precedenza, dalla durata di 3895s:

$$T = 1016 + 0.03455t \quad (5.5)$$

- RAMPA B, tra 4000  $kg$  e 5400  $kg$  (5400  $kg$  perché è circa a metà tra 4000 e 6600  $kg$ ), con durata di 4840 s:

$$T = 1016 + 0.028306t \quad (5.6)$$

- RAMPA C, tra 5400  $kg$  e 6600  $kg$ , con durata di 5560 s:

$$T = 1016 + 0.02464t \quad (5.7)$$

Attraverso l'utilizzo di queste leggi di temperatura del forno di austenitizzazione si sono così corrette le durate del trattamento che prevedevano un carico superiore a 5400  $kg$ : tutti i bomboloni hanno peso inferiore a 3500  $kg$ , quindi i parametri modificati riguardavano in particolar modo i trattamenti in doppio.

Le simulazioni hanno evidenziato un incremento della durata per queste situazioni di carico nell'ordine dei 10/15 minuti nell'ogiva e di 5/8 minuti sul corpo del bombolone (fig. 5.36). Il grafico rappresenta l'andamento della temperatura di un punto del corpo del bombolone al variare delle 3 rampe descritte in precedenza. Il bombolone utilizzato per questa analisi è lo stesso della prova strumentata e il modello con cui sono state effettuate le simulazioni è quello della sezione trasversale in doppio.

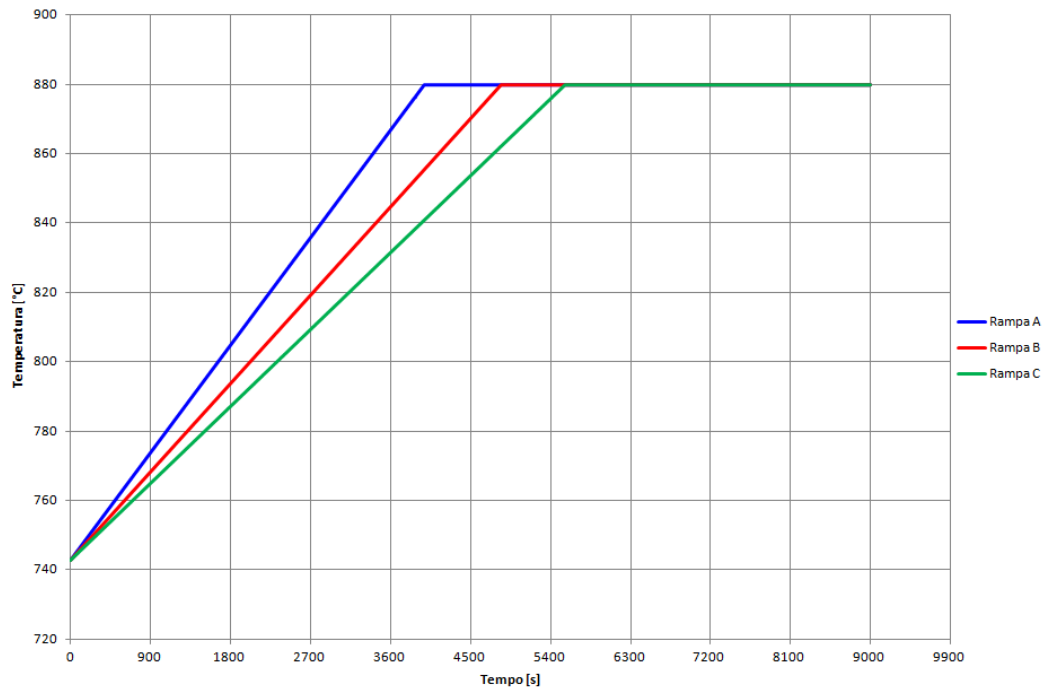


Figura 5.35: Confronto tra le tre rampe per il forno di alta temperatura

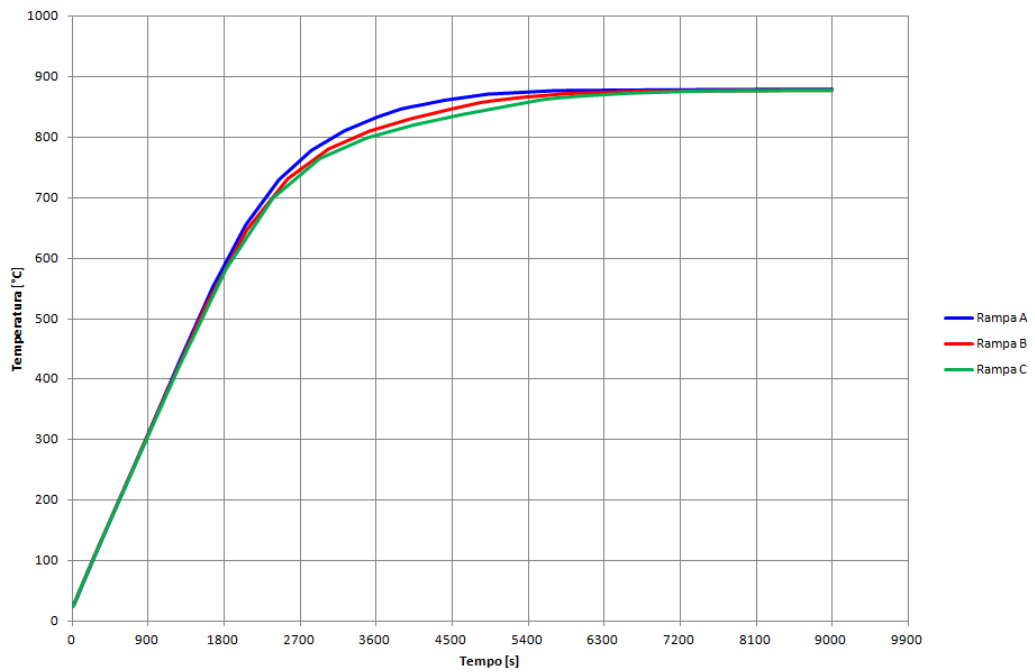


Figura 5.36: Temperatura del corpo del bombolone durante il trattamento di alta al variare delle rampe di riscaldamento del forno.





# Conclusioni

Il lavoro di tesi, sviluppato da Marzo ad Agosto 2012, ha permesso di studiare approfonditamente il trattamento termico di bonifica effettuato sui bomboloni prodotti da Tenaris Dalmine S.p.A., in modo particolare la fase di riscaldamento della tempra e del rinvenimento. Lo studio affrontato ha portato alla creazione di un modello risolto utilizzando il simulatore agli elementi finiti Comsol Multiphysics; questo modello permette di individuare sul bombolone la distribuzione spaziale e temporale della temperatura durante le fasi di trattamento. Questi risultati sono poi stati utilizzati per definire, in entrambe le fasi, i parametri ottimali di trattamento, quali durata e temperatura.

Sono stati realizzati in particolar modo due modelli geometrici, uno 2D della sezione trasversale del bombolone inserito nel forno e l'altro 2D assial-simmetrico: il primo ha permesso di studiare ciò che accade lungo il corpo del bombolone, e di implementare in un secondo momento la simulazione del trattamento di più bomboloni contemporaneamente, mentre il secondo ha permesso di valutare il comportamento delle parti più critiche come le ogive.

La validazione preliminare del modello è stata eseguita confrontando i risultati delle simulazioni effettuate con i dati disponibili di una prima prova strumentata eseguita dall'azienda: il confronto ha avuto esito positivo, concludendo così che il modello poteva essere utilizzato per ampliare lo studio anche ai trattamenti multipli (di più bomboloni contemporaneamente) e per l'ottimizzazione dei parametri di trattamento per tutti i bomboloni prodotti dalla Divisione Bombe di Tenaris.

Prima di affrontare l'implementazione delle nuove condizioni di trattamento è stata fatta un'analisi preliminare sia per i trattamenti di un singolo bombolone che per i trattamenti multipli. Essendo elevato il numero di bomboloni che possono essere prodotti in azienda, l'analisi è servita a mettere in luce i fattori significativi per la determinazione della durata del trattamento, ma allo stesso tempo, per i trattamenti multipli, quantificare il tempo addizionale che serve per effetto della presenza di più bomboloni nel forno.

A questo punto è stato possibile ricavare i parametri di trattamento per

tutti i bomboloni prodotti in azienda, ricavando la durata attraverso le simulazioni effettuate su Comsol, e impostando la temperatura attraverso risultati di prove meccaniche effettuate sui bomboloni al termine di trattamenti passati. La determinazione della temperatura rispetto a quella della durata è potuta avvenire in due momenti separati, questo perché l'analisi preliminare ha permesso di disaccoppiare i due parametri nelle successive analisi: le simulazioni hanno mostrato infatti come la temperatura impostata al forno di rinvenimento non sia un parametro significativo per stabilire la durata del trattamento.

I parametri individuati sono stati raccolti in un database nel quale per ogni bombolone vengono elencate durata e temperatura per tempra e rinvenimento, sia in singolo che per i trattamenti multipli. Per valutare la correttezza dei parametri impostati è stata effettuata nel luglio 2012 una seconda prova sperimentale, monitorando l'andamento della temperatura durante un trattamento in doppio. Il confronto tra dati sperimentali e risultati delle simulazioni ha dato esito positivo per quanto riguarda la fase di rinvenimento, mentre per la tempra è stato necessario correggere i parametri. In modo particolare ci si è accorti che il ritardo dei dati sperimentali era dovuto ad una non corretta valutazione della rampa di riscaldamento del forno: essa, nel caso reale, veniva fortemente influenzata dal volume (e quindi dalla massa) dei bomboloni inseriti nel forno, quindi sono state valutate tre diverse rampe per tre range di peso.

Sono quindi stati corretti i parametri del trattamento di tempra e confrontati nuovamente con i dati sperimentali, ottenendo un miglioramento nell'approssimazione del comportamento del bombolone inserito nel forno. Il database completo è stato così corretto.

I possibili sviluppi futuri sono molteplici: dal punto di vista prettamente fisico un obiettivo è una modellazione volta a determinare in maniera più accurata ciò che accade all'interno del forno. Per esempio sarebbe d'interesse misurare, attraverso un pirometro durante il trattamento, la temperatura delle pareti del forno per verificare la presenza di una certa correlazione con la temperatura dell'aria misurata dalle termocoppie del forno. Successivamente si potrebbe valutare in maniera migliore il transitorio del forno per arrivare a regime (alla temperatura impostata per il trattamento), con leggi di diverso tipo, vale a dire con polinomi di ordini diversi.

Un approccio completo al problema dell'esplorazione delle fasi di riscaldamento dei trattamenti termici potrebbe accoppiare la distribuzione della temperatura alla determinazione del suo effetto sulla microstruttura del materiale del bombolone, attraverso una simulazione del cambiamento di fase che avviene durante l'austenitizzazione. Altri sviluppi di carattere più ingegneristico

potrebbero infine riguardare la ricerca della posizione ottimale dell'anello campione all'interno del forno per non influenzare il riscaldamento del bombolone e infine quello di continuare la raccolta dei dati provenienti dalle prove meccaniche effettuate al termine del trattamento sul materiale per impostare parametri di trattamento (in particolar modo la temperatura) in maniera più accurata e affidabile.



# Bibliografia

- [1] W. Nicodemi *"Metallurgia"*, Masson Italia Editori, Milano 1986
- [2] W. Nicodemi *"Metallurgia. Principi Generali"*, 3<sup>a</sup> ed., Zanichelli, 2000
- [3] W. Nicodemi *"Metallurgia e leghe non ferrose"*, Zanichelli, 2000
- [4] L. Matteoli *"Il diagramma di stato ferro-carbonio e le curve TTT. Guida teorico-pratica ai trattamenti termici fondamentali degli acciai"*, AIM, 1990
- [5] M. Moran, H. N. Shapiro, B. R. Munson, D. P. DeWitt *"Elementi di fisica tecnica per l'ingegneria"*, Mc Graw-Hill, 2011
- [6] Y. A. Cengel *"Termodinamica e trasmissione del calore"*, Mc Graw-Hill, 2005
- [7] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo *"Trasmissione del calore"*, Cleup editore, 1992
- [8] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo *"Termodinamica applicata"*, Cleup editore, 1992
- [9] Tesi di Laurea, E. Farabolini, *"Sviluppo di un modello analitico per la determinazione dei profili termici nel trattamento a pozzo di bomboloni"*, Relatore prof. Maurizio Vedani, A. A. 2011-2012
- [10] S. Salsa, F. Vegni, P. Zunino *"Invito alle equazioni a derivate parziali. Metodi, Modelli e simulazioni"*, Springer Verlag Italia, 2009
- [11] *"COMSOL Multiphysics Reference Guide"*, Comsol 4.0a, 2010
- [12] *"COMSOL Multiphysics Modeling Guide"*, Comsol 4.0a, 2010
- [13] *"COMSOL Multiphysics example, Cavity Radiation"*, Comsol 4.0a, 2010

- [14] M. Bellingardi *"PDP 07/08 - Heat Treatment of an Instrumented Jumbo Cylinder at the Vertical Furnaces in Dalmine - Final Report"*, Tenaris, 2008
- [15] Douglas C. Montgomery *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, 2008
- [16] *"MINITAB, User Guide v. 16"*, 2012
- [17] J. Batista, D. Kosel *A sensitivity Analysis of the heat treatment of steel, Journal of Mechanical Engineering, vol.46*, Elsevier, 2000.
- [18] R. M. Guo, J. Malik *Evaluation of thermal profile models using various solution methods*, AISE Annual Conference, 2001.
- [19] S. Kalpakjian, S. R. Schmid *Manufacturing, Engineering & Technology* Prentice Hall, 2005.
- [20] S. K. Pal, D. A. Linkens *Simulation Modelling Practice and Theory* vol.10, Elsevier, 2002.
- [21] European Standard *"Gas cylinders - Refillable seamless steel tubes for compressed gas transport, of water capacity between 150 l and 3000 l - Design construction and testing"* ISO 11120:1999
- [22] Fogli Materiali VdTüV *Acciaio per laminati e fucinati 27CrMo4*, 1984
- [23] Fogli Materiali VdTüV *Laminati e fucinati in acciaio legato al Cromo bonificato 34CrMo4 e 34CrMo4/A. Nr. Materiale 1.7220*, 1997
- [24] Nuova Isoltermica *"Mattoni Refrattari Isolanti"* documento aziendale sui materiali refrattari
- [25] *"Trattamento termico Bomboloni: procedure operative"* Tenaris Dalmine, 2011