

SOMMARIO

La presente tesi si basa su uno stage di 6 mesi svolto presso la Lucchini s.p.a. di Piombino, presso il reparto TMP (Treno Medio Piccolo). Durante questo periodo il candidato ha seguito le attività del TMP sia sotto l'aspetto economico – gestionale che pratico – operativo, inoltre ha svolto una relazione di progetto di revamping del sistema di raffreddamento barre con l'obiettivo di incrementare la produttività dell'impianto e la qualità dei semiprodotti ottenuti. Al termine del progetto è stata eseguita, in collaborazione con le aziende ed i fornitori direttamente coinvolti nel revamping, una valutazione di costo delle varie soluzioni elaborate in modo da permettere, in futuro, la scelta della soluzione migliore in base alle risorse economiche disponibili ed al rapporto costi – benefici di ciascuna soluzione studiata.

1. INTRODUZIONE

1.1 Il complesso siderurgico

Lucchini è uno dei maggiori produttori di acciaio a livello nazionale, e leader europeo nei prodotti lunghi in acciaio speciale e ad alta qualità. Con una lunga tradizione storica risalente ai primi del Novecento, nel corso degli anni il Gruppo Lucchini ha incrementato le proprie attività focalizzandosi in produzioni ad alto valore aggiunto come i prodotti lunghi in acciai di qualità destinati prevalentemente alle industrie meccaniche, ferroviarie e automobilistiche.

L'intera attività occupa una superficie di circa 10 milioni di metri quadrati. In basso è riportata una vista in pianta del complesso siderurgico:

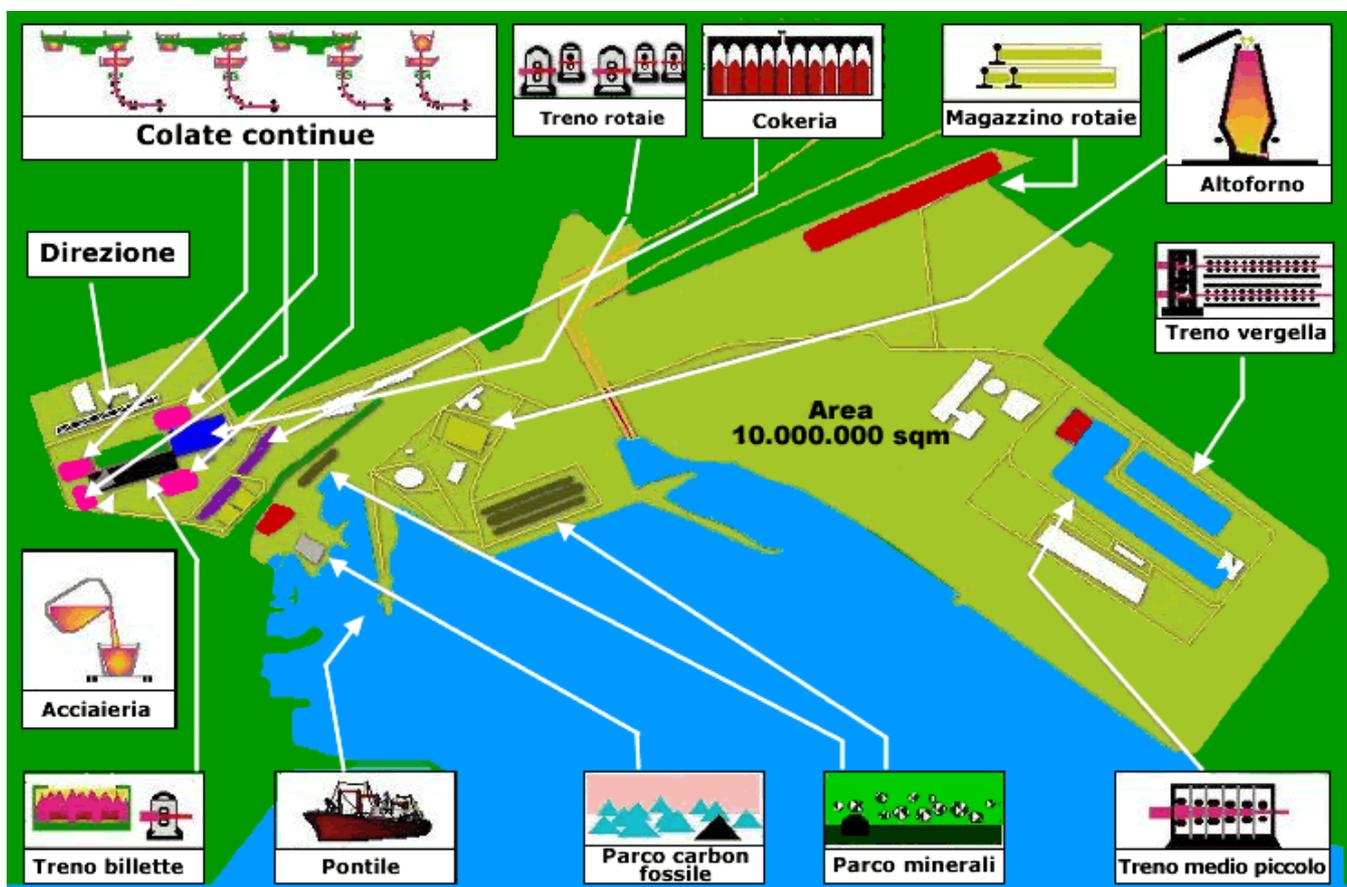


Fig. 1 – Planimetria dello stabilimento

Lo stabilimento è situato alla periferia della città di Piombino, e si estende prevalentemente lungo la costa. La sua ubicazione geografica, unitamente alla presenza di reti stradali e ferroviarie molto articolate sia all'interno che nell'area circostante, rappresenta uno dei maggiori punti di forza dello stabilimento, facilitando le importazioni di materie prime e le esportazioni dei prodotti finiti.

Le principali aree produttive - impianti sono di seguito elencate:

- un'area portuale, con un pontile per navi fino a 70.000 tonnellate
- impianti di preparazione dei minerali di ferro
- due batterie di forni per il carbon coke
- un altoforno
- un'acciaieria con tre convertitori LD/LBE
- quattro impianti di metallurgia in siviera (Ladle Furnace)
- due impianti di degasaggio sotto vuoto
- quattro colate continue, di cui una dedicata alla produzione di bramme
- un treno sbozzatore in grado di laminare blumi, billette e tondoni (TSB)
- tre laminatoi per barre e billette (TMP), rotaie (TPP) e vergella (TVE)
- un impianto per taglio a misura e/o saldatura rotaie in lunghezza 144 metri
- un reparto per il controllo e il condizionamento dei semiprodotti
- linee di ispezione interna e di superficie di prodotti finiti.

1.2 Il processo produttivo

Lo stabilimento di Piombino è basato sul ciclo integrale: la produzione di acciaio avviene attraverso la conversione della ghisa madre ottenuta nell'altoforno. Le materie prime giungono via nave al pontile privato della società, visibile nella figura in basso.

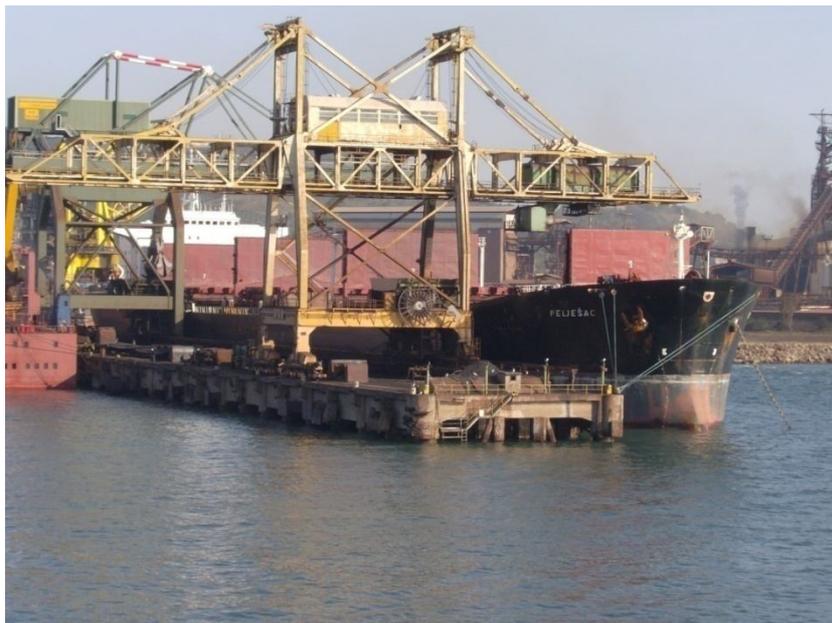


Fig. 2 – Pontile dello stabilimento

Le principali materie prime sono:

- minerali di ferro (magnetite, ematite, limonite, siderite)
- carbone fossile
- fondenti (principalmente olivina e calcare)

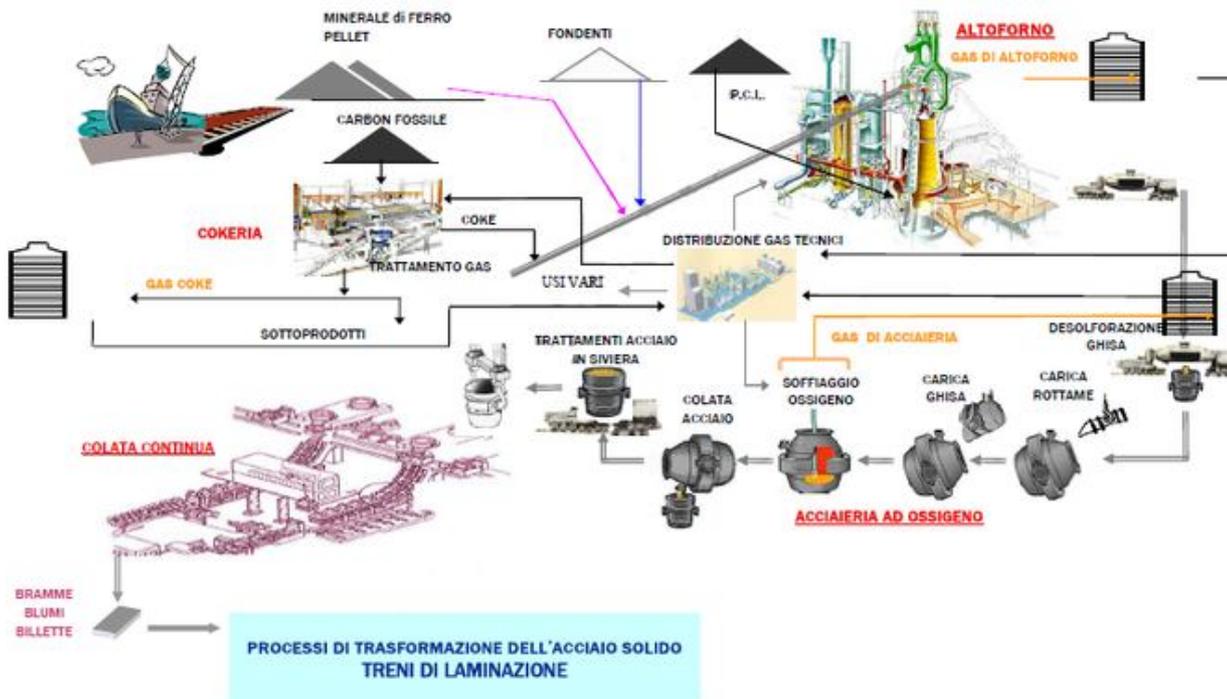


Fig. 3 – Ciclo integrale di produzione acciaio nello stabilimento di Piombino

Come noto, il ciclo integrale si articola essenzialmente nelle seguenti fasi:

- preparazione dei minerali di ferro e del carbon coke
- estrazione pirometallurgica in altoforno
- conversione della ghisa in acciaio
- colata continua

I semilavorati prodotti dagli impianti di colata continua si distinguono per la loro forma e le loro dimensioni. Nello stabilimento di Piombino i semiprodotti in uscita dalle 4 colate continue sono i seguenti:

- CC1: bramme da 800 x 200 mm fino a 1600 x 200 mm
- CC2: quadro da 140 a 170 mm
- CC3: quadro 170, 200, 220, 320 mm, rettangolo 245 x 340 e 245 x 380 mm, tondo 280, 320, 370 mm
- CC4: quadro 140, 170 e 200 mm.

Nelle figure in basso sono visibili i principali semiprodotti di colata continua:



Fig. 4 - Bramma



Fig. 5 - Blumi



Fig. 6 - Billette

Altri semilavorati d'interesse consistono in un'ampia gamma di ghise per la produzione di acciaio e ghise speciali destinate alle fonderie (ematiti, perlitizzanti, madri per sferoidale) e all'affinazione. I blumi e le billette vengono inviati, dopo un'eventuale fase di condizionamento, ai treni di laminazione. All'interno del complesso siderurgico di Piombino esistono tre treni di laminazione:

- TPP (Treno Primari e Profilati), costituito a sua volta da una linea per rotaie (RTL) e da una linea per tondi e quadri di grossa sezione (TSB)
- TMP (Treno Medio Piccolo), che produce barre tonde e quadre di medie dimensioni
- TVE (Treno Vergella), in cui si producono barre molto piccole (fili) a profilo circolare

I principali prodotti in uscita dai treni di laminazione sono mostrati nelle figure seguenti:



Fig. 7 - Rotaie



Fig. 8 - Barre tonde



Fig. 9 - Vergelle

In seguito sono riportati alcuni cenni sulle principali aree produttive - impianti dello stabilimento, ad eccezione del TMP, oggetto di studio della presente relazione, descritto ampiamente nei paragrafi successivi.

1.2.1 Cokeria

Il coke funge da combustibile all'interno dell'altoforno, portando la carica alla temperatura necessaria a dar luogo alla riduzione dei minerali di ferro e alla successiva carburazione. Il carbone fossile non può essere impiegato direttamente nell'altoforno in quanto è compatto, friabile, ricco di zolfo e di materie volatili: tutto ciò impedirebbe una corretta miscelazione combustibile - comburente, renderebbe sistematicamente necessaria l'operazione di desolfurazione della ghisa e comporterebbe un aumento delle emissioni nocive in atmosfera. Tutto ciò comporta la necessità, oltre all'eliminazione delle scorie, di ottenere una pezzatura, una durezza ed una porosità idonea per l'impiego in altoforno, in modo da evitare gli inconvenienti sopra descritti.

La trasformazione del carbone fossile in coke avviene in cokeria. In basso è riportato un tipico schema impiantistico:

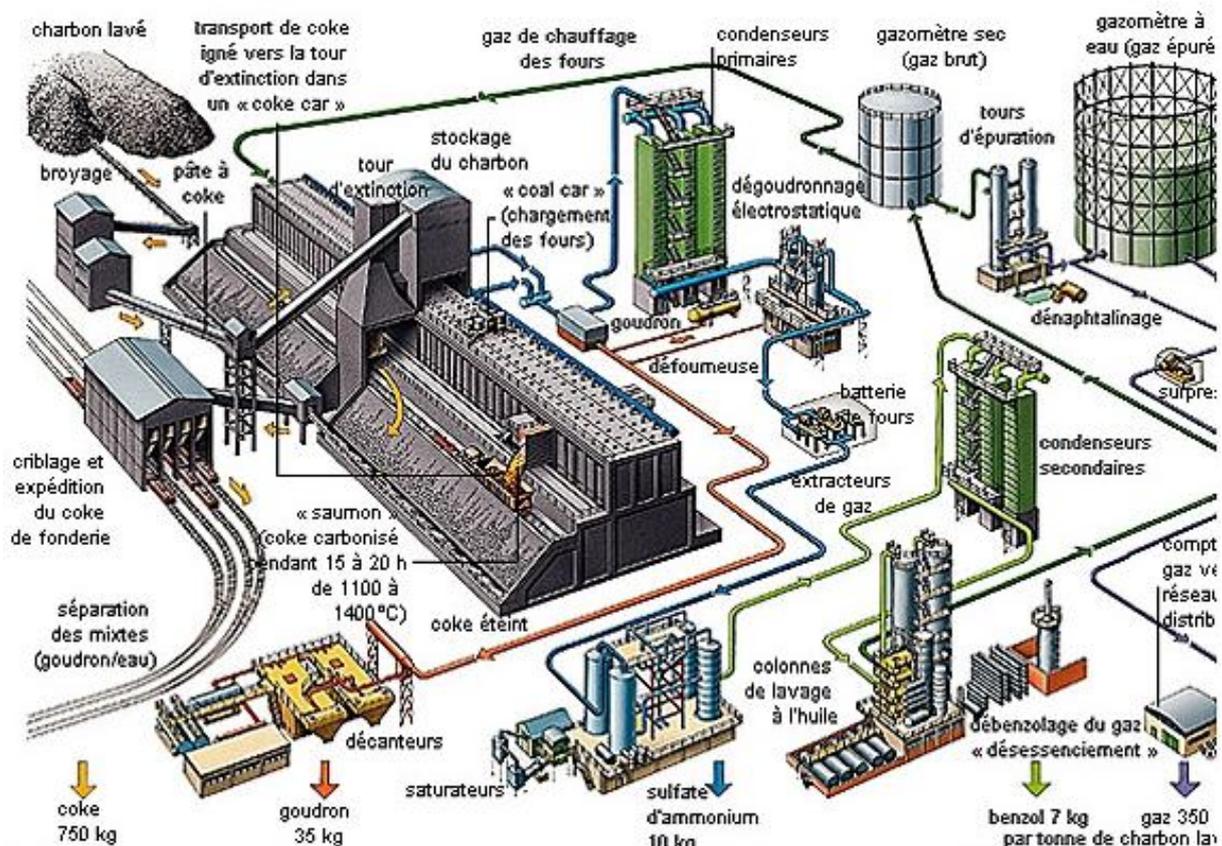


Fig. 10 – Schema impiantistico di una cokeria

Il carbone giunge presso gli impianti e depositato nel parco carbone. I nastri trasportatori lo movimentano nei passaggi successivi, dove è ulteriormente trattato in impianti di eventuale macinazione, vagliatura, miscelazione e trasportato fino alla torre di stoccaggio.

Tale torre, posizionata al centro della batteria di forni, permette la distribuzione del carbone tramite macchine dedicate alla carica dei forni. La carica è realizzata con lo scopo di ottenere una granulometria adatta per l'impiego in altoforno, necessaria per soddisfare molteplici aspetti, riguardanti essenzialmente il fabbisogno energetico, un'azione di supporto meccanico - aerodinamico della carica, e la produzione di gas riducente.



Fig. 11 – Da destra a sinistra i passaggi fino alla torre di stoccaggio della cokeria di Florange (Francia, 2010)

Le macchine cariatrici scorrono sopra l'area dei forni per il riempimento degli stessi. I forni sono pareti verticali di acciaio rivestito di materiale refrattario, con porte anteriori e posteriori, affiancati in sequenza, anche nel numero di qualche centinaio, intervallati tra loro dalle camere di combustione a contatto con le pareti dei forni.



Fig. 12 – Batteria di forni della cokeria Zollverein (Germania, 2010)



Fig. 13 – Dettaglio delle bocche di caricamento dei forni ad Anderlues (Belgio, 2010)

Il caricamento deve avvenire secondo una sequenza prestabilita in modo da ridurre al minimo le perturbazioni del regime termico della batteria. La fase successiva è la cokefazione del carbone: la miscela caricata sottrae calore alle celle, riscaldate da un complesso sistema di insufflaggio di aria e gas. Il riscaldamento a oltre 1000 °C trasforma il carbone in materiale poroso, il coke. La cottura del carbone varia approssimativamente da 15 a 24 - 36 ore. La batteria a 45 forni, attualmente in servizio nella cokeria di Piombino, è alimentata da un gas composto (90% gas afo e 10% gas coke) o dallo stesso gas coke prodotto durante il processo di distillazione.

Normalmente, durante la cokefazione, i gas prodotti vengono inviati al trattamento dei gas di cokeria. In caso di anomalia il gas coke grezzo può essere combusto direttamente attraverso le torce presenti sul barilotto, elemento nel quale viene convogliato tutto il gas prodotto dalle singole celle.



Fig. 14 – Dettaglio dei forni e del barilotto soprastante per il passaggio dei gas di cokeria, distillati dalla cottura del carbone (Liegi, Belgio, 2010)

I quantitativi di gas e di aria introdotti nella batteria sono i fattori principali che permettono di variare la temperatura delle celle e di conseguenza quella del carbone nei forni (ad una più alta temperatura corrisponde un minore tempo di distillazione e viceversa).

Per una corretta conduzione del sistema di riscaldamento, bisogna assicurare l'uniforme riscaldamento, la buona cottura del carbone in ciascuna zona del forno e la completa separazione del gas grezzo. Non

da ultimo, bisogna predisporre ogni accorgimento necessario al fine di massimizzare l'efficienza dei forni nonché ridurre al minimo le emissioni nocive in atmosfera.

Al completamento della cokefazione si passa alla fase di sfornamento. Ogni forno è indipendente, pertanto la sfornatrice, una macchina che si muove su rotaia parallelamente alla batteria di forni, spinge il coke nella parte posteriore dell'impianto, dove si trova un'altra macchina, la guida coke, che dirige il coke in uscita nel carro di spegnimento, mosso da un locomotore verso la torre di spegnimento ad umido.

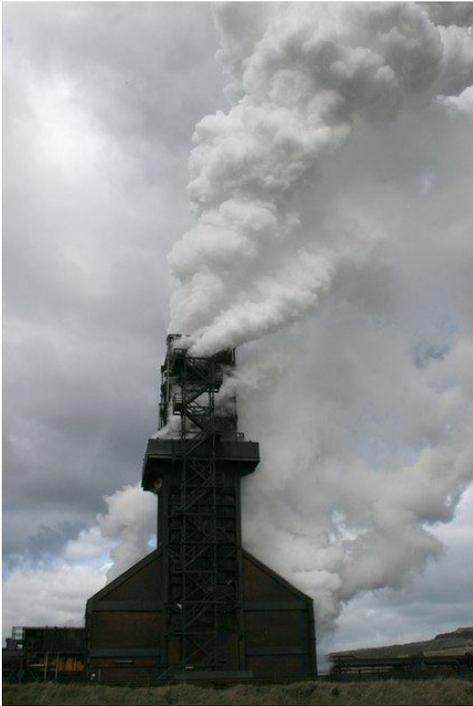


Fig. 15 – Torre di spegnimento ad umido della cokeria South Bank (Cleveland, Ohio, USA, 2007)



Fig. 16 – Punto di stazionamento del carro di spegnimento per il raffreddamento del coke, sotto la torre di quenching della cokeria Hansa (Dortmund, Germania, 2010)

Per effetto dell'acqua versata, il coke subisce un drastico raffreddamento, passando da una temperatura di circa 1000°C ad una temperatura prossima a quella ambiente. In questa fase parte dell'acqua versata viene recuperata previa decantazione del polverino di coke e riutilizzata nei cicli successivi di estinzione unitamente al reintegro della quota parte evaporata.

Il gas di cokeria viene purificato da catrame, naftalina, benzolo, NH₃, HCN, H₂S, CO₂, H₂O e composti solforati. A questo punto può essere impiegato come combustibile di recupero nelle varie utenze termiche di stabilimento, tra cui, come già visto, anche lo stesso riscaldamento delle batterie di forni a coke.

1.2.2 Altoforno

L'altoforno è il “cuore” di uno stabilimento siderurgico a ciclo integrale. Al suo interno si produce la ghisa madre tramite la riduzione dei minerali di ferro ad opera del coke. L'altoforno deve il suo nome alle sue dimensioni, infatti può raggiungere un'altezza pari a 80 metri (con un diametro che può superare gli 8 metri). In basso è visibile l'altoforno dello stabilimento di Piombino:



Fig. 17 – Altoforno dello stabilimento siderurgico di Piombino (2012)

Sebbene l'altoforno sia semplicemente un forno di grosse dimensioni, tutto l'insieme di tubazioni, gasometri, sistemi di controllo e impianti ausiliari che circondano la struttura rendono il complesso AFO un impianto molto complicato. Questo comporta che mentre in altri impianti, come i treni di laminazione, è possibile un adeguamento del regime di produttività senza grossi problemi di gestione (a scapito naturalmente del consumo di corrente elettrica e di gas, che non corrisponderà più ad un valore ottimale di progetto), l'altoforno deve marciare ininterrottamente, e a pieno regime, pena problemi di gestione non banali che nella migliore delle ipotesi possono portare ad

deterioramento precoce della muratura in refrattario, riducendo sensibilmente la vita media dell'altoforno.

La struttura interna di un altoforno è illustrata nella figura sottostante:

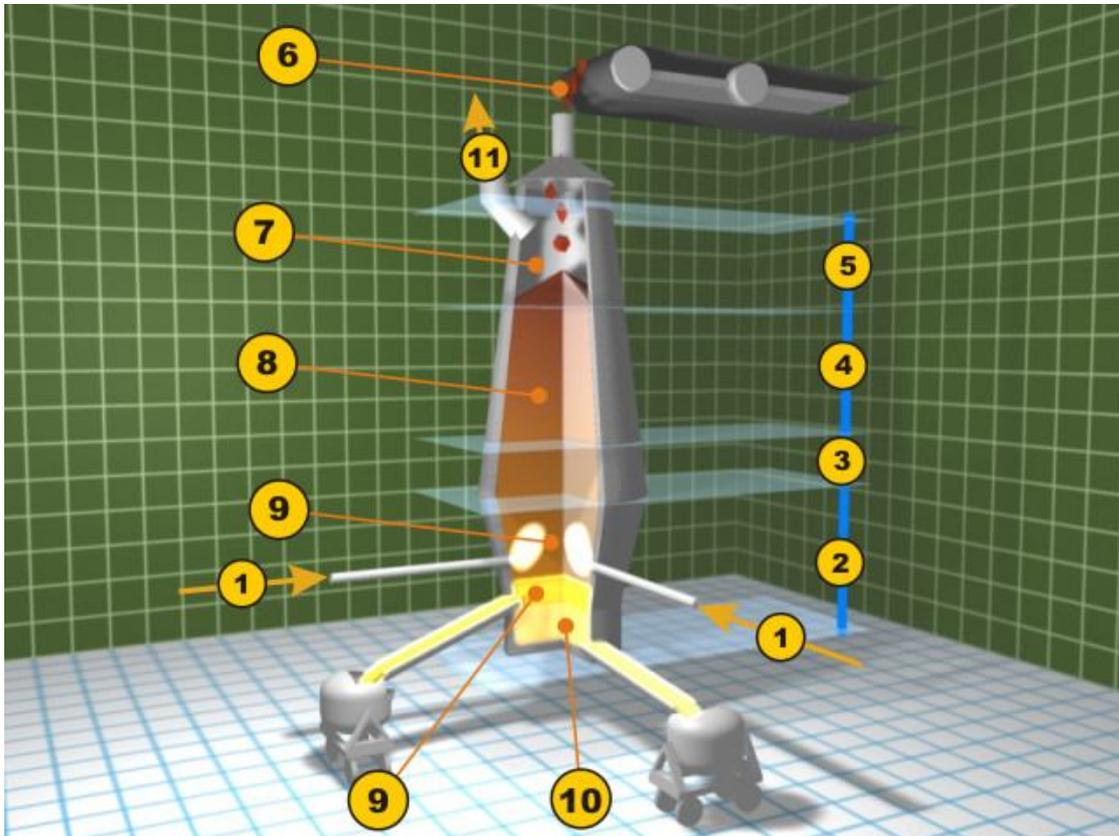


Fig. 18 – Struttura tipica di un altoforno

L'impianto AFO si può immaginare come un grande reattore caratterizzato da tre principali flussi:

- 1) caricamento dei materiali dalla bocca (6) del forno: i materiali in oggetto sono stoccati in molteplici sili nella Stock-House e sono i seguenti:
 - coke: in media, il 70% del fabbisogno di coke è prodotto dalla cokeria dello stabilimento, mentre il rimanente è acquistato all'estero, giungendo via mare al pontile Lucchini.
 - minerali di ferro: i materiali ferriferi sono di due tipi, il calibrato (sotto forma di pezzatura) e le pellets (materiale ridotto in forma sferoidale con diametro di circa 12 mm). Questi materiali provengono principalmente dal Canada, dal Brasile e dalla Russia.
 - fondenti: materiali quali olivina e calcare, utilizzati per regolare la basicità della carica.

- 1) spillaggio della ghisa e della loppa: poiché le scorie hanno una massa volumica inferiore a quella della ghisa, queste devono essere estratte da un foro (9) situato al di sopra del foro di estrazione della ghisa madre (10). Il forno di Piombino ha quattro fori di estrazione (due per la ghisa e due per la loppa), pertanto di norma si cola alternativamente dalle due parti. La ghisa viene raccolta in apposite canale refrattariate che la versano direttamente all'interno dei carri-siluro diretti in acciaieria. Da ogni carro-siluro riempito viene preso un campione della ghisa e analizzato nel laboratorio sul campo di colata. L'analisi viene poi trasmessa in Acciaieria e alla Sala Controllo AFO.
- 2) ingresso aria: attraverso 30 ugelli (1) viene soffiata all'interno del forno aria preriscaldata a circa 1200°C, arricchita con ossigeno e vapore, in modo da fornire l'ossigeno necessario affinché le reazioni di riduzione degli ossidi di ferro possano avvenire. Il gas prodotto esce dalla bocca del forno all'interno di una tubazione (11) e, dopo aver attraversato il sistema di depurazione ed un turbo espansore per la produzione di energia, viene immesso in rete e mandato alle Centrali di Stabilimento.

1.2.3 Acciaieria

La ghisa liquida prodotta in altoforno viene portata in acciaieria tramite carri siluro, versata in opportuni contenitori (siviere ghisa) e, se necessario, sottoposta al trattamento di desolfurazione.

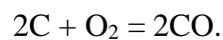


Fig. 19 – Struttura tipica di un carro siluro (con una massa a vuoto di circa 200 tonnellate e circa 600 a pieno carico si comprende la necessità di un elevato numero di assi)

La desolforazione, che in parte avviene anche nell'altoforno, consiste nell'eliminazione delle impurezze di zolfo contenute nel bagno metallico fuso, la cui presenza è controindicata per la produzione di acciai di qualità. Tale processo avviene mediante l'iniezione di agenti desolforanti nel bagno di ghisa fusa.

La fase successiva è la conversione della ghisa in acciaio. La ghisa costituisce circa l'85% della carica dei convertitori, la restante parte della carica è costituita dal rottame.

Nel convertitore LD viene in primo luogo caricato il rottame di ferro e la ghisa solida (si parla di carica solida) e successivamente viene versata la ghisa allo stato fuso (si parla di carica liquida) contenuta nelle suddette siviere. Il processo di decarburazione avviene per effetto dell'insufflaggio di ossigeno nel bagno metallico fuso dando origine principalmente alla seguente reazione:



Durante tale processo vengono scaricati i fondenti (calce calcarea e calce dolomitica) necessari per la formazione della scoria, utili per la rimozione delle impurezze dall'acciaio e per la difesa dall'usura dei rivestimenti refrattari dei convertitori. Il CO così prodotto viene, quindi, depurato attraverso un sistema di abbattimento ad umido del tipo venturi e successivamente recuperato per la parte centrale del processo di affinazione quando più alta è la percentuale di ossido di carbonio presente nel gas. Il gas che si sviluppa durante la fase iniziale e la fase finale del processo di affinazione in convertitore, della durata di alcuni minuti, viene invece combusto in torcia. Dopo depurazione, il gas di acciaieria viene quindi immesso nella rete di distribuzione.

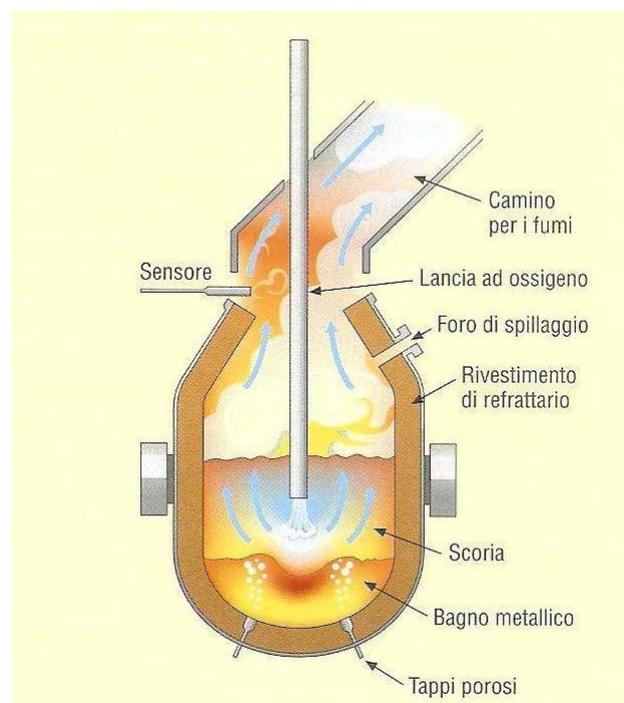


Fig. 20 Schema di funzionamento di un moderno convertitore LD - LBE

A fine soffiaggio, l'acciaio formatosi viene spillato dai convertitori e versato nelle siviere acciaio, mentre la scoria è versata in paiole. Tale scoria è periodicamente evacuata dalle paiole e sottoposta a raffreddamento con acqua. La scoria di acciaieria viene quindi sottoposta a trattamento per la separazione della frazione ferrosa dall'inerte al fine di consentirne il riciclo. L'acciaio allo stato fuso, prima di essere avviato agli impianti di colata continua, può essere sottoposto a dei trattamenti che vengono effettuati direttamente in siviera al fine di migliorarne le caratteristiche qualitative in funzione dei diversi campi di utilizzo. I principali trattamenti che possono essere effettuati sono decarburazione, deidrogenazione, denitrurazione, desolfurazione e globulizzazione, messa a punto termica e messa a punto analitica del bagno metallico fuso.



Fig. 21- Esempio di un impianto di metallurgia in siviera

Una volta raggiunta la qualità desiderata, l'acciaio viene inviato agli impianti di colata continua, in cui avviene la trasformazione dell'acciaio liquido in solido, sotto forma di sottoprodotti (bramme, blumi o billette) destinati direttamente alla vendita o utilizzati nei treni di laminazione. L'acciaio fuso viene fatto passare attraverso una forma permanente ad alta conducibilità termica a fondo aperto, detta lingottiera, ricavata in rame, raffreddata esternamente con acqua e lubrificata per impedire usura a

freddo. Durante la fase iniziale si pone una falsa billetta sul fondo che blocca il liquido il quale inizia a solidificare a contatto con le pareti. La falsa billetta inizierà quindi a scendere man mano che si forma il solido. Grazie al raffreddamento forzato, nella lingottiera il metallo si solidifica in superficie mentre rimane liquido in gran parte della parte interna della sua sezione. Tuttavia, questa pelle solidificata, tuttora rovente, fornisce abbastanza stabilità all'intero pezzo colato da poter farlo scendere attraverso un percorso curvo, il cui diametro misura alcuni metri, e nel quale continua ad essere raffreddato forzatamente attraverso degli spruzzi d'acqua diretti. Giunto in orizzontale, gran parte della sezione del pezzo colato, anche se non tutta, è ormai solidificata. A questo punto il pezzo va tagliato a misura mediante una fiamma ad ossigeno e lasciato raffreddare del tutto per effetto dell'aria, anche se l'idea migliore consiste nell'immettere il pezzo direttamente in un treno di laminazione, in modo da evitare il forno di riscaldamento.

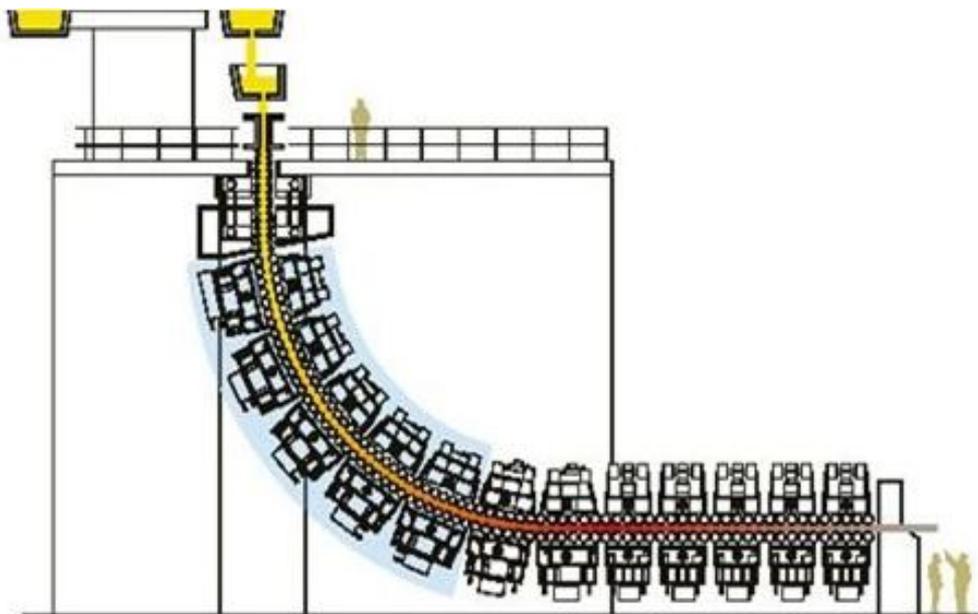


Fig. 22 - Schema tipico di un impianto di colata continua

1.2.4 CND

In uscita dalla colata continua, i semiprodotto vengono trasportati, per mezzo di carri ferroviari, al reparto di condizionamento dello stabilimento, meglio conosciuto come CND. Questo reparto consiste fondamentalmente in un magazzino, la cui gestione è, nei limiti del possibile, di tipo First In First Out: si cerca di ridurre al minimo il tempo di giacenza, anche se ciò non è sempre possibile, specialmente quando c'è molto materiale "a terra" (elevato numero di giacenze), il che comporterebbe un eccessivo numero di spostamenti se non l'impossibilità materiale del suddetto prelievo. Oltre che un'area magazzino, all'interno del CND sono presenti due molatrici, una sabbiatrice ed una pressa. I semiprodotto in arrivo vengono collocati distinguendo quelli che

necessitano il condizionamento da quelli le cui caratteristiche sono già idonee per l'invio ai treni di laminazione oppure, più raramente, per la vendita diretta al cliente (tenuto conto dei requisiti qualitativi stabiliti da quest'ultimo). Tale distinzione si basa sui risultati delle analisi qualitative effettuate in altoforno, acciaieria e colata continua, da cui può derivare essenzialmente un declassamento del semiprodotto, e sul confronto tra le caratteristiche tecnico – metallurgiche ottenibili dalla colata continua e le specifiche richieste (dal cliente oppure, più comunemente, dagli uffici qualità TMP/TPP/TVE).

La fase di condizionamento dipende dunque dallo stato in cui si trovano i semiprodotto e dalle specifiche richieste. Il processo prevederà, a seconda dei casi, una o più tra le seguenti operazioni:

- sabbiatura completa della superficie, seguita da un controllo a correnti indotte o semplicemente visivo con lo scopo di evidenziare eventuali cricche superficiali
- molatura sugli spigoli e/o lungo la mezzeria delle facce laterali con lo scopo di rimuovere eventuali cricche superficiali ed effettuare un ulteriore controllo visivo per evidenziare difetti superficiali situati più in profondità. La molatura, ad una profondità di circa 1 cm sugli spigoli, può avvenire in seguito alla sabbiatura una volta identificate delle cricche superficiali (se non rimosse, potrebbero propagarsi nel prodotto finito con conseguente pericolo di rottura), oppure può essere prevista per un determinato tipo di acciaio (è noto infatti che quel tipo di acciaio, seguendo una determinata modalità di raffreddamento in colata continua, molto probabilmente presenterà delle cricche in corrispondenza degli spigoli)
- raddrizzatura alla pressa per correggere eventuali distorsioni del profilo, dovute principalmente a disomogeneità nel raffreddamento. Può avvenire a caldo (acciai ad elevata durezza) oppure a freddo (per acciai più duttili).

I semiprodotto abbandonano il CND tramite carri ferroviari, ad eccezione di quelli destinati al TMP, i quali vengono collocati, per mezzo di carri - ponte magnetici, su un opportuno piano di carica.

1.2.5 TPP

Il TPP (Treni Primari e Profilati) comprende una linea a rotaie (RTL) e una linea per tondi e quadri di grossa sezione (TSB). L'impianto è dotato di un forno di riscaldamento a gas metano e di un preparatore (BBL) a comune tra le due linee che da lì in poi sono costituite da due impianti di laminazione distinti con gabbie duo reversibili.

La linea a rotaie produce profili da 27 kg/m a 70 kg/m di lunghezza fino a 108 metri. Il processo di laminazione dura circa 9 minuti ed è costituito da 14 riduzioni di sezione in 4 gabbie di laminazione diverse, al termine delle quali la rotaia viene depositata sul letto di raffreddamento dove passa dagli oltre 900°C a circa 60°C e viene sottoposta al processo di raddrizzo.

Dopo questa fase si procede all'esame a ultrasuoni e a correnti indotte per verificare l'assenza di difetti interni e superficiali sul prodotto, quindi si esegue il taglio a misura e l'eventuale foratura all'estremità. Successivamente viene effettuato il collaudo di tutta la produzione su di un piano che ribalta le rotaie in modo che l'operatore possa controllarle su tutta la superficie.

Alcune produzioni di rotaie estremamente corte, ad esempio 18 m, vengono tagliate in un impianto diverso dal TPP, il CSE, per evitare che una eccessiva mole di operazioni di finitura condizioni la produttività dell'impianto di laminazione.

Per quanto riguarda il volume annuo di produzione, in media si registra un 40% verso il mercato ferroviario nazionale, il rimanente si divide tra mercato estero europeo (spedizioni prevalentemente via treno) e mercato estero extraeuropeo (spedizioni esclusivamente via nave). La laminazione di tondi e quadri è per sua natura molto meno delicata e problematica della laminazione di profilati complessi come le rotaie, per cui il CSE è estremamente più semplice del treno rotaie. I prodotti di questo laminatoio (quadri da 110 a 170 mm e tondi da 115 a 220 mm di diametro) sono la materia prima per industrie meccaniche che costruiscono componenti, buona parte dei quali è indirizzata al mercato automobilistico.

1.2.6 TVE

Il TVE (Treno Vergella) produce filo di acciaio avvolto in aspi con sezione variabile da un diametro di 5,5 mm fino a 17 mm.

Gli acciai laminati al TVE sono principalmente:

- acciai per bulloneria
- acciai di qualità per stampaggio
- acciai ad alto tenore di carbonio
- acciai per molle
- acciai per filo scadente

Il forno di riscaldamento è del tipo a longheroni mobili e riscalda billette di dimensione 140 x 140 mm e lunghezza da 10 a 16 m, provenienti direttamente dalla colata continua.

Le billette, che hanno raggiunto una temperatura di circa 1150°C, alimentano il treno di laminazione a 2 linee, composto da una serie di 26 gabbie disposte su 4 sezioni:

- sezione sbizzatore: gabbie 0-5
- sezione I intermedio: gabbie 6-11
- sezione II intermedio: gabbie 12-15
- blocco finitore: gabbie 16-25

Le sezioni sbizzatore – I intermedio sono comuni alle due linee, mentre le sezioni II intermedio e blocco finitore sono distinte. Tutti i profili prodotti dal TVE subiscono dei passaggi di laminazione all'interno del blocco finitore. Il numero di gabbie del blocco effettivamente in presa durante la laminazione aumenta con il diminuire della sezione finale del laminato. All'uscita del blocco finitore vi sono dei box di raffreddamento ad acqua che hanno lo scopo di abbattere la temperatura del laminato e prepararlo all'ingresso dello Stelmor dove inizia il raffreddamento controllato.

Un misuratore di profilo automatico posto tra il II e il III box di raffreddamento tiene costantemente sotto controllo la dimensione del prodotto laminato, fornendo agli operatori la dimensione reale del prodotto e le tolleranze dello stesso.

La gestione operativa dell'impianto viene effettuata da tre pulpiti di manovra, uno per la zona forno, uno per il treno di laminazione e uno per la conduzione del tappeto di raffreddamento.

Due tappeti di raffreddamento Stelmor permettono di raffreddare la vergella in maniera controllata, grazie a delle cappe coibentanti che possono essere aperte o chiuse, unite a dei ventilatori per poter avere trattamenti variabili da coibentato a convezione forzata. Successivamente la vergella arriva ad una gancera dove i rotoli vengono bonificati, pressati, legati, pesati, cartellinati, controllati e infine prelevati da carriponte magnetici che li depositano a magazzino pronti per essere spediti.

1.3 Il Treno Medio Piccolo (TMP)

Il TMP è un treno di laminazione a caldo in linea che produce barre a sezione circolare (da 38 a 125 mm di diametro) e quadrata (da 40 a 100 mm di lato). Attualmente si parte da billette di dimensione 170 x 170 mm (sbozzate dal TSB da billetta 320 x 320 mm) e billette 200 x 200 mm (provenienti direttamente dalla colata continua). Gli acciai laminati al TMP sono principalmente i seguenti:

- acciai automatici
- acciai a basso tenore di carbonio
- acciai da bonifica
- acciai da cementazione
- acciai da trattoristica
- acciai legati generici
- acciai microlegati
- acciai per cuscinetti
- acciai per molle
- acciai strutturali
- acciai TT induzione

Le barre prodotte al TMP rappresentano a loro volta un semiprodotto per i clienti che le impiegano per realizzare principalmente:

- mozzi ruota veicoli industriali e auto motive
- bracci oscillanti accoppiamento semiassi/sospensione
- mozzi porta ruota
- fusi ruota
- ingranaggi cambio e differenziale veicolistica
- coppie coniche trasmissioni
- riduttori ascensori
- trasmissioni pale eoliche
- rulli trattori
- ruote tendi cingoli
- cingoli mezzi movimento terra
- punte, denti pala, ganci traino
- alberi per ruote
- cuscinetti per auto motive

- flange
- anelli

Schematicamente il reparto può essere suddiviso nelle seguenti macroaree:

- inforamento: area atta ad accogliere il semiprodotto in billette dai reparti a monte del processo produttivo di stabilimento
- forno di riscaldamento: forno a gas naturale impiegato per portare le billette alla temperatura di laminazione
- linea di laminazione: insieme di venti gabbie di laminazione in linea a singolo passaggio di cui dodici gabbie orizzontali e otto gabbie verticali. La linea di laminazione prevede anche l'utilizzo di quattro cesoie, tre rotative ed una a bracci ad alta velocità (cesoia "volante"), impiegate per la rottamazione del laminato in caso di emergenza, per la bonifica di testa e per il taglio a misura.
- letti di raffreddamento: struttura speculare (rispetto al treno di laminazione) composta da due placche su cui vengono collocate le barre all'uscita dal treno di laminazione. Parte di questa zona è coibentata in modo da ottenere un raffreddamento controllato delle barre, funzione della dimensione del profilo e della marca acciaio.
- area taglio e confezionamento: area impianto adibita al taglio a misura, all'organizzazione in pacchi e all'etichettatura. Da qui il prodotto può essere indirizzato ad ulteriori fasi di finitura (presso l'FMP), oppure indirizzato direttamente alla spedizione verso i clienti.

Nei seguenti sottoparagrafi è riportata una descrizione più dettagliata di ciascuna delle sopra menzionate aree/impianto.

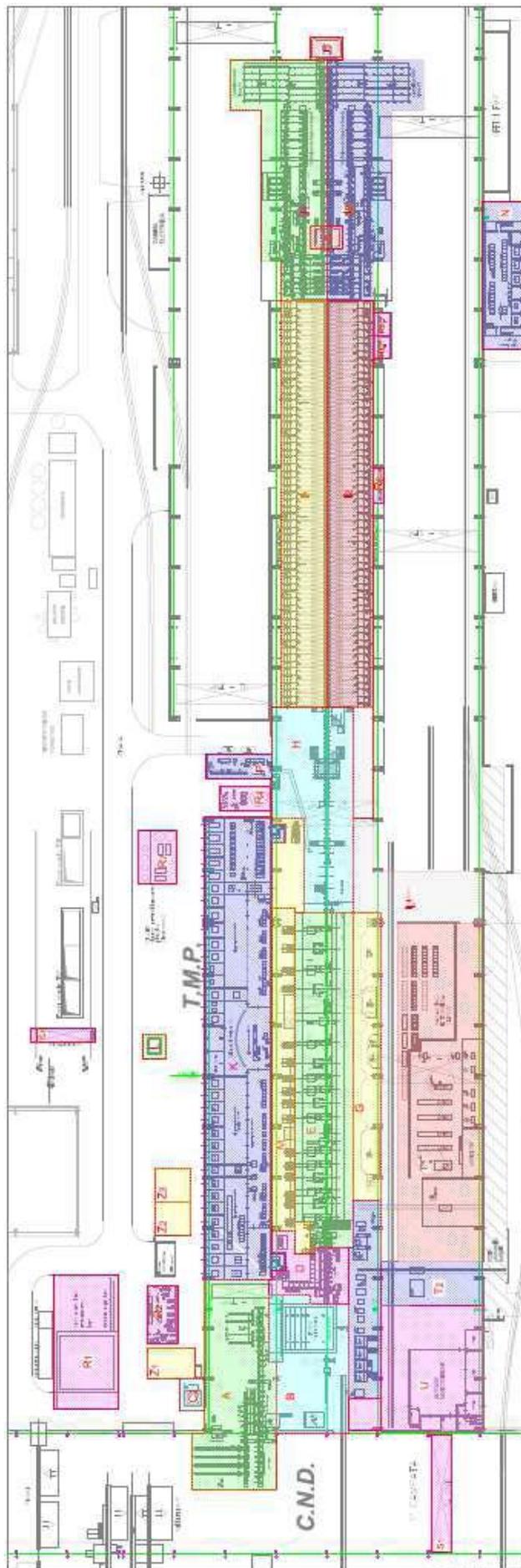


Fig. 23 – Layout generale del reparto TMP

1.3.1 Infornamento

L'area infornamento comprende un piano di carica (visibile in figura 23, subito all'uscita del capannone TMP), su cui vengono caricate le billette all'uscita dal CND. Successivamente, mediante un sistema di trasporto a cagnoli, vengono collocate su una via a rulli con cui vengono guidate all'interno del capannone TMP: due fotocellule, situate alle due estremità della via a rulli, misurano la lunghezza di ciascuna billetta comunicando il risultato al pulpito di controllo (visibile in alto a sinistra in figura) tramite PLC. A questo punto un secondo sistema a cagnoli muove le billette in direzione perpendicolare fino a giungere in corrispondenza di due celle di carico, le quali misurano la massa di ciascuna billetta. Questi due dati sono necessari per poter calcolare quanto sviluppa una determinata billetta a seconda del profilo. Per fissare le idee, uno spezzone di billetta da 200 mm di lato lungo 1 m, sviluppa (a meno delle perdite di materiale causate da permanenza in forno, discagliatura e laminazione) 25 m di barra quadra di lato 40 mm. Conoscere lo sviluppo di una determinata billetta permette di minimizzare gli scarti finali prodotti nell'area taglio e confezionamento per un determinato profilo laminato attraverso il calcolo di una lunghezza di taglio ottimale. L'ultima fase consiste nel collocare le billette (una per volta) davanti alla zona di ingresso forno (situata lateralmente a quest'ultimo), a questo punto un sistema di spintori oleodinamici permetterà l'infornamento della billetta.



Fig. 24 – Area infornamento

1.3.2 Forno di riscaldamento

Il forno di riscaldamento è una struttura ad infornamento laterale e sfornamento frontale. Le billette entrano trasversalmente tramite il sistema a spintori descritto in precedenza. Tale sistema non entra in funzione finchè non è ancora uscita l'ultima billetta infornata. Una volta che questa è uscita nel forno c'è uno spazio vuoto, pertanto il sistema di spintori non spinge una billetta sola, bensì quella da infornare più tutte le billette presenti in forno, in modo da portare un'altra billetta di fronte alla portina di sfornamento. L'operazione di sfornamento avviene tramite un'asta sfornante lunga 12 metri (infatti quest'asta non è altro che una billetta) mossa da un motore oleodinamico e guidata da una serie di trascinatori. L'ingresso dell'asta permette di spingere all'esterno la billetta da sfornare.



Fig. 25 – Forno di riscaldamento TMP (in alto al centro)

Il forno è costituito al suo interno da una muratura in materiale refrattario e da una travatura su cui poggiano le billette durante il periodo di infornamento. Il riscaldamento avviene tramite bruciatori a gas naturale ed un sistema di alimentazione ad aria. In corrispondenza di ciascun bruciatore vengono rilevate le portate di aria e gas, dati che vengono inviati al sistema di supervisione del pulpito forno ma anche ad un PLC il quale permette di intervenire automaticamente sulla regolazione del flusso in modo da ristabilire il rapporto ottimale.



Fig. 26 – Bruciatori del forno di riscaldamento billette del TMP

Poiché le temperature all'interno superano i 1000°C è necessario un sistema di raffreddamento capace da mantenere la struttura di sostegno entro un range di temperatura ammissibile, onde evitare pericolosi collassi. Oltre ad un sistema di raffreddamento efficace è necessario garantire l'asservimento idrico 24 ore su 24 senza interruzione, per realizzare questo obiettivo sono stati previsti due anelli di emergenza: in caso di guasto dell'anello primario (causato ad esempio da avaria pompe, rottura tubazioni etc.) interviene l'anello secondario, ossia il prelievo di acqua avviene attraverso la rete dell'acqua industriale di stabilimento, e in caso di guasto di quest'ultimo interviene l'anello di emergenza terziario, cioè viene prelevata una parte dell'acqua destinata al raffreddamento gabbie e indirizzata al circuito di raffreddamento forno. Il sistema di raffreddamento è costantemente monitorato in cabina elettrica Q1 tramite un terminale di supervisione generale e altri terminali secondari. Nel quadro di supervisione è riportato schematicamente il forno con le tubazioni dell'acqua di raffreddamento. Per ciascun ramo è indicata la temperatura e la portata volumetrica. Nel caso specifico (v. figura 27) una scritta a fondo rosso segnala un'avaria all'anello principale, avvisando che è abilitato il secondo anello. Oltre alla supervisione generale esistono altri terminali secondari da cui si possono visualizzare più nel dettaglio le portate e temperature a monte ed a valle delle tubazioni, nonché le caratteristiche

chimico-fisiche dell'acqua (in particolare il ph), anch'esse da tenere sotto controllo in quanto influenzano la portata volumetrica necessaria a smaltire una determinata potenza termica in ingresso.

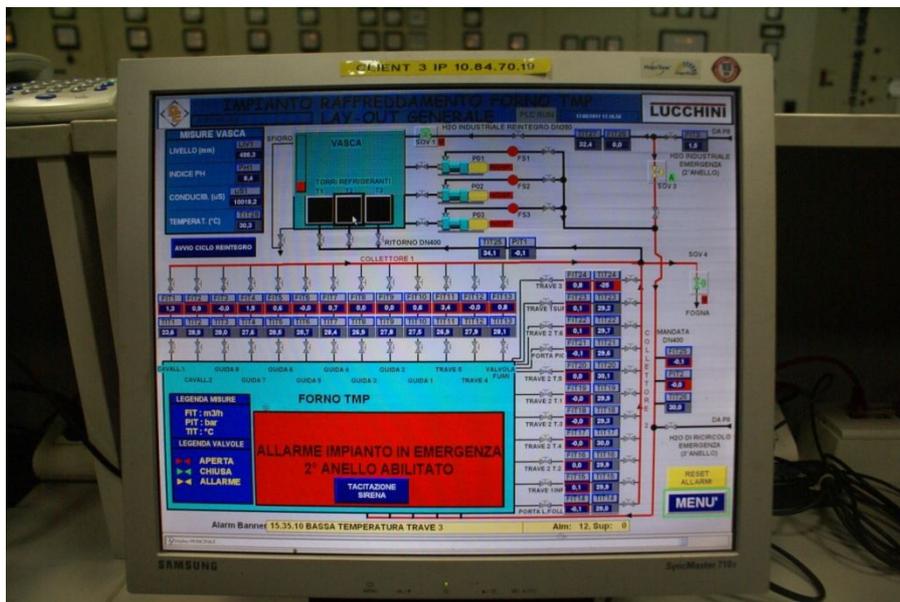


Fig. 27 – Supervisione layout generale circuito di raffreddamento forno

All'uscita del forno avviene (a meno di casi particolari per cui l'operazione non sia necessaria) la discagliatura: la billetta attraversa una serie di ugelli che spruzzano acqua ad una pressione dell'ordine di 250 bar, sufficiente a rimuovere le scaglie di ossido superficiale formatesi durante il periodo di infornamento.



Fig. 28 – “Toro” di discagliatura ed evacuatore

Come si vede nella figura precedente, il sistema di discagliatura è costituito da un collettore, detto “toro”, con quattro ugelli su ogni lato. Gli assi degli ugelli corrispondenti a due lati paralleli non si trovano sullo stesso piano, ma su due piani distinti e paralleli tra loro, in modo da evitare la collisione tra i getti di due ugelli opposti nel momento in cui non sta transitando la billetta (ad esempio durante una prova di collaudo impianto). L’acqua deve avere caratteristiche chimico-fisiche molto precise con un grado di impurezza molto basso, per questa ragione si utilizza un impianto di pompaggio dedicato esclusivamente alla discagliatura, visibile nella figura sottostante.



Fig. 29 – Centrale di pompaggio discagliatura

In seguito alla zona di discagliatura c’è un certo spazio necessario per un’eventuale evacuazione della billetta appena sfornata, la quale non può essere inviata al treno di laminazione per varie ragioni, principalmente le seguenti:

- temperatura troppo bassa dovuta ad un eccessivo tempo di permanenza fuori dal forno a causa di fermate di emergenza del treno (ad esempio a causa di un’avarìa o di un incaglio) oppure alla difficoltà di ingresso della billetta nella prima gabbia a causa di un cambio cilindri (appena lavorati i cilindri hanno una superficie troppo liscia che può rendere difficoltoso l’ingresso della billetta nella prima gabbia).

- necessità di invertire il moto delle prime gabbie per mandare il laminato (opportunamente tagliato per mezzi di cannello ossiacetilenico) all'evacuatore, a causa di un incaglio sulla linea di laminazione.

Sostanzialmente l'evacuatore (visibile in figura 28, dopo il toro di discagliatura) è una struttura a bracci rotanti che permette di alzare la billetta dalla via a rulli in modo da poterla imbracare con delle catene e portarla via tramite carroponete.

Le operazioni di infornamento, sfornamento e discagliatura avvengono di solito in modo automatico. Esiste un pulpito di manovra forno con un diverso numero di terminali collegati a telecamere posizionate in vari punti strategici (portine di sfornamento, interno forno, disagliatura etc.) che permettono di tenere sotto controllo il funzionamento dell'impianto e di intervenire in caso di avaria. In caso di necessità è possibile passare al controllo in manuale, utile durante prove di collaudo o ripartenza dell'impianto dopo una fermata. Altri monitor permettono il controllo e la gestione di una serie di impianti ausiliari come centraline oleodinamiche, quadri elettrici e PLC, e l'interfacciamento dati tra gli altri pulpiti presenti nel reparto.

1.3.3 Treno di laminazione

La linea di laminazione del TMP comprende una serie di 20 gabbie orizzontali e verticali poste in linea, intervallate da cesoie per la spuntatura delle barre durante la laminazione e da anse capaci di compensare eventuali variazioni di velocità tra due gabbie consecutive. Il numero delle gabbie effettivamente in presa durante la laminazione aumenta con il diminuire della sezione finale del profilo. Per laminare ad esempio il tondo da 125 mm (di diametro), occorrono solo 6 gabbie in presa (tutte le altre, a seconda dei casi, vengono escluse o fungono da trascinatori), mentre per fare il tondo da 38 mm sono necessarie 16 gabbie.

Il treno di laminazione è suddiviso in:

- treno sbozzatore, comprendente le gabbie S1, S2, 0A, 0B
- treno intermedio, comprendente le gabbie da 1 a 10
- treno finitore, comprendente le gabbie da 11 a 16

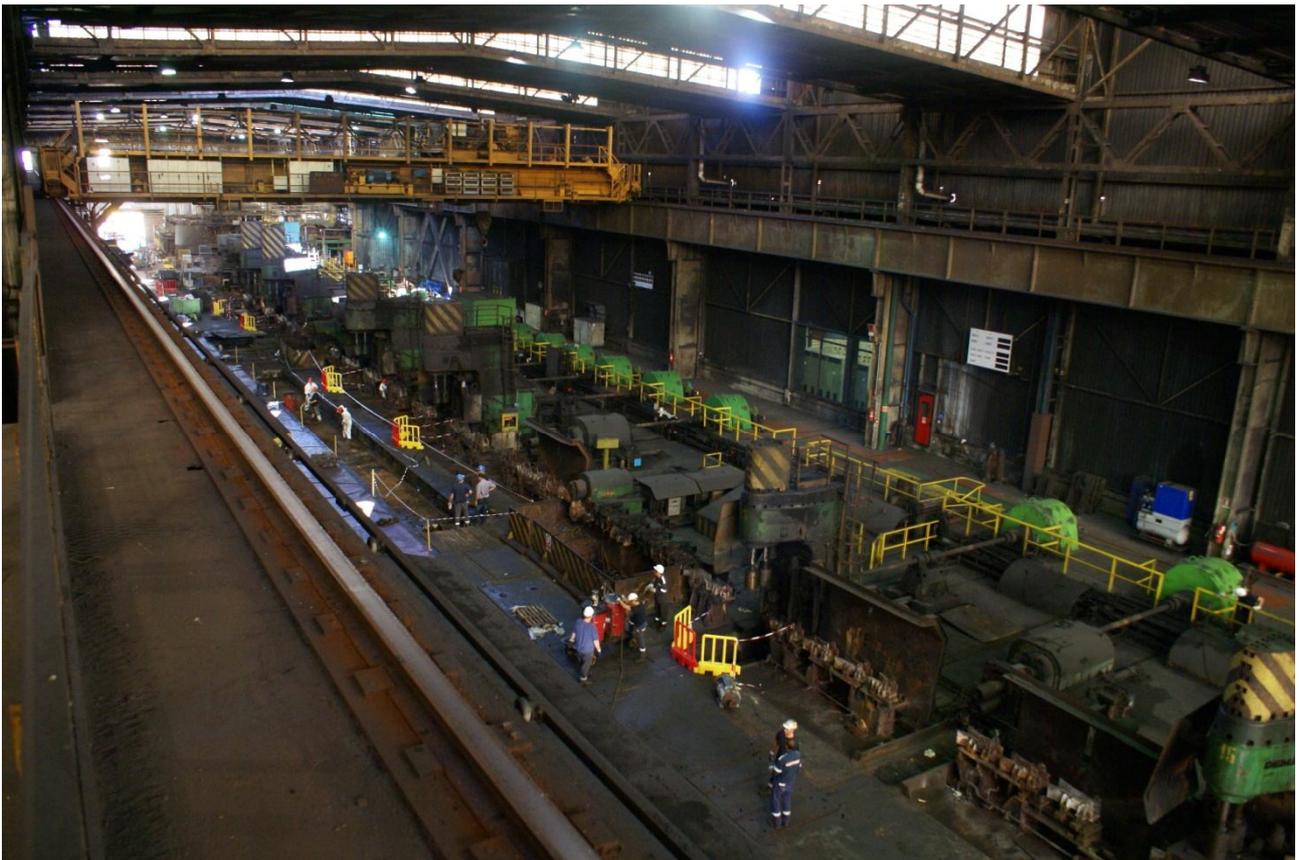


Fig. 30 – Panoramica della linea di laminazione a caldo TMP

Le prime quattro gabbie hanno una nomenclatura alfanumerica in quanto sono state aggiunte successivamente alle altre: il treno inizialmente era stato concepito per laminare billette da 140 mm

di lato. Per tutta una serie di ragioni, attualmente le billette in ingresso al TMP sono da 170 mm o, più comunemente, da 200 mm. Ciò ha dunque portato alla necessità di costruire altre quattro gabbie, ma per poter utilizzare gli schemi di montaggio del vecchio treno di laminazione la nomenclatura delle 16 gabbie originarie non è stata modificata, in altre parole i nuovi schemi di montaggio comprendono la parte vecchia inalterata più la parte recente relativa alle prime quattro gabbie. In definitiva, dal treno sbozzatore esce una billetta da 140 mm, indipendentemente dal profilo da laminare, questo significa che la parte da aggiungere ai vecchi schemi di montaggio gabbie è sempre la stessa.

La gabbia S1 è orizzontale, le successive sono alternativamente verticali ed orizzontali. Ciascuna gabbia è alimentata da un motore a corrente continua a spazzole.

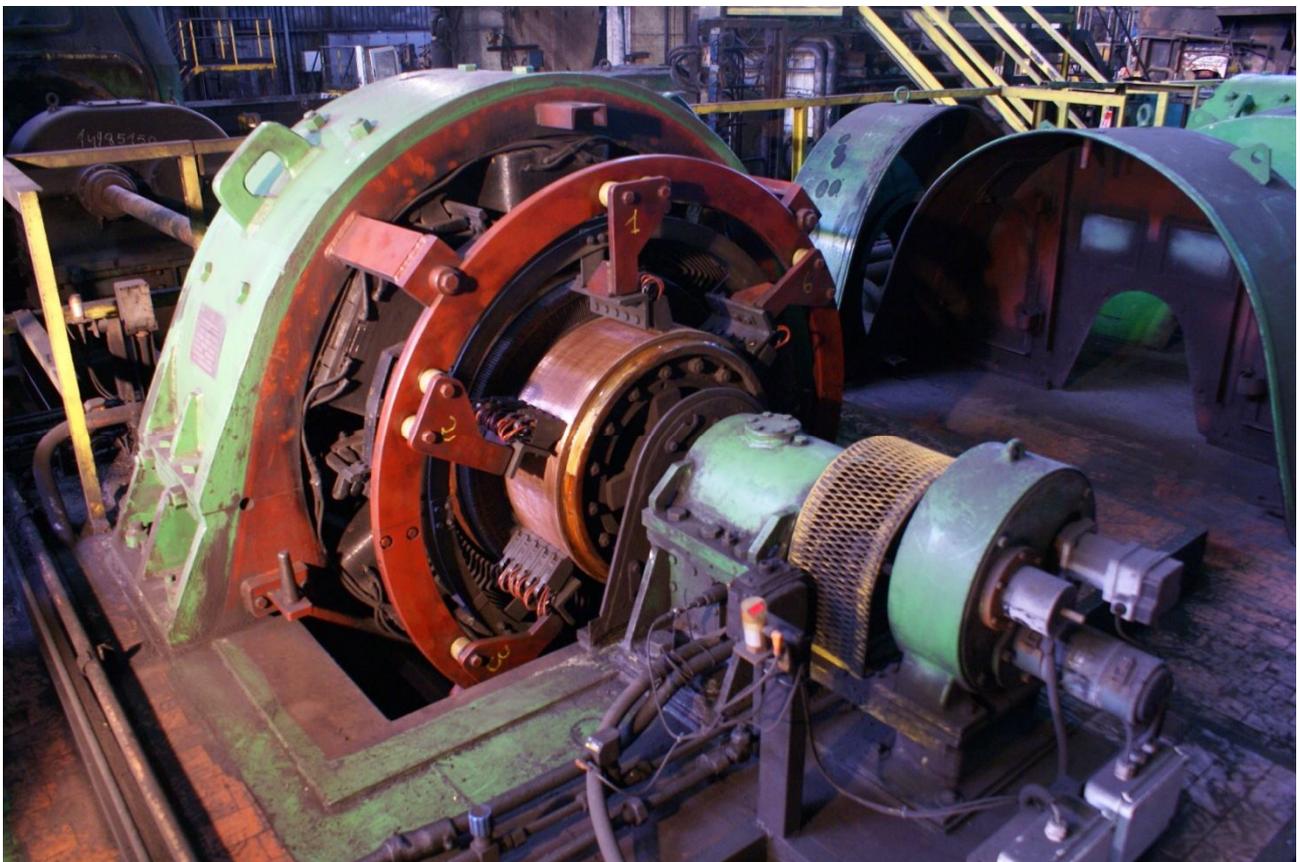


Fig. 31 – Interno di un motore di una gabbia del treno TMP

La trasmissione del moto alle gabbie avviene tramite un meccanismo di riduzione:

- ad assi paralleli per le gabbie orizzontali
- ad assi perpendicolari per le gabbie verticali

A causa della sezione decrescente del profilo durante la laminazione, la velocità di rotazione dei cilindri deve aumentare da monte a valle, pertanto è necessario un controllo in velocità dei motori.

Ciò avviene impostando le velocità di riferimento di ciascuna gabbia dal pulpito treno: in realtà l'operatore del pulpito immette unicamente il profilo da laminare: i dati relativi alle velocità di rotazione, previamente memorizzati, vengono quindi inviati al sistema di controllo.

Un'altra problematica da risolvere è la compensazione di eventuali variazioni di velocità tra due gabbie consecutive. Considerando due gabbie consecutive, ammettendo che quella a monte giri alla velocità teorica, si possono verificare due situazioni critiche:

- velocità della gabbia a valle superiore al limite teorico: la gabbia a valle lamina una quantità di materiale superiore a quella laminata da quella precedente, quindi il profilo si "stende"
- velocità della gabbia a valle inferiore al limite teorico: la gabbia a monte lamina più materiale di quanto ne riesce a laminare la gabbia a valle, quindi il profilo si "gonfia"

In entrambi i casi c'è il rischio di andare fuori tolleranza sulla sezione finale del profilo, è quindi evidente la necessità di utilizzare un controllo in anello chiuso capace di intervenire rapidamente sulla coppia in ingresso dei motori. Se questa soluzione è sufficiente per i profili di dimensioni elevate (maggiore di 60 mm per il tondo e 50 mm per il quadro), nei profili più piccoli, in cui la velocità di laminazione è ancora maggiore, una distensione del profilo può provocare pericolose lacerazioni del laminato così come un ingrossamento della sezione va di pari passo con un incurvamento del profilo dovuto a instabilità euleriana. Per risolvere questo problema, oltre al sistema ad anello chiuso descritto in precedenza, si utilizzano (solo nei punti particolarmente critici) le cosiddette anse: nel tratto critico il canale è interrotto da un tratto inclinabile, permettendo un'incurvatura del profilo, per cui:

- se la gabbia a valle gira più velocemente, prima che la sezione possa ridursi è necessario che la curvatura del profilo diminuisca, ciò permette di compensare variazioni di velocità entro un certo margine
- se la gabbia a valle gira più lentamente la curvatura aumenterà senza provocare instabilità o ingrossamento della sezione

1.3.4 Letti di raffreddamento

Questo sottoparagrafo contiene una descrizione sommaria del sistema di raffreddamento barre TMP. Per una descrizione più approfondita si rimanda al capitolo 3.

Dopo l'ultima gabbia della linea di laminazione l'impianto si divide in due parti speculari. Un sistema di scambio situato subito dopo la cesoia volante permette di passare da una a due vie a rulli, al termine delle quali si giunge alle due placche di raffreddamento.



Fig. 32 – Sistema di scambio tra linea di laminazione e placche di raffreddamento

In figura 32 è visibile la cesoia volante (in basso a sinistra, prima della scala), lo scambio (sotto la scala in giallo), e le due placche di raffreddamento (in alto a destra). Sopra le due vie a rulli, in prossimità delle placche, è situato un pulpito di controllo, che permette la gestione e la supervisione dei due letti.

Ciascuna placca di raffreddamento è costituita essenzialmente da un certo numero di tasche, create da un sistema di rastrelli fissi alternati a rastrelli mobili. Ciascuna barra, una volta giunta a fine corsa, viene frenata da un sistema di pattini (che si sollevano al momento del passaggio della barra

permettendo il distacco dalla via a rulli), e tramite i rastrelli mobili, che realizzano il movimento del cosiddetto “passo quadro”, viene sollevata e caricata sulla prima tasca.

Nella figura sottostante è visibile il meccanismo di arresto delle barre e posizionamento sui rastrelli.



Fig. 33 – Sistema di arresto barre e posizionamento sui rastrelli

Come si evince dalla figura, la via a rulli non è piana, ma inclinata in modo tale che la barra, per gravità, si posiziona nella zona più vicina alla prima tasca, proprio al di sotto dei pattini frenanti, pertanto la barra viene frenata per attrito nel momento in cui i pattini vengono sollevati.

Ciascuna placca di raffreddamento si divide in due settori:

- zona coibentata
- zona non coibentata

La prima parte della placca è coibentata superiormente (v. figura 33) e inferiormente. Le coperture superiori consistono in lamine di acciaio inox irrigidite da una travatura sostenuta da una serie di strutture a croce equidistanziate su tutta la lunghezza della cappa (circa 120 metri). Le coibentazioni

inferiori sono anch'esse lamine in acciaio inox, e sono appoggiate alla struttura di sostegno dei rastrelli fissi.

La coibentazione delle prime tasche della placca è necessaria per ottenere un raffreddamento controllato delle barre, in quanto mediamente, il range tra 950°C e 500°C contiene la fase di trasformazione da una struttura austenitica ad una struttura ferritico-perlitica, obiettivo di qualità dei semilavorati ottenuti al TMP. Un raffreddamento in aria comporterebbe il raggiungimento, nella migliore delle ipotesi, di una struttura parzialmente bainitica, indesiderata in quanto indice di fragilità dell'acciaio, se non addirittura, specie per acciai ad alto tenore di carbonio, martensitica.

Questo significa che le barre devono stare sotto la cappa finché non raggiungono una temperatura di 500°C, dopodiché il raffreddamento può proseguire in aria dato che ormai la trasformazione è avvenuta. Le coperture superiori sono regolabili in altezza, in modo da ottimizzare la velocità di raffreddamento in funzione di una determinata coppia profilo / qualità acciaio.

Nella figura in basso si vedono bene la zona coibentata e la zona libera per ciascuna delle due placche di raffreddamento.



Fig. 34 – Placche di raffreddamento durante la marcia del treno di laminazione

1.3.4 Taglio e confezionamento

Anche questa area impianto, al pari del sistema di raffreddamento barre, è suddiviso in due zone speculari autonome sotto l'aspetto gestionale. La maggior parte di quest'area è costituita dal sistema di movimentazione, aspetto che qui assume un'importanza maggiore rispetto agli altri settori del TMP. Il resto comprende, per ciascuna delle due zone speculari:

- due segatrici a disco
- una reggettrice automatica a nastro metallico

Il taglio viene effettuato, per ovvie ragioni di costi e produttività, su un fascio composto da un numero di barre funzione della dimensione e forma del profilo da lavorare. Questi fasci vengono formati nella zona finale della placca di raffreddamento (in figura 34 a pagina precedente sono visibili, in basso a sinistra, 3 fasci, di cui due pronti e uno in fase di completamento). Il layout dell'area taglio e confezionamento è riportato nella figura in basso:

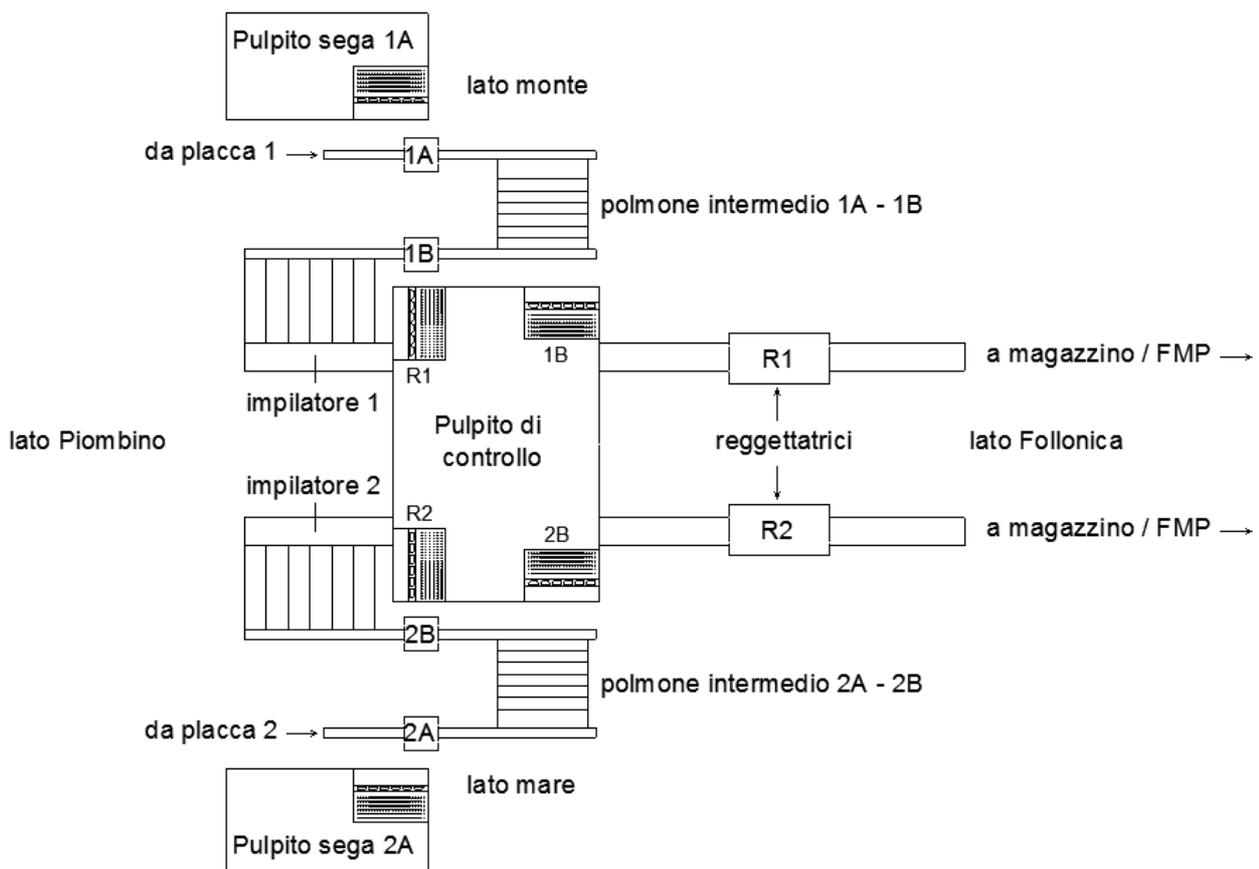


Fig. 35 – Layout taglio e confezionamento TMP

Ciascuna delle due zone speculari presenta due seghe in modo da sfruttare al massimo lo spazio disponibile per aumentare la produttività. Dato che il percorso delle barre è piuttosto complesso, è necessario curare in modo particolare la manutenzione di tutti i sistemi di movimentazione, che in questo caso svolgono un ruolo strategico ai fini della resa dell'impianto. Non da ultimo, risultano necessari più polmoni intermedi capaci di impedire, entro limiti ragionevoli, situazioni eventuali di starving o blocking della linea. Vi sono tre pulpiti di manovra, due comprendenti le postazioni di controllo e gestione delle segatrici 1A e 2A, e uno centrale contenente le postazioni di controllo e gestione delle reggiatrici e delle segatrici 1B e 2B.

In basso è visibile la segatrice 2A. Le segatrici dell'area taglio e confezionamento sono del tipo a disco rotante e lavorano a freddo, in modo da garantire una elevata finitura superficiale. La velocità di taglio e di avanzamento dipendono dal profilo da tagliare e dalla qualità acciaio (cioè dalla composizione chimica dell'acciaio). La temperatura del fascio non deve superare i 180 – 200 °C in quanto temperature superiori, pur garantendo comunque (entro certi limiti) un taglio a freddo, surriscalderebbero il disco. Quest'ultimo infatti viene raffreddato mediante aria compressa, pertanto questo sistema di raffreddamento ha un limite superato il quale si va incontro, nella migliore delle ipotesi, ad un'usura precoce della lama.

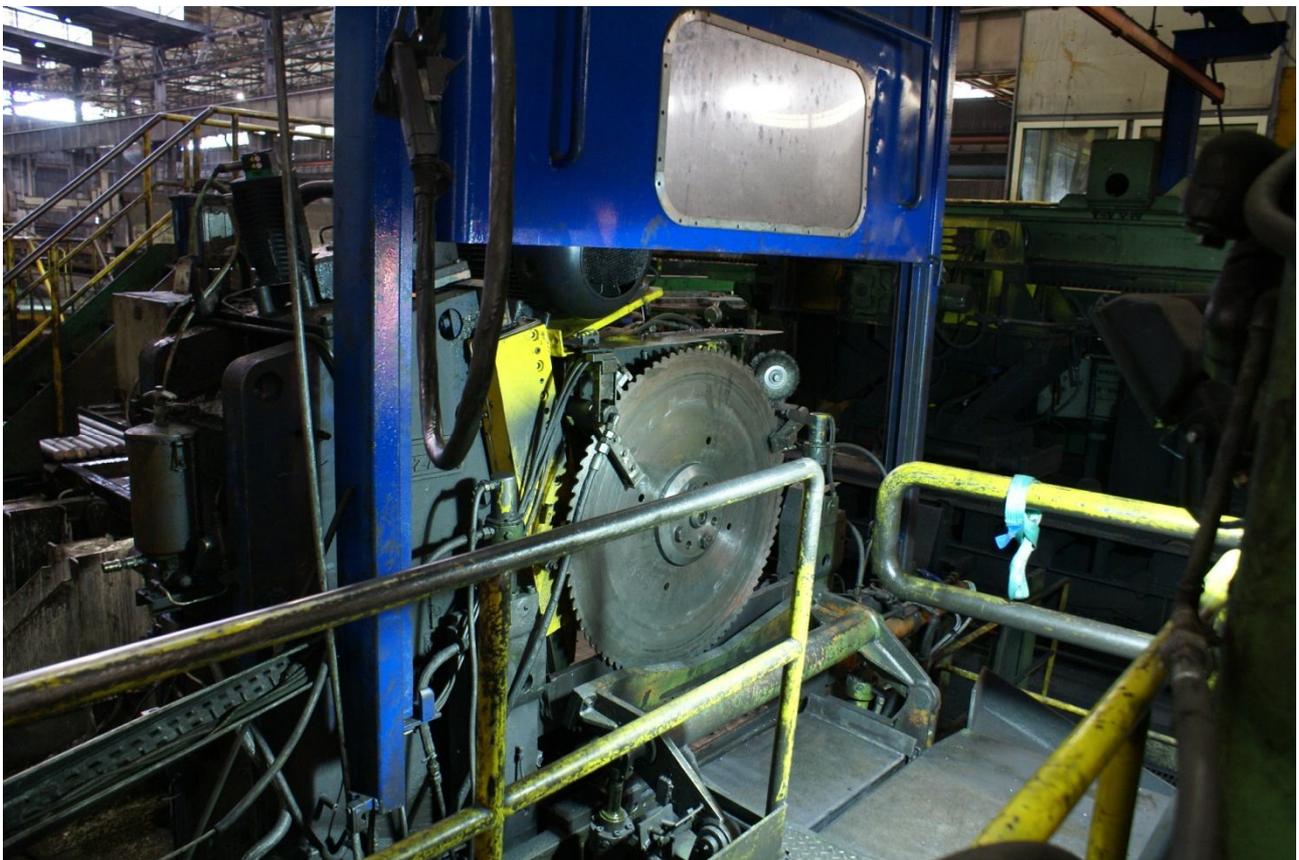


Fig. 36 – Segatrice 2A

Superata la segatrice B, il fascio viene inviato all'impilatore, costituito da un ascensore, un sistema di catene disposte in parallelo (che costituisce un polmone intermedio tra segatrici e reggettrici), e da un discensore che serve per formare il pacco che poi verrà inviato alle reggettrici.

In basso è visibile il magazzino intermedio sopra descritto:



Fig. 37 – Sistema di avanzamento barre da ascensore a discensore

Infine, le reggettrici automatiche sono visibili nella figura in basso:

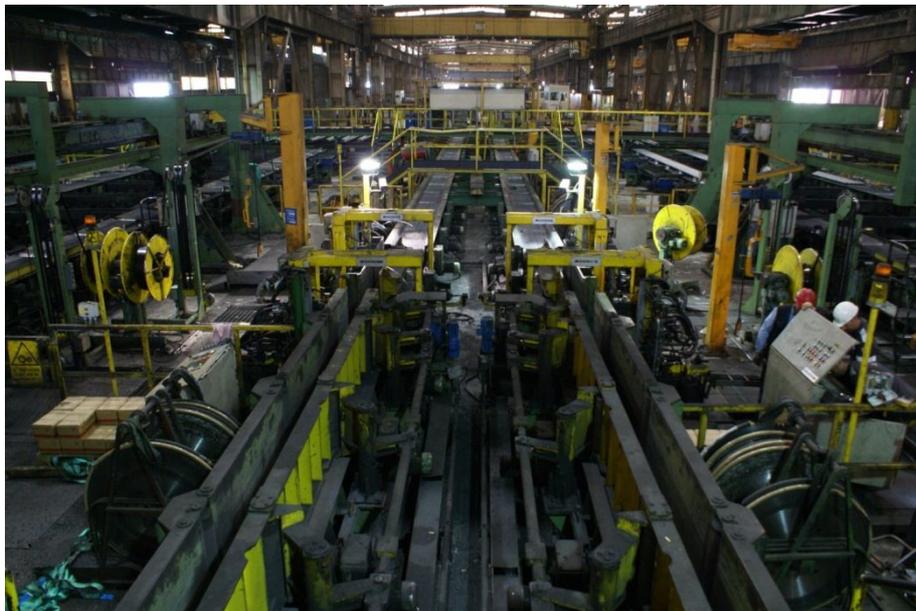


Fig. 38 – Reggettrici automatiche

2. IL RAFFREDDAMENTO DELLE BARRE D'ACCIAIO

2.1 Aspetti generali

Come anticipato nel sommario, durante il lavoro di tesi è stato eseguito un progetto di revamping del sistema di raffreddamento barre del TMP. Di tutto il processo di laminazione dell'acciaio, la fase di raffreddamento rappresenta un momento cruciale in quanto è qui che si viene a formare la struttura cristallina dell'acciaio. Gli obiettivi del raffreddamento sono essenzialmente due:

- grana cristallina fine e uniforme
- struttura ferritico – perlitica

Una struttura a grana fine, infatti, aumenta notevolmente la tenacità dell'acciaio: la frattura è resa difficoltosa dal fatto che deve cambiare continuamente direzione, mentre è facilitata nel caso di struttura a grana grossa, in virtù del percorso più “facile” lungo cui si può propagare la frattura stessa. L'uniformità strutturale è importante ai fini della resistenza a fatica del materiale: eventuali zone disuniformi possono fungere da innesco per cricche, che come noto si propagano ciclicamente fino a portare a rottura.

Il fatto di avere una struttura ferritico – perlitica garantisce:

- una struttura tenace e malleabile, contrariamente alla bainite e alla martensite che sono strutture fragili, quindi minori problemi di distorsioni e generazione di cricche
- una durezza bassa, che rende possibile effettuare lavorazioni meccaniche come tornitura, fresatura etc. senza dover ricorrere ad alcun tipo di trattamento termico (alcuni clienti infatti impongono nella specifica un valore limite di durezza superato il quale si ha declassamento)

In origine il sistema di raffreddamento controllato non c'era: in uscita dal treno, le barre venivano direttamente tagliate per mezzo di una cesoia, dopodichè venivano lasciate raffreddare in aria in un'area magazzino intermedio, e successivamente sottoposte a trattamento di ricottura. Questo modo di procedere, se da un lato non prevedeva tutti quegli oneri legati alla gestione / manutenzione dell'attuale sistema di taglio a freddo, dall'altra parte comportava un costo non indifferente legato al forno di ricottura, per cui, complessivamente, si può dire, considerato lo stato attuale dell'impianto, che il vecchio metodo di produzione era poco conveniente dal punto di vista economico – qualitativo.

Negli ultimi anni, una politica aziendale legata alle esigenze sempre più stringenti di riduzione dei costi a livello di stabilimento, ha spinto nella direzione di una serie di progetti di revamping

(ammodernamento impianti) volti a ridurre i costi e incrementare la resa produttiva degli impianti, nonché la qualità del prodotto unita a tempi di consegna sempre più competitivi.

Nel caso specifico del TMP, l'idea di ottenere una struttura ferritico – perlitica senza dover sottoporre le barre ad un processo di ricottura, bensì direttamente all'uscita del treno attraverso un raffreddamento controllato, cosa di cui si è sempre parlato ma che nessuno aveva mai effettivamente preso in considerazione, finalmente ha preso piede ed è diventata realtà, con la nascita dell'attuale sistema di raffreddamento barre.

Il presente progetto di revamping nasce dalla necessità, dettata dalla situazione contingente attuale, di un'ulteriore riduzione dei costi unita ad un miglioramento della qualità finale del semiprodotto, della produttività della linea e della flessibilità del sistema di raffreddamento controllato.

2.2 Dati di riferimento

L'analisi di questo progetto si basa sui dati consuntivi di produzione dell'anno 2011. I motivi che hanno fatto cadere la scelta su tale anno sono sostanzialmente la tipicità del mix produttivo e di scenario commerciale. È opportuno comunque far notare che la produzione consuntiva annua, così come l'utilizzazione dell'impianto, non risulta al massimo della capacità dell'impianto stesso a causa della particolare situazione contingente che si protrae dall'anno 2008. Di seguito si riporta la produzione netta in kg rispetto al mix famiglia / profilo relativa all'anno di riferimento.

Etichette di riga	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	50	51	52	53	54	55	56
Acciai Automatici				60.774	276.955	110.240	52.442	207.084		228.730	307.102	295.176	45.044	1.306.962	10.536	223.914	57.004	
Acciai Basso C											3.400.652			536.392				
Acciai da Bonifica al C	241.870	681.208	681.208		872.484	29.066		72.008		441.054	215.756	177.886		957.418	509.762		297.208	
Acciai da Bonifica Alto Legata	848.742	628.542	628.542	173.718	478.406	123.954	317.722	1.240.572		967.108	283.288	1.136.564	240.866	959.336	464.189		2.363.284	90.078
Acciai da Cementazione al C		132.128										10.176						
Acciai da Cementazione legata	358.266	514.946	742.596		537.556	335.278	10.516	3.566.210		120.656	399.426	1.234.072		289.972	53.684	257.572	5.595.062	
Acciai da Trattostatica		283.576						22.688		55.570		179.854					165.740	
Acciai di Qualità														53.172				
Acciai Legati generici		1.810.724									1.094.836							
Acciai Microlegati	132.916		381.500		318.912		229.132		414.536	28.684	364.672			965.296	91.988		942.780	
Acciai per Cuscinetti												230.994					6.778.150	
Acciai per Molle		149.546													21.246		10.664	41.272
Acciai Strutturali	30.614			162.476	131.454	27.988	24.702		10.756	43.808	10.180	48.498		145.196	75.146		46.352	
Acciai TT Induzione	24.404							69.436				64.312		21.616	20.112	49.906	175.100	
Totale complessivo	1.636.812	647.074	4.677.692	396.968	2.615.767	626.526	405.382	5.607.130	10.756	2.271.462	1.244.436	8.236.692	286.910	5.235.360	1.246.663	531.392	16.451.344	131.360
Etichette di riga	57	58	59	60	62	63	65	66	67	68	70	72	73	75	76	78	80	
Acciai Automatici	190.484	190.464		65.238	664.588	821.308	66.462	91.910	249788	456654	403036	325300	634118	488904		543412	175014	
Acciai Basso C																		
Acciai da Bonifica al C	156.844	538.212	84.834	248.866	84.034	1.480.796	64.502		256660	779414	330642	161580	1012744	241510	19696	407144	805686	
Acciai da Bonifica Alto Legata	105.482	600.274	161.708	2.749.464	13.714	1.437.576	2.582.385	79.862		1205346	2026863	20844	1094076	2481806		1215113	1762790	
Acciai da Cementazione al C	110.340									90902							16800	
Acciai da Cementazione legata	501.386	305.624	302.426	3.432.950	170.630	153.766	2.438.012		31414	415860	2360746	109790	181792	1058988		152112	3937416	
Acciai da Trattostatica						384.588			40618		112718		20132	767800		666700	1179936	
Acciai di Qualità	30.524				48.720				19552			38890				24430		
Acciai Legati generici		706.202		3.744.186						918614						17863296		
Acciai Microlegati		587.666		131.052		1.447.172	1.278.000	17.066	257060	297692	329694		1606216			557072	168442	
Acciai per Cuscinetti				3.690.088			4.260.856				1672920			245202			20420	
Acciai per Molle					69.978							13896				17980		
Acciai Strutturali	72.810			525.308	129.396		99.040		35166	165404	83272	752414	13928	509162		417734	328528	
Acciai TT Induzione	86.492			1.659.108		79.280	1.363.360			10674	156722		24690				148656	
Totale complessivo	1.254.362	2.928.442	548.968	16.246.260	1.181.060	5.804.486	12.152.599	145.868	890258	4340560	7476813	1422814	4589636	5793172	19696	21664993	8661688	
Etichette di riga	82	83	85	88	90	92	93	95	98	100	103	105	110	115	118	120	125	
Acciai Automatici	596218	849.024	71.116	552.024	249.884		658.656	29.824	147.558	142.014	161.366	623.392	407.760	812.884		365.016	640.772	
Acciai Basso C																		
Acciai da Bonifica al C		1.243.076	216.280	478.848	689.034	1.283.630	1.505.712	328.366	142.878	1.398.458	108.022	1.978.970	399.940	1.258.086		2.373.234	1.078.258	
Acciai da Bonifica Alto Legata		686.922	3.546.940	96.680	1.420.712		313.149	1.238.570		1.228.772		670.894	282.114	1.061.812		497.360	418.632	
Acciai da Cementazione al C										9.754								
Acciai da Cementazione legata	35350	155.480	828.732		1.732.580		156.106	4.004.120				844.890	1.160.628			1.674.018		
Acciai da Trattostatica		220.982	2.769.688		3.234.554	10.536		29.180	1.156.540	142.298	440.888	2.754.217	327.968	41.006	209.682		188.790	
Acciai di Qualità		28.896			37.094		119.882	66.192				184.446		113.340		82.048		
Acciai Legati generici				933.590					1.733.506						7.113.831			
Acciai Microlegati		1.333.772	720.650	86.684	1.169.180		2.429.392	1.345.344	14.022	204.018		761.876	142.096	398.474		15.730	249.202	
Acciai per Cuscinetti																		
Acciai per Molle			35.606															
Acciai Strutturali	309102	130.978	96.054	236.686	422.774		418.428	99.776	21.270	931.092		615.714	176.396	167.872		227.538	566.936	
Acciai TT Induzione		15.712			15.986			19.598	297.820			17.282					140.676	
Totale complessivo	940670	4.664.842	8.285.066	2.384.512	8.971.798	1.294.166	5.445.219	4.405.530	2.215.340	9.372.588	411.686	6.136.352	5.323.151	4.140.436	7.154.837	5.605.302	3.142.590	

Tab 1 – Produzione anno 2011

Nell'ottica del progetto di revamping, essendoci molti mix famiglia / profilo, studiare tutte le casistiche comporterebbe una mole di lavoro eccessiva, pertanto è bene concentrarsi solo sulle coppie significative. Quindi, per prima cosa, è necessario individuare le famiglie acciaio strategiche, ovvero quelle di maggiore interesse qualitativo – commerciale e con i volumi di produzione maggiori, in modo da focalizzare l'attenzione solo su di esse. Dalla tabella precedente è possibile ricavare il seguente grafico a torta, in cui è visibile la produzione complessiva dell'anno 2011 per famiglie acciaio:

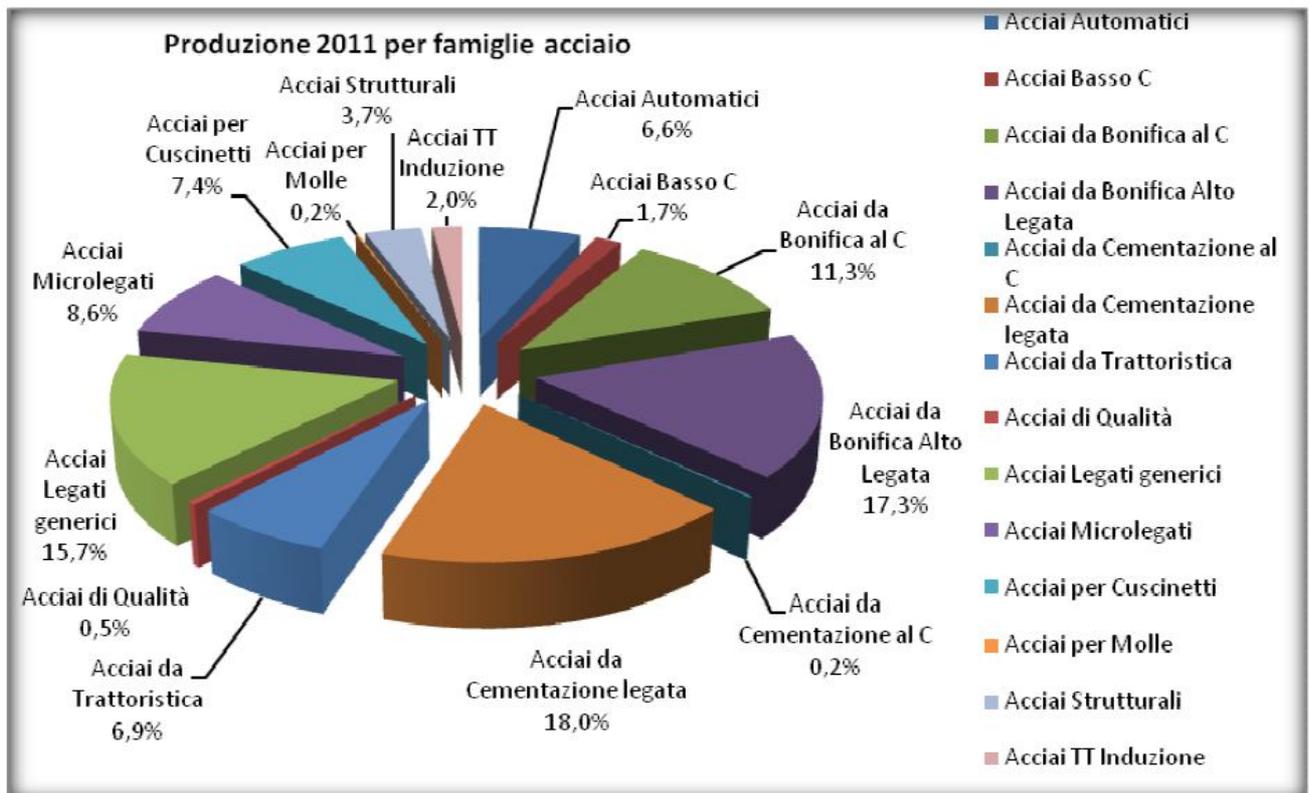


Fig. 39 – Produzione 2011 per famiglie acciaio

Le famiglie prese in considerazione nel presente progetto di revamping sono le seguenti due:

- acciai da cementazione legata (18,0 % della produzione 2011)
- acciaio da bonifica alto – legata (17,3 % della produzione 2011)

Queste famiglie, oltre a presentare tutta una serie di criticità di varia natura (discusse in seguito), sono anche quelle che vincolano maggiormente la produttività treno in quanto impongono una cadenza di laminazione (e quindi anche di sfornamento) legata al vincolo di stazionamento sotto copertura fino al raggiungimento del limite di 500°C (limite necessario in modo da garantire che la trasformazione di fase avvenga sotto copertura in maniera controllata). Oltre a limitare la produttività delle aree treno e forno, aumentano notevolmente i costi di esercizio (principalmente

consumo di gas e di corrente elettrica). Questo significa che un progetto di revamping studiato per le famiglie acciaio più critiche permetterebbe non solo di incrementare la produttività e la qualità del semiprodotto, ma anche di ridurre quantomeno i costi di esercizio. Naturalmente un revamping comporta sempre una spesa iniziale di solito non trascurabile, per cui un'altra necessità sarà quella di una valutazione di costo delle varie soluzioni studiate al fine di poter scegliere la migliore in termini di rapporto costi – benefici attesi.

Inoltre, dalle due famiglie prese in considerazione, dovranno essere scelte due qualità acciaio, da intendere come “rappresentative” di ciascuna famiglia, sulla base delle quali studiare il sistema di raffreddamento.

2.3 Criticità qualitative attuali

I requisiti fisico – meccanici richiesti dai trasformatori finali (forgiatori, stampatori, etc.) ai fornitori di prodotti lunghi in barre laminate, sono ottenuti generalmente mediante trattamenti termici preliminari quali la ricottura di cesoiabilità, la ricottura di normalizzazione etc. finalizzati ad uniformare e/o addolcire la microstruttura dell'acciaio, con benefici in termini di cesoiabilità a freddo e di lavorabilità, requisiti chiave per le successive fasi di verticalizzazione del prodotto.

Al TMP l'impiego di letti con coperture coibentanti per il controllo della velocità di raffreddamento delle barre a valle della laminazione, rende tecnologicamente possibile la produzione di materiali in barre che sviluppino, direttamente in placca, microstrutture ferritico – perlitiche idonee per le successive lavorazioni, con ridotta necessità di ricorrere a trattamenti termici fuori linea e vantaggi sensibili in termini di semplificazione dei cicli, riduzione dei costi e maggiore rapidità di consegna.

Dal punto di vista qualitativo, lo scopo della cappa coibentata è, infatti, l'ottenimento di una sorta di “effetto forno” che rallenti il raffreddamento delle barre diminuendo la dispersione di calore radiante e l'asportazione di calore da parte dell'aria ambiente. Ciò permette di ottenere una riduzione della velocità media di raffreddamento che sposta a destra la curva di raffreddamento sul grafico CCT aumentando in una certa misura l'abbondanza della fase desiderata (ferritico – perlitica) rispetto alle strutture di tempra martensitico – bainitiche.

Nelle figure successive sono riportati alcuni risultati sperimentali di una campagna di prove condotta nel 2003 dopo la sostituzione della copertura superiore in Cawool con una copertura in acciaio inox riflettente. Sono visibili le microstrutture ferritico – perlitica, bainitica e casi misti.

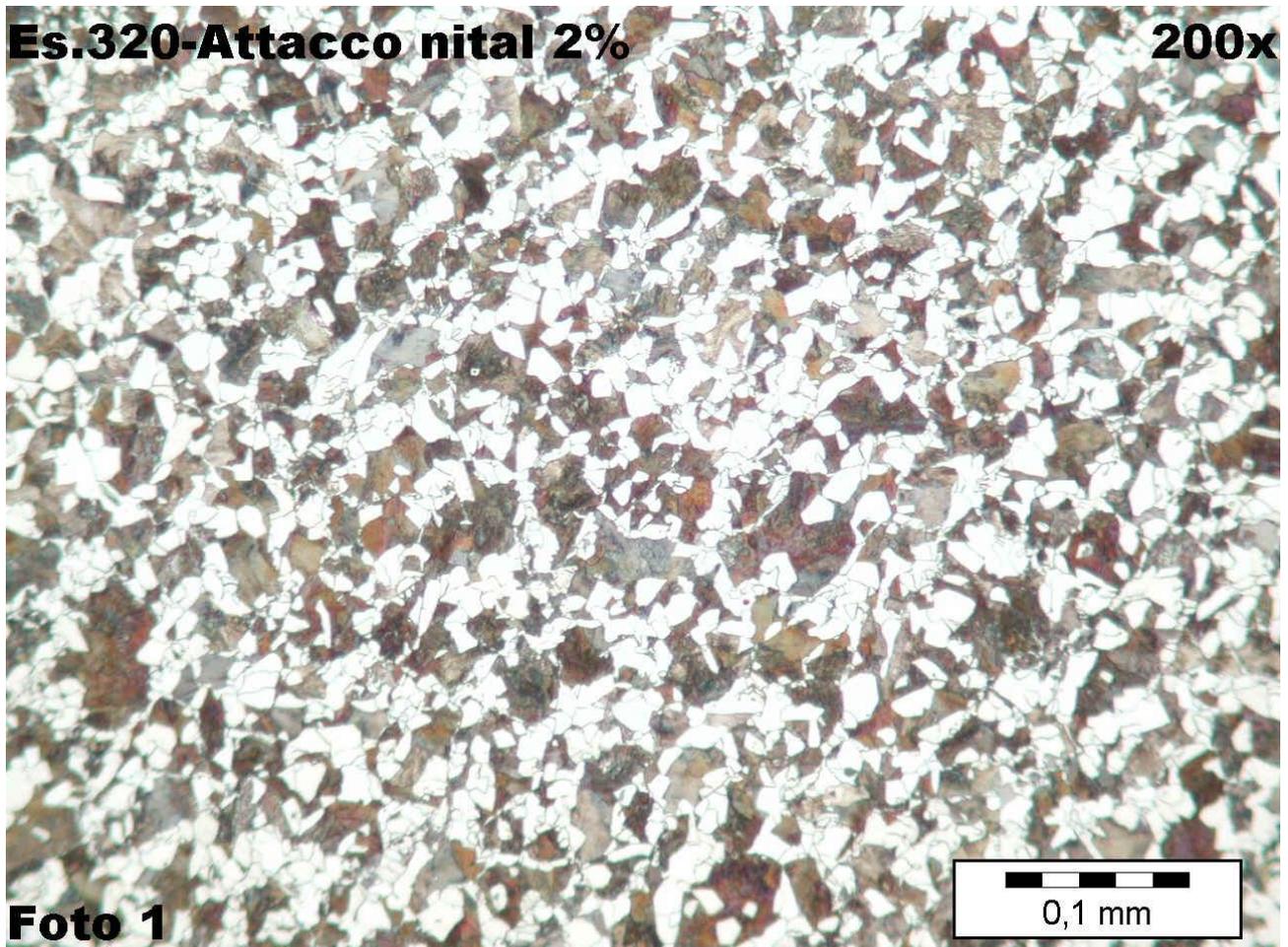


Fig. 40 – Controllo della microstruttura eseguita su un campione tondo ricavato da un quadro lato 70 mm, marca VHV80 (38MnV6). L'esame microscopico ha permesso di rilevare una struttura omogenea su tutta la sezione costituita da perlite e ferrite.

Le due figure successive si riferiscono ad un'indagine metallurgica condotta su un campione tondo ricavato da un profilo tondo di diametro 60 mm, marca CH10S-H. L'esame microscopico, eseguito sulla sezione trasversale del tondo, ha permesso di rilevare una struttura omogenea su tutta la sezione costituita da perlite e ferrite con tracce di bainite nella zona centrale (figure 41 e 42 a pagina seguente).

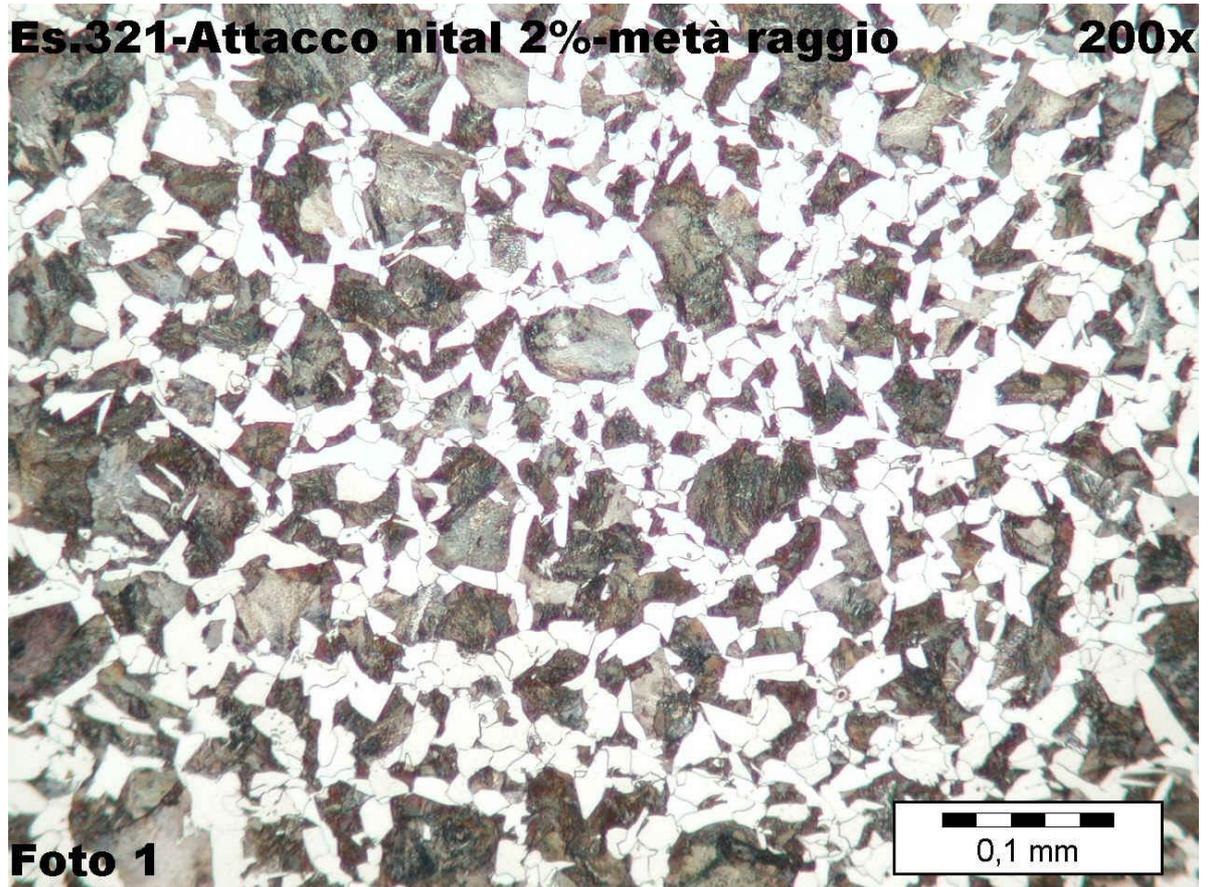


Fig. 41 – Struttura ferritico – perlitica in una zona a metà raggio

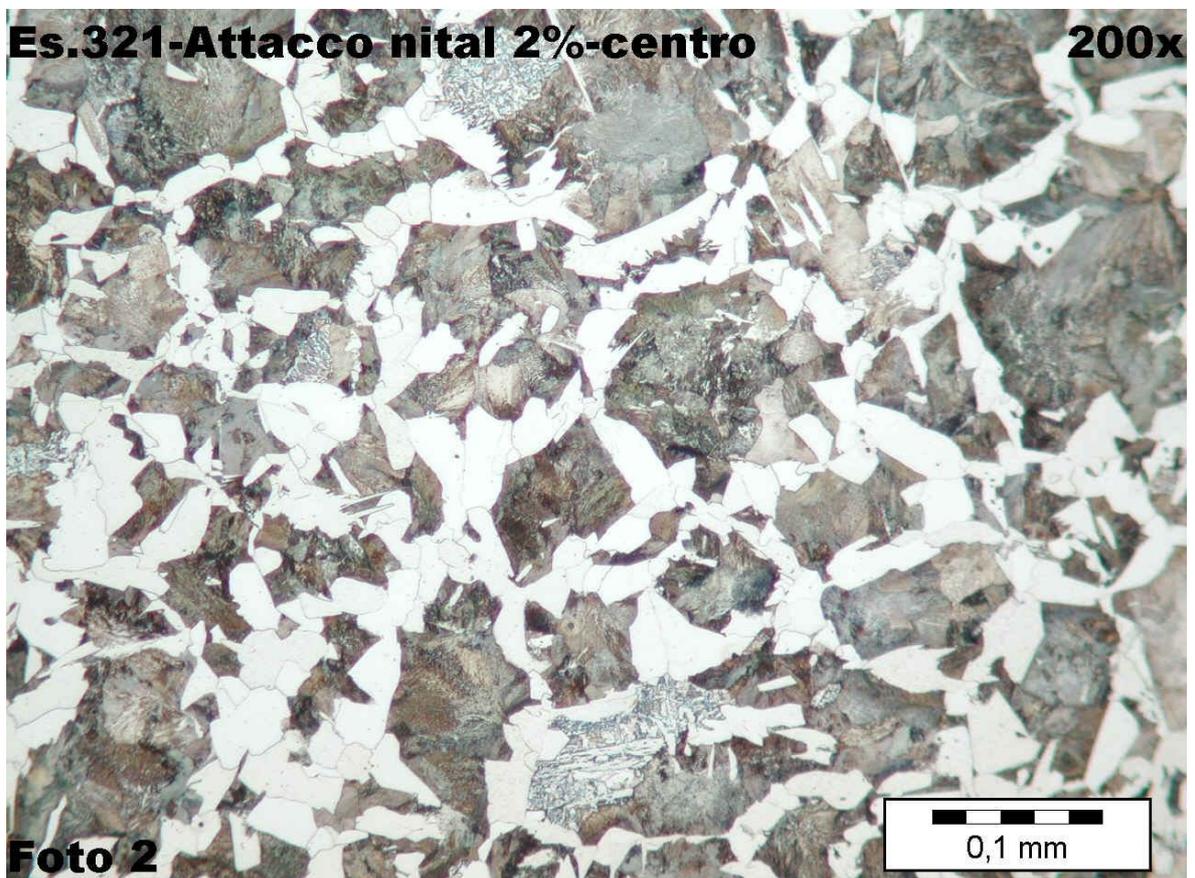


Fig. 42 – Struttura ferritico – perlitica con tracce di bainite nella zona centrale

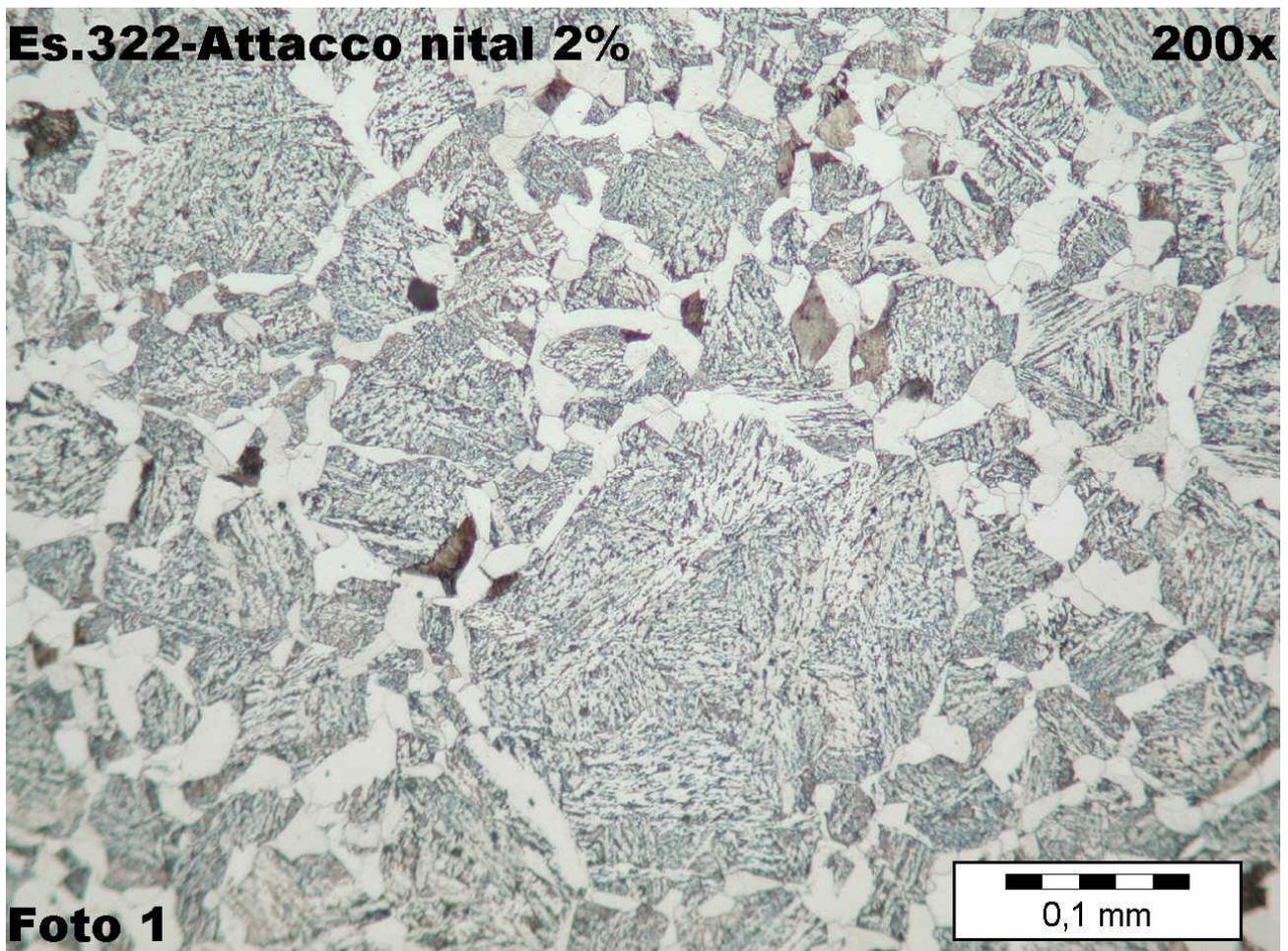


Fig. 43 – Controllo della microstruttura eseguita su un campione tondo ricavato da un quadro lato 60 mm, marca VCM17S (20MnCr5). L'esame microscopico ha permesso di rilevare una struttura omogenea su tutta la sezione costituita da bainite, ferrite + tracce di perlite

Un altro aspetto importante riguardante il sistema di raffreddamento controllato consiste nella regolazione dell'altezza della cappa superiore: con un corretto posizionamento delle coperture si può ottenere una maggiore uniformità di raffreddamento migliorando l'omogeneità nella distribuzione del calore e riducendo a livelli accettabili il fenomeno conosciuto come "effetto sinusoidale". Ciò a patto che il potere riflettente delle coibentazioni si conservi nel tempo (in realtà col tempo si ossidano leggermente perciò la riflettività diminuisce, pertanto è necessaria una manutenzione periodica).

L'effetto sinusoidale è dovuto all'instaurarsi di correnti convettive che determinano un andamento ciclico di temperatura simile ad una sinusoide con i minimi in corrispondenza delle aperture e i massimi all'interno delle cappe riflettenti.

Nella figura in basso è visibile un'apertura, cioè uno spazio vuoto dovuto al fatto che, come meglio illustrato nel capitolo 3, il letto di raffreddamento è suddiviso longitudinalmente in più sezioni, e nel caso delle cappe, questa suddivisione comporta la necessità di lasciare un certo margine di sicurezza tra una sezione e la successiva.

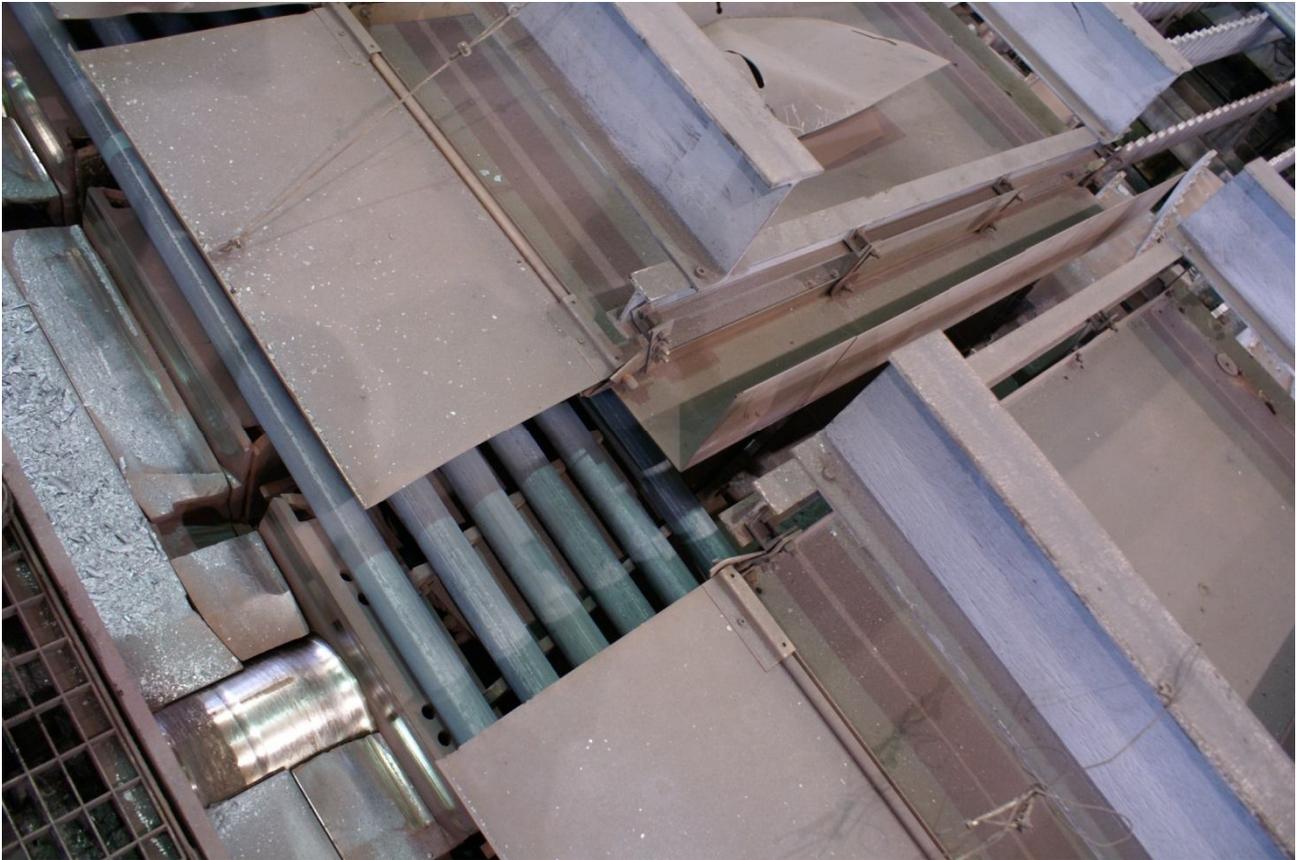


Fig. 44 – Interruzione della cappa nel passaggio da una sezione all'altra della placca

Questa conformazione del sistema di raffreddamento è tale da generare correnti convettive il cui effetto si manifesta attraverso una distribuzione di temperatura simil sinusoidale, secondo lo schema (qualitativo) rappresentato in figura:

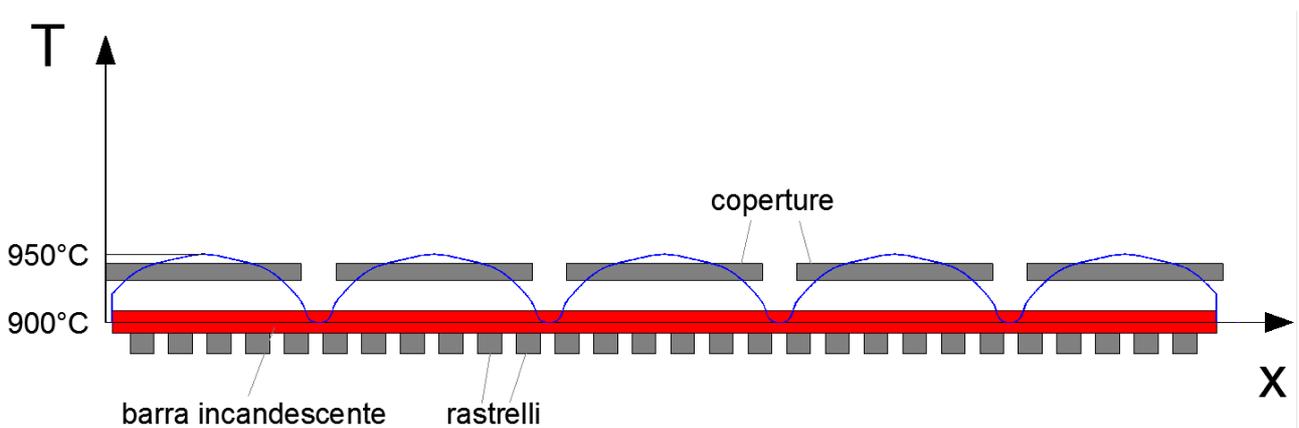


Fig. 45 – Effetto sinusoidale (andamento qualitativo)

Questo effetto si può quantificare, in maniera approssimativa, osservando le foto termografiche della placca, eseguite seguendo una laminazione dall'inizio. Quello che si nota è che ciascuna barra mantiene una temperatura costante nel senso della lunghezza (al limite si può avere un aumento di temperatura dalla coda verso la testa) soltanto finché le barre in placca sono poche; quando il loro numero diventa significativo si osserva invece un andamento ciclico di temperatura simile ad una sinusoide, con i minimi in corrispondenza delle aperture ed i massimi dove ci sono le piastre inox riflettenti.

Tale fenomeno è chiaramente dovuto all'instaurarsi di correnti convettive a causa della notevole massa termica presente in placca. Le disuniformità cicliche nel profilo di temperatura delle barre possono arrivare a parecchie decine di gradi, ma in tal senso la presenza di una cappa sufficientemente riflettente e "chiusa" dovrebbe svolgere un'azione omogeneizzante, tenuto anche conto del calore di trasformazione o ricalescenza.

In basso è riportata una termografia eseguita durante la laminazione di un quadro lato 70 mm, marca CM16S: le barre in alto sono le ultime giunte in placca, quindi quelle a temperatura maggiore, in cui è evidente l'effetto sinusoidale, con una differenza di temperatura intorno a 40°C.

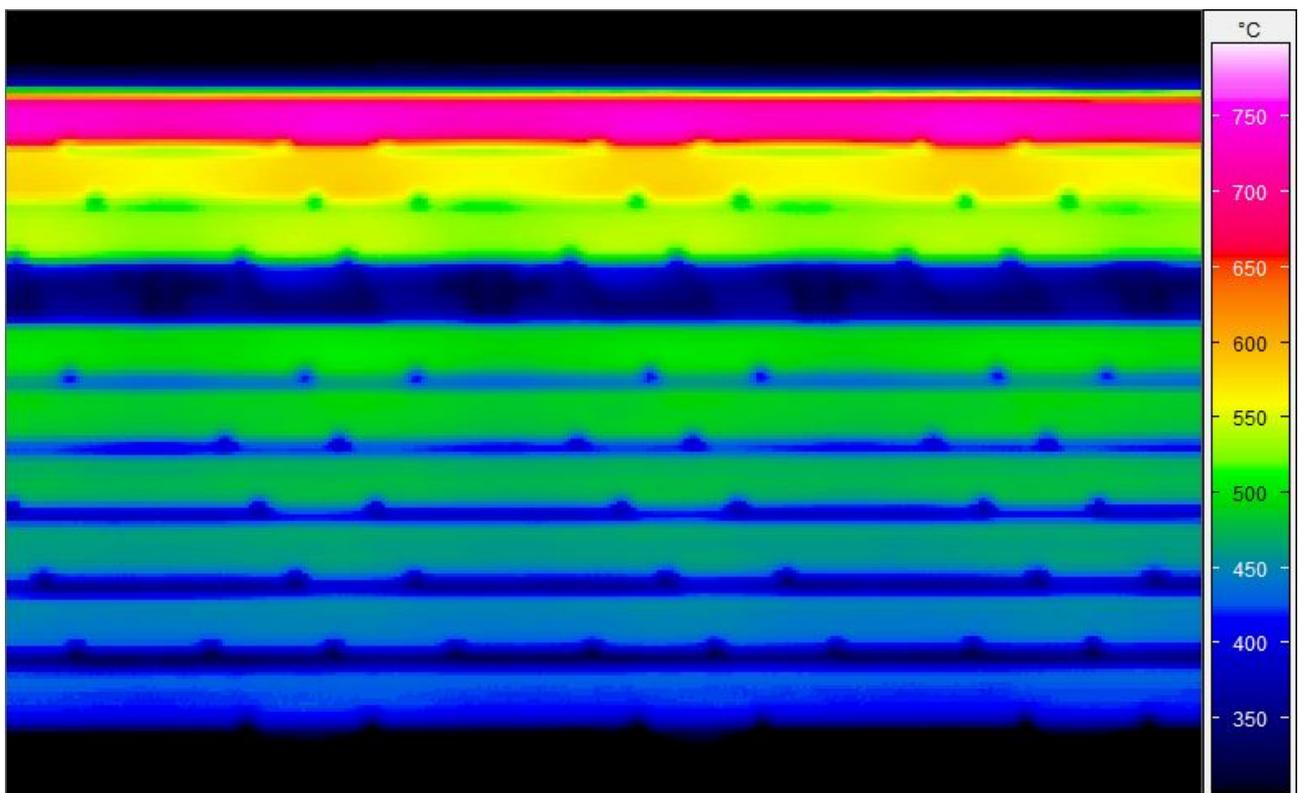


Fig. 45 – Immagine termografica del raffreddamento di barre quadro lato 70 mm, CM16S

Con l'attuale sistema di raffreddamento, nel carnet di qualità acciaio fornite in barre laminate possono distinguersi tre gruppi acciaio in funzione delle richieste in termini di cesoiabilità / durezza sul laminato:

- acciai che non hanno necessità di raffreddamento controllato ai fini della durezza / struttura interna (ad esempio gli acciai al carbonio risolforati, i quali formano pressoché solo ferrite anche se esposti ad elevate velocità di raffreddamento)
- acciai su cui si deve garantire una durezza inferiore a 240 HB (limite per la cesoiabilità preso in considerazione dal mercato attuale) e strutture idonee alla cesoiatura. Tale risultato può essere ottenuto direttamente sul letto di raffreddamento per mezzo di una pratica operativa studiata ad hoc, oppure con successivo ciclo di ricottura qualora la durezza / struttura ottenuta non rispetti la specifica del cliente
- acciai per i quali i clienti richiedono una durezza minima e che pertanto prevedono un raffreddamento rapido (generalmente questa tipologia di acciai prevede un'altezza delle cappe secondo pratica operativa pari a 60 mm, attuale altezza massima delle cappe).

Nel reparto sono state messe a punto pratiche operative che ottimizzano la gestione delle coperture in funzione del profilo (forma e dimensione), della qualità acciaio e delle specifiche richieste dal cliente. I parametri controllati sono i seguenti:

- altezza delle coperture
- vincolo di temperatura in uscita dalle coperture (se la famiglia acciaio è critica per il raffreddamento)
- cadenza di deposizione delle barre sul letto di raffreddamento (direttamente legata alla cadenza di sfornamento delle billette)

L'altezza delle coperture è stabilita dalla pratica operativa PO-TMP-014-1 "Treno TMP – Modalità di raffreddamento in placche coibentate", in cui sono riportate le seguenti tabelle:

DIAMETRO mm	ALTEZZA COPERTURE cm
125 - 101	28
100 - 92	26
91 - 76	24
75 - 60	22
59 - 38	20

Tab. 2 – Altezza coperture per tondo

LATO mm	ALTEZZA COPERTURE cm
100 - 80	28
86 - 80	26
76 - 53	24
52 - 40	20

Tab. 3 – Altezza coperture per quadro

Il vincolo di temperatura in uscita dalle coperture è illustrato nella disposizione di lavoro DL_04_1_3_TMP “Gestione placche”. L’operatore del ponte a cavallo, che gestisce le placche di raffreddamento treno TMP, ha il compito (coadiuvato dal CT di turno) di controllare le temperature di uscita coperture e di gestire la marcia del treno basandosi sulle stesse in funzione della tabella seguente, in cui è riportata la regolamentazione tassativa sulla laminazione di marche acciaio, individuate dalla Qualità di Area (QA TMP), durante il raffreddamento in placca.

FAMIGLIA ACCIAIO			CONDIZIONE DI LAMINAZIONE SOTTO COPERTURE		
TIPO ACCIAIO	Anche in presenza di W....V....Z....	Laminazione standard	Fuori standart uscita coperture < 500 °C	Altezza coperture a 60 cm	Profilo
strutturali e di qualità	AF CC IC JG QC QG QZ XC	Tutti Tutti =< IC40 Tutti =< QC40 Tutti Tutti Tutti	> IC40 > QC40		Tutti
bonifica legata e al carbonio	BC BG BD BK BT BM IG	=< BC40 =< BG30 =< BK30 W-VBM35S-1 Casartelli =< IG40	> BC40 > BG30 Tutti > BK30 Tutti Tutti > IG41		Tutti
cementazione legata	CD CH CM CT CK CN		Tutti Tutti Tutti Tutti Tutti Tutti		Tutti
Trattoristica	TC TD TH TK TS	=<TC40 =< TD30 =<TH30 =<TK30 =<TS30	>TC40 > TD30 >TH30 >TK30 >TS30		Tutti

Tab. 4 (continua a pagina seguente) – Gestione delle placche

Microlegati	HV	=< HV45	> HV45	VHV90S, VHV90S-1, VHV90S-2 solo cliente Berco	Tutti
Cuscinetti	KC KK		Tutti Tutti		Tutti
Molle	MK MN MV MS		Tutti Tutti Tutti Tutti		Tutti
Automatici	LS	Tutti			Tutti
Sfere / GSI	PD - PK		Tutti		Tutti

Tab. 4 – Gestione delle placche

La pratica operativa PO-TMP-014-1 “Treno TMP – Modalità di raffreddamento in placche coibentate” stabilisce, infine, la cadenza di sfornamento della linea di laminazione, distinguendo tra:

- cadenza di sfornamento standard
- cadenza di sfornamento fuori standard

Ciò significa che, laddove possibile, è necessario attenersi ai seguenti valori standard:

Tipo profilo	Dimensione (mm)	Cadenza di sfornamento standard (s)
tondo	125 - 110	140
	105 - 55	130
	54 - 50	140
	48 - 38	160
quadro	100 - 80	130
	79 - 55	120
	54 - 47	130
	46 - 40	150

Tab. 5 – Cadenze di sfornamento standard

Nel caso in cui il rispetto di tale tabella comporti il mancato rispetto del vincolo di temperatura prescritto all’uscita delle placche (tabella 4), è necessario adeguare la cadenza di sfornamento in modo tale da rispettare tale vincolo, per questa ragione si parla di cadenza di sfornamento fuori standard.

Nella routine di lavorazione possono verificarsi deviazioni dalla pratica operativa dovute principalmente ai seguenti fattori:

- ritardi / fermate treno (dovute a incagli, interventi manutentivi non previsti, saturazione impianto a valle etc.)
- schemi di laminazione non ottimizzabili per ragioni di mercato (marche / profili in ordine con requisiti di raffreddamento diversi)
- errori umani di regolazione altezza coperture (attualmente il sistema di regolazione è di tipo manuale, pertanto in caso di contestazione da parte del cliente non è disponibile, nello storico delle vendite, l'altezza cappe per quel lotto di produzione, proprio perché il sistema di regolazione, essendo manuale, non registra la posizione delle coperture sul tracking delle barre)

Qualsiasi evento che comporti una deviazione dalla pratica operativa standard potenzialmente può generare anomalie qualitative sul prodotto laminato. Gli eventi che più impattano sugli aspetti qualitativi sono i seguenti:

Laminazione a passo irregolare dovuta a fermate treno per eventuali problemi a monte del letto di raffreddamento: con un passo regolare, ogni barra risulta affiancata da un certo numero di altre barre come definito dalla pratica operativa e questo comporta un raffreddamento a velocità ridotta poiché ogni singola barra risente dell'effetto riscaldante delle barre adiacenti. L'energia radiante assorbita da una barra posta vicino ad un'altra che a sua volta irradia dipende, come meglio illustrato nel capitolo 5, dall'angolo di visuale, nel senso che all'aumentare di quest'ultimo (con barre più vicine) aumenta la percentuale di energia radiante trattenuta dalla barra in esame, la quale si raffredderà più lentamente. Quindi, a parità di diametro, una barra subito adiacente ad un'altra viene investita da una quantità di calore radiante superiore rispetto ad una che ha come barra più vicina una situata ad n tasche di distanza. La laminazione a passi irregolari potrebbe quindi comportare una deviazione dalla curva di raffreddamento ottimale con conseguente pericolo di formazione di strutture indesiderate, durezza fuori specifica e profilo fuori tolleranza (distorsioni).

Altezza delle coperture non idonea al profilo: si consideri una barra tonda di diametro D, lunghezza L e densità ρ ad una temperatura T in fase di raffreddamento in aria libera. Trascurando la convezione, l'equazione di bilancio termico si semplifica in questo modo:

$$mc \frac{dT}{dt} = \varepsilon \sigma S (T^4 - T_{amb}^4)$$

in cui m è la massa della barra, c è il calore specifico, T è la temperatura della barra all'istante t , ε è l'emissività, σ è la costante di Boltzmann e T_{amb} è la temperatura ambiente.

Esprimendo m ed S in funzione delle dimensioni della barra e svolgendo i calcoli, si ottiene:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{4\varepsilon\sigma}{\rho c} \frac{(T^4 - T_{amb}^4)}{D^3}$$

Il primo membro non è altro che la velocità di raffreddamento della barra, per cui ciò significa che questa velocità è inversamente proporzionale al cubo del diametro della barra stessa.

Poiché ciascuna qualità acciaio deve seguire una ben determinata curva di raffreddamento a prescindere dalle dimensioni del profilo, l'altezza della cappa dovrà essere impostata tenendo conto di quest'ultimo aspetto. Tuttavia, è facile rendersi conto che un errore di regolazione avrà conseguenze più gravi nel caso dei profili piccoli, proprio a causa del legame inverso tra velocità di raffreddamento e diametro al cubo.

Vale la pena di sottolineare che non tutti gli acciai laminati nell'impianto avranno necessità di un raffreddamento controllato ai fini della struttura interna, come ad esempio gli acciai al carbonio risolforati, di cui si è già discusso in precedenza. Per questi acciai resta comunque valido il vincolo costituito dalla temperatura di arrivo alle segatrici (non oltre 180 – 200°C), per cui non è comunque pensabile un aumento eccessivo della produttività rispetto agli acciai più critici.

La questione evidentemente sarà oggetto di approfondimento in sede di realizzazione dei sistemi di controllo e delle logiche di automazione del processo.

Non da ultimo, è utile ricordare che l'altezza della cappa deve essere calcolata in modo da ridurre al minimo la quantità di aria "fredda" sotto le coperture, in modo da minimizzare le correnti convettive uniformando la temperatura delle barre attraverso il cosiddetto "effetto forno". In questo modo anche l'effetto sinusoidale risulterebbe sensibilmente ridotto.

Scarsa efficienza per usura del potere riflettente della carpenteria schermata in acciaio inossidabile e dei lamierini fissi: sostanzialmente, quando il potere riflettente della coibentazione diminuisce, si riduce la percentuale di energia radiante trattenuta da ciascuna barra presente sotto cappa, pertanto ciò favorisce un aumento della velocità di raffreddamento.

Stazionamento fuori copertura o mancato rispetto del vincolo di uscita dalle coperture: queste due eventualità possono determinare raffreddamenti più rapidi con conseguente ottenimento di strutture

bainitiche / martensitiche e superamento del limite di durezza specificato dal cliente. Le principali cause possono essere:

- saturazione degli impianti a valle
- errori umani
- malfunzionamento dei pirometri che rilevano la temperatura in uscita dalle coperture

Permanenza a temperature elevate per tempi lunghi: l'ingresso sotto copertura ad una temperatura nettamente superiore a 900°C e quindi la permanenza prolungata a tali temperatura per effetto del raffreddamento controllato può comportare l'ingrossamento della grana cristallina con conseguenze negative sulla tenacità dell'acciaio.

Cause ambientali (correnti d'aria), stagionalità: una delle componenti fondamentali del raffreddamento in placca è costituita dallo scambio termico per convezione tra acciaio e aria. La presenza di correnti d'aria molto forti o semplicemente una temperatura dell'aria ambiente molto bassa accelera l'asportazione di calore annullando l'effetto forno delle coperture.

Cause legate alla composizione dell'acciaio ed ai procedimenti a monte del treno di laminazione: a volte la qualità finale dell'acciaio prodotto può dipendere da anomalie già presenti nel semiprodotto di partenza. Tali anomalie dipendono principalmente da:

- elevato contenuto di elementi segreganti
- malfunzionamento del sistema di stirring
- elevata temperatura di colaggio

Verso la fine degli anni novanta i maggiori produttori di acciaio confermarono l'importanza del controllo dei flussi del fluido e del fenomeno di agitazione (stirring) nella produzione in colata continua per imprimere nel materiale notevoli qualità. In particolar modo è approvato che oltre a ridurre notevolmente le segregazioni durante la solidificazione, il flusso gioca un ruolo importante per quanto riguarda l'eliminazione delle inclusioni e delle porosità. Naturalmente, se il materiale presenta già in partenza un elevato contenuto di elementi segreganti, esistono maggiori possibilità di generazione di anomalie qualitative in uscita dalla colata continua, così come in caso di malfunzionamento del sistema di stirring del bagno fuso. Infine, è necessario tenere sotto controllo la temperatura di colaggio in quanto valori superiori a 1700°C generalmente aumentano l'ossidazione, "sporcando" il bagno fuso.

Tutte le cause precedentemente descritte, che portano ad un raffreddamento anomalo delle barre, sono riassunte nel diagramma di Ishikawa riportato a pagina seguente.

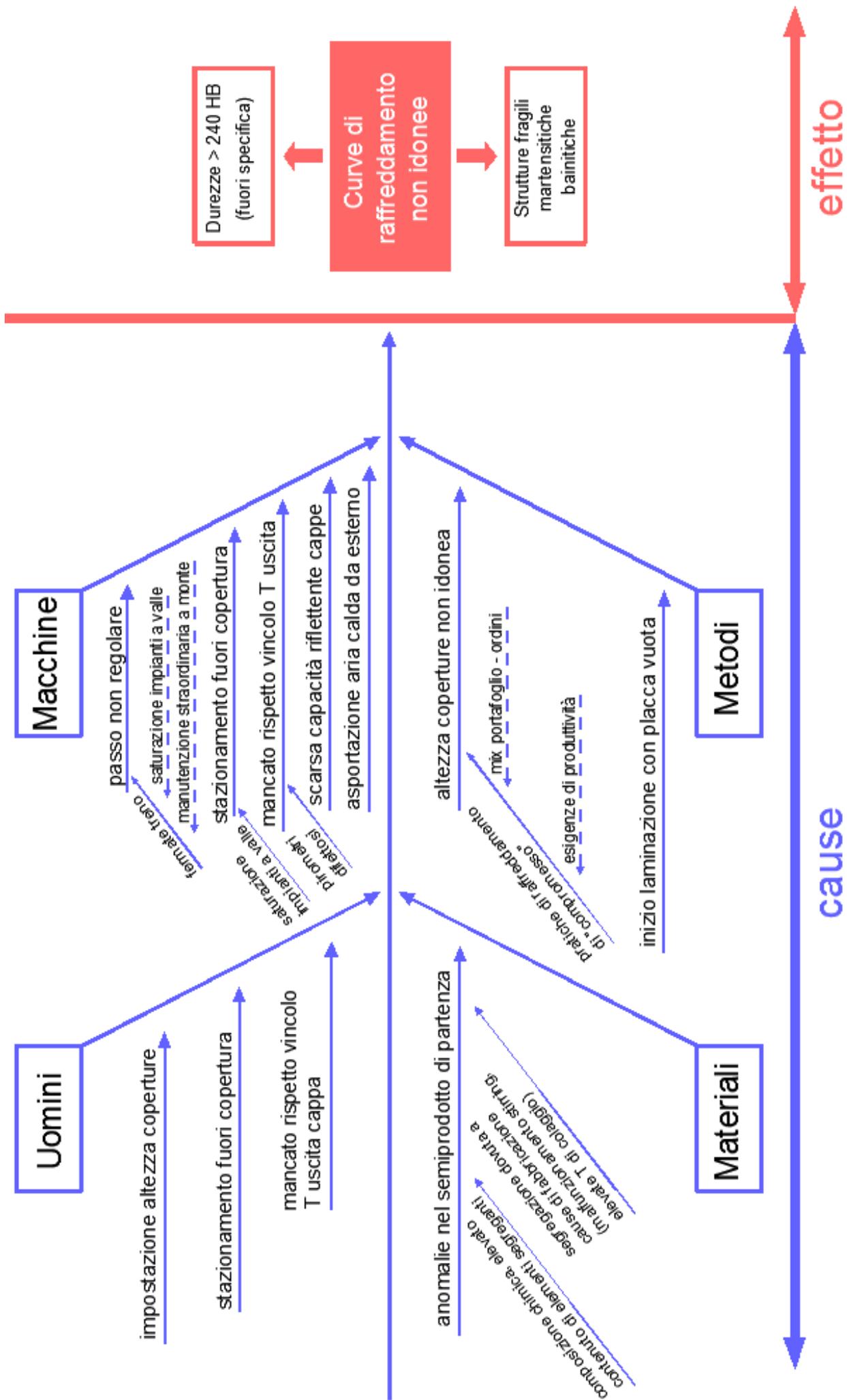


Fig. 46 – Diagramma di Ishikawa

2.4 Effetti legati a raffreddamenti anomali

Gli effetti di un raffreddamento anomalo riportati nel diagramma di Ishikawa sono tanto più sentiti quanto più il lotto è caratterizzato da:

- elevato tenore di elementi di lega (ad un maggiore contenuto di elementi di lega corrisponde una probabilità maggiore di sviluppare strutture indesiderate)
- profili di piccole – medie dimensioni (come già detto in precedenza, più il profilo è piccolo più aumenta la sensibilità a raffreddamenti anomali, specialmente a causa di un errato posizionamento delle cappe).

Nei sottoparagrafi successivi sono illustrati gli effetti tipici di un raffreddamento anomalo sulle famiglie acciaio oggetto di studio del progetto di revamping.

2.4.1 Acciai da cementazione

Gli acciai da cementazione hanno un tenore di carbonio relativamente basso, e sono destinati ad un trattamento termico di cementazione o carbonitrurazione con conseguente indurimento superficiale ma con un'anima caratterizzata da una buona tenacità.

Occorre premettere che, mentre esiste una corrispondenza biunivoca tra microstruttura e velocità di raffreddamento (nel senso che una data microstruttura è ottenibile se e solo se si raffredda ad una certa velocità), altrettanto non può dirsi per il legame durezza – velocità di raffreddamento, nel senso che nota la velocità di raffreddamento è possibile risalire alla durezza (attraverso un'analisi della microstruttura ottenuta), non è possibile, nota la durezza, risalire alla velocità di raffreddamento.

Questo fatto spiega come mai nella pratica si può, ad esempio, riscontrare durezza conformi alla specifica (< 240 HB) ma con strutture indesiderate in percentuali tali da determinare rotture tensionali in fase di cesoia tura (v. figure a pagina seguente)

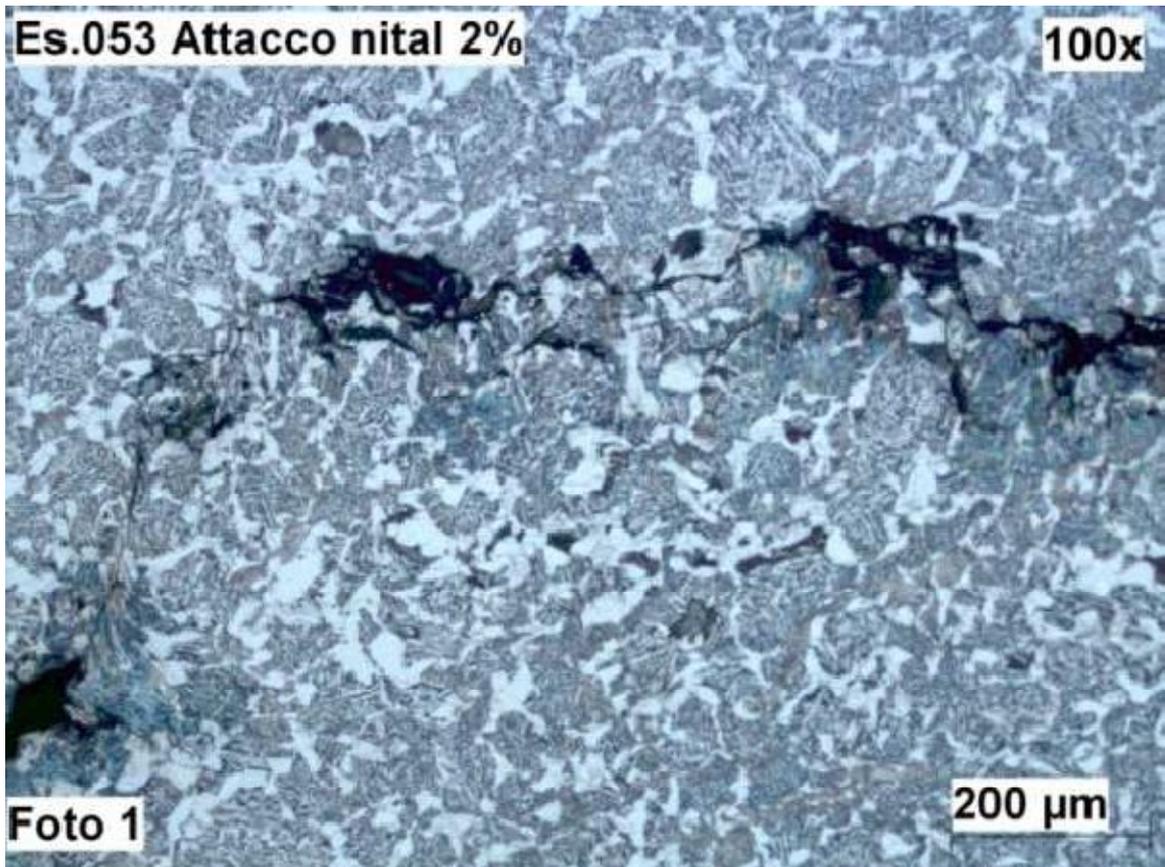


Fig. 47 – Difetto tensionale, inter-transgranulare di circa 40 mm avvenuto a freddo

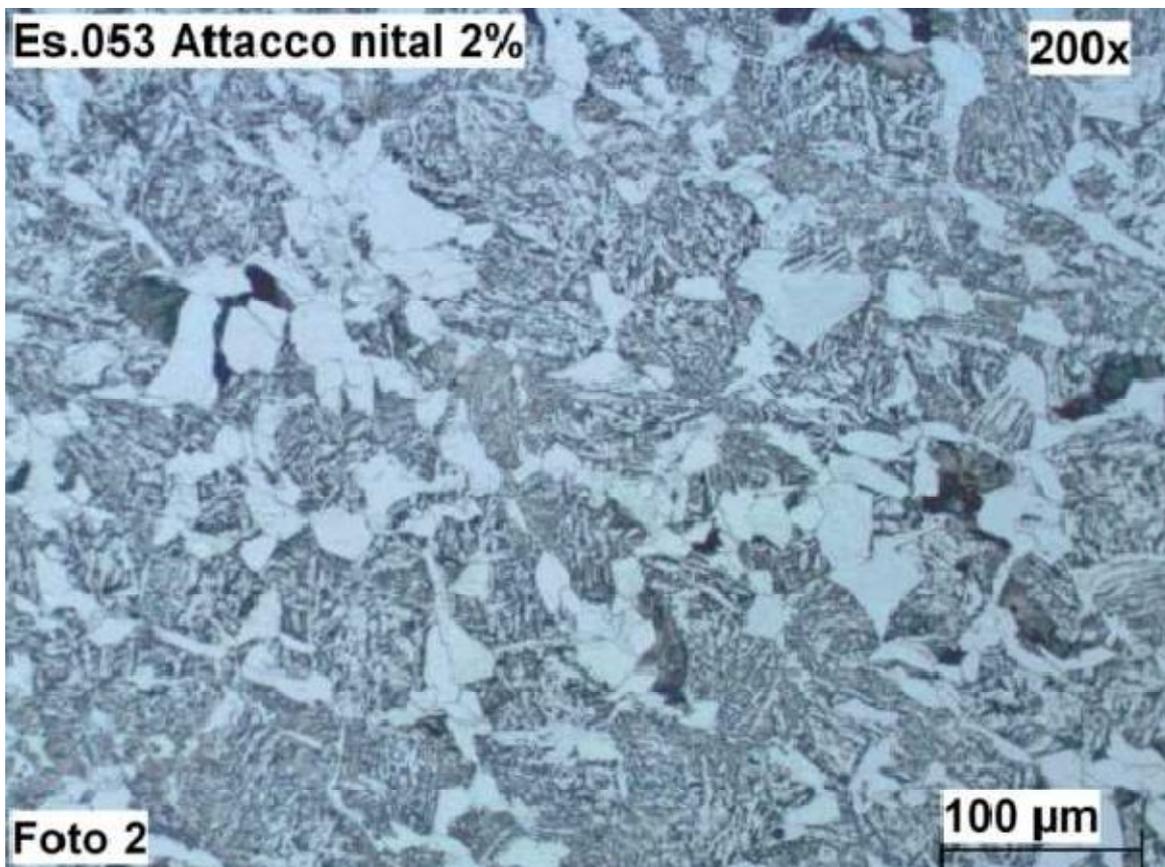


Fig. 48 – Dettaglio di struttura in prossimità del difetto: 70% bainite, 27% ferrite e 3% perlite

Di seguito si riporta un grafico CCT tipico di un acciaio da cementazione dalla composizione chimica simile a quella dell'acciaio su cui sono state effettuate le due precedenti micrografie (ad esempio 16CrNi5). Risulta evidente che per ottenere una struttura simile a quella di fig. 48 la curva di raffreddamento sarà compresa tra la 202 e la 248, più vicina a quest'ultima. Per diminuire la percentuale di bainite ed evitare rotture in cesaia tura occorre applicare una delle curve di raffreddamento situate a destra della 202, quindi in sostanza effettuare raffreddamenti più lenti.

CCT

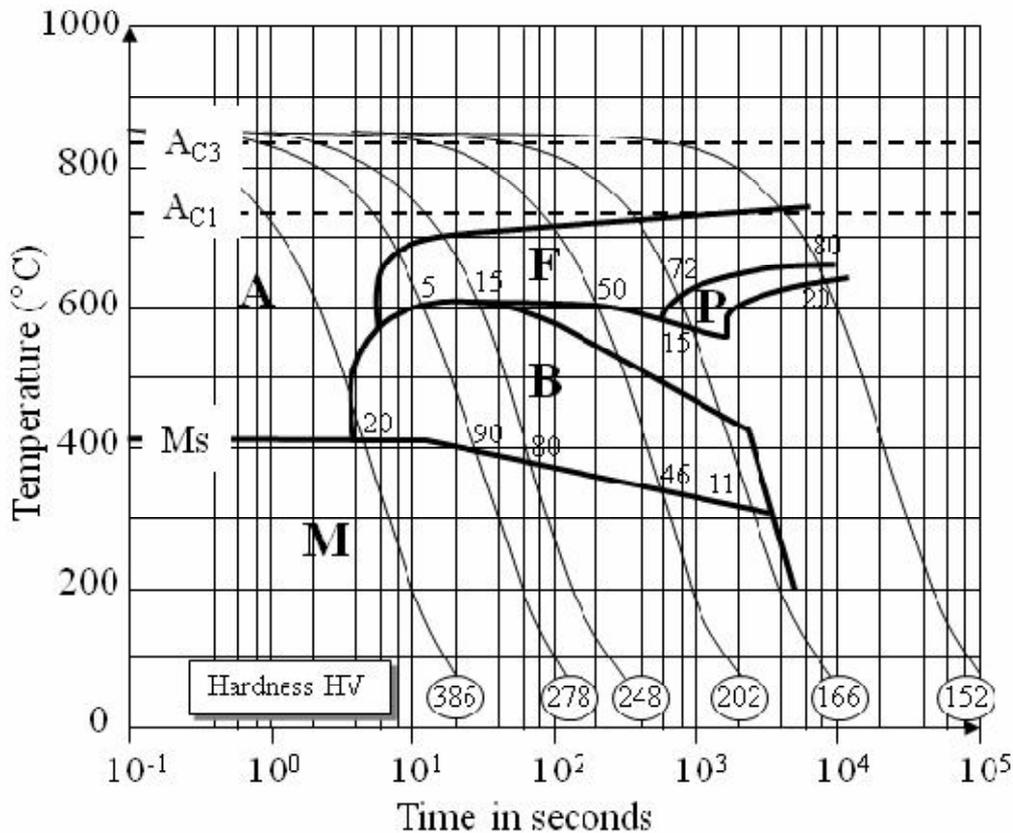


Fig. 49 – Curva CCT di un tipico acciaio da cementazione (16CrNi5)

Per questa tipologia di acciaio e con raffreddamenti sufficientemente lenti (tra le curve 166 e 152) è possibile uscire dalle coperture ad una temperatura inferiore a 500°C senza il rischio di ottenere strutture bainitiche o, ancora peggio, martensitiche. Qualsiasi anomalia nel raffreddamento che comporti un aumento della velocità di raffreddamento comporterà il rischio di ottenere strutture indesiderate con conseguente declassamento del semiprodotto o addirittura, nei casi peggiori, scarto. In quest'ottica è molto importante una corretta analisi qualitativa dei semiprodotto, in modo da evitare la spedizione di semiprodotto non conformi alle specifiche, con conseguente perdita di fiducia verso l'azienda e, a lungo termine, di mercato.

2.4.1 Acciai da bonifica

Gli acciai da bonifica sono acciai destinati a costruzioni meccaniche idonei alla tempra e che presentano, allo stato bonificato, un buon compromesso tra tenacità e resistenza a trazione.

Questi acciaio soffrono perlopiù di difettosità (cricche) interne con innesco su un punto “debole”, come segregazioni, fiocchi da idrogeno o inclusioni. Tali difettosità si propagano durante il raffreddamento in placca, oppure successivamente, durante le operazioni di raddrizzo. Le cause sono di diversa natura:

1. cause imputabili al semiprodotto di partenza (cause di origine acciaieria)

- alto tenore di idrogeno (soprattutto sulle prime di sequenza) che comportano un tipico difetto conosciuto come “fiocco da idrogeno”
- segregazioni, dovute ad un elevato contenuto di elementi segreganti, ad un malfunzionamento degli stirrer o ad elevate temperature di colaggio

2. cause imputabili al raffreddamento

- ingrossamento del grano dovuto ad un ingresso sotto copertura a $T > 900^{\circ}\text{C}$
- elevate tensioni interne (dovute alla laminazione e/o strutture miste)

Di seguito si riporta un difetto tensionale intergranulare originatosi in zona segregata dovuto ad un raffreddamento non adeguato ed al successivo processo di raddrizzo. La struttura è di tipo bainite – martensite in prossimità del difetto, mista a perlite compatta e ferrite (figure seguenti).

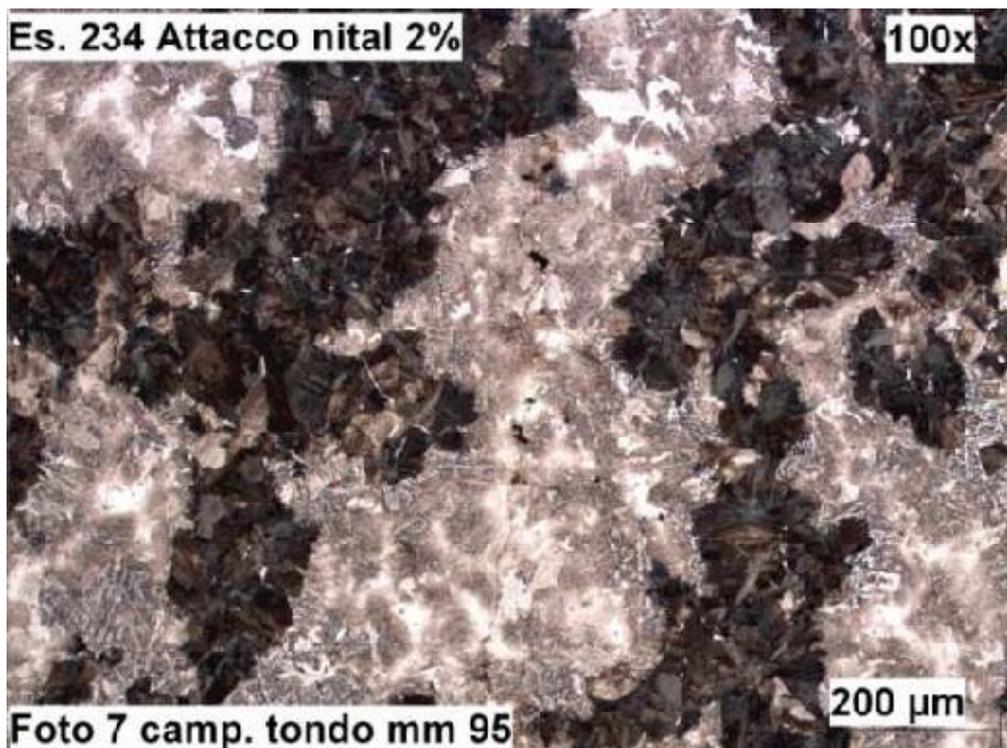


Fig. 50 – Struttura mista bainite – martensite e perlite - ferrite

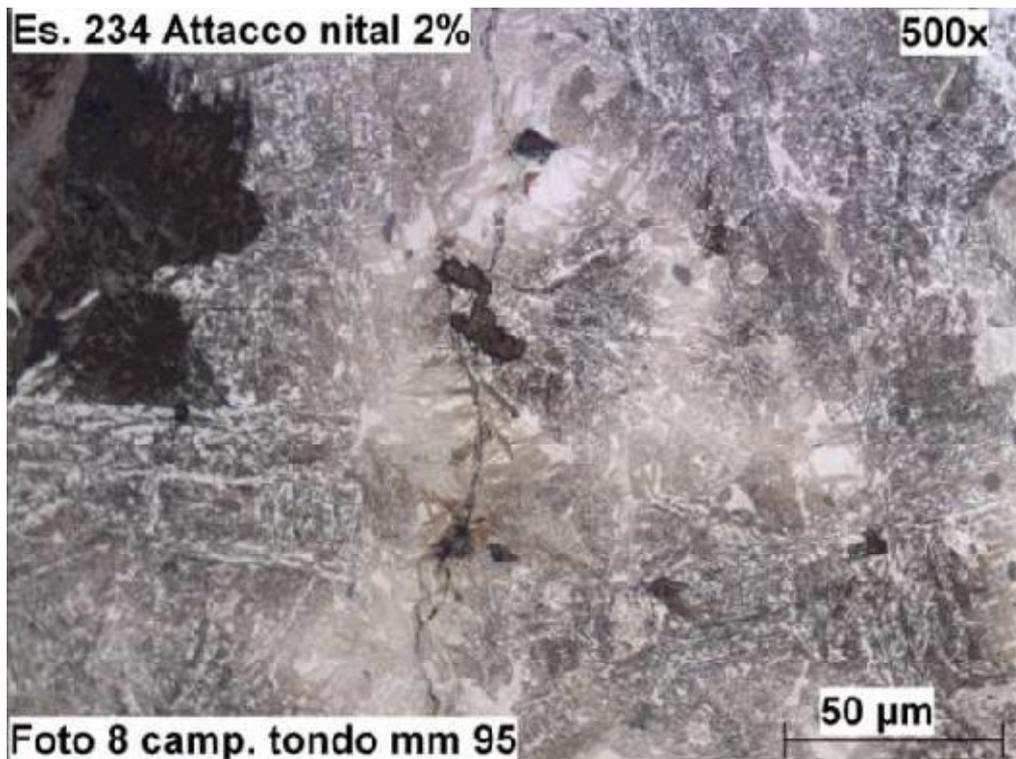


Fig. 51 – Dettaglio 500X del difetto originato su bainite – martensite in zona segregata (v. solfuri)

Tale struttura è indice di una composizione mista (a causa di concentrazioni per segregazione) ed un conseguente raffreddamento non omogeneo.

Segue un altro esempio di difetto tensionale intergranulare originato in zona segregata con struttura bainitica – martensitica in una matrice bainitica con isole di perlite, su un acciaio 42CrMoS4.

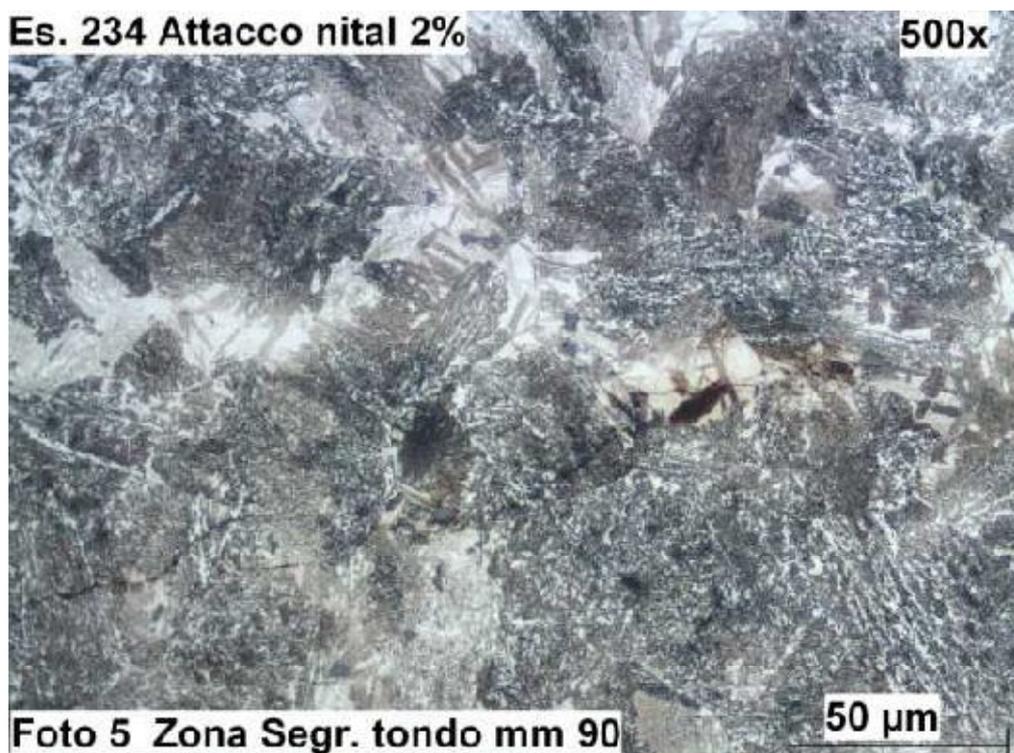


Fig. 52 – Difetto tensionale intergranulare in zona segregata, struttura bainitica - martensitica

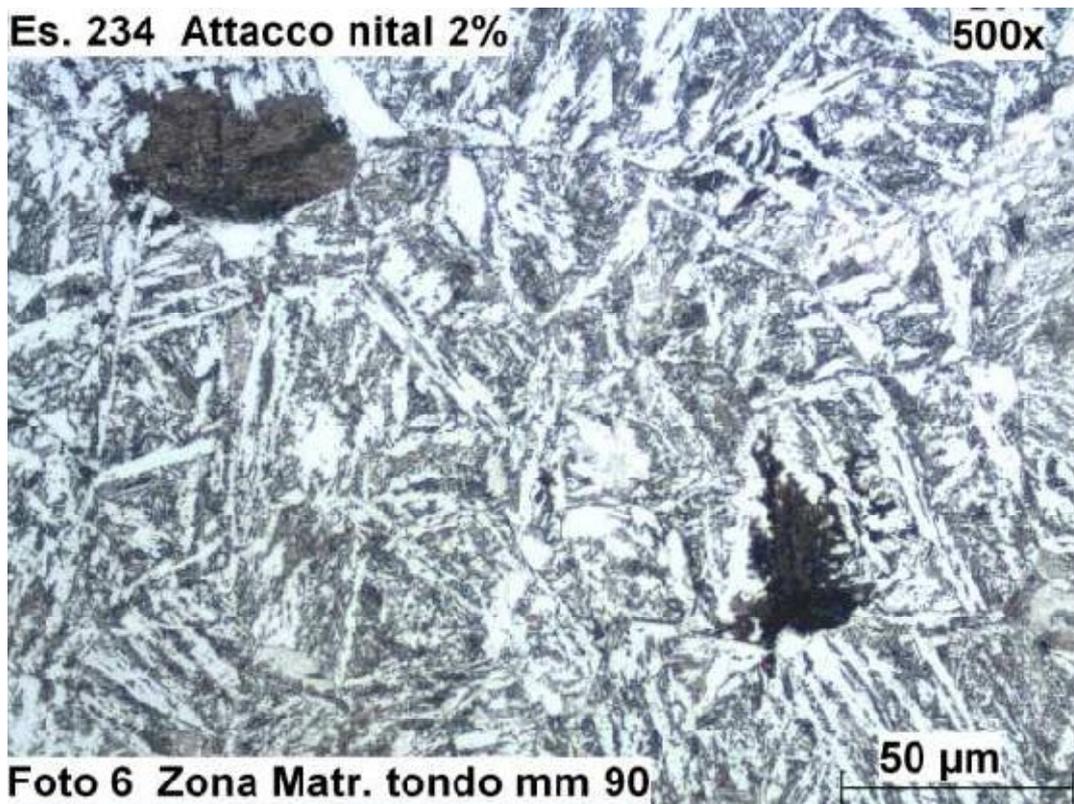


Fig. 53 – Dettaglio 500X matrice costituita da bainite ed isole di perlite

Di seguito si riporta un grafico CCT tipico relativo all'acciaio 42CrMoS4:

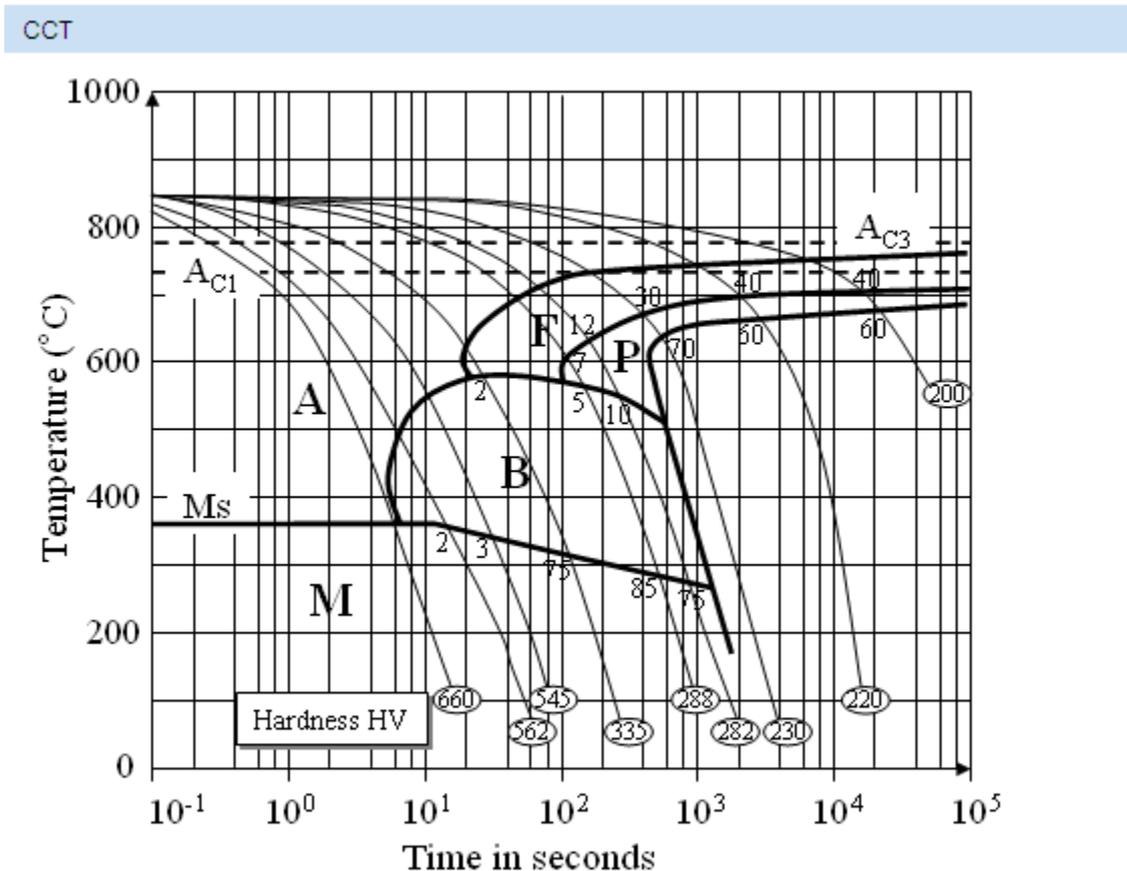


Fig. 54 – Curva CCT di un tipico acciaio da bonifica (42CrMoS4)

Per raffreddamenti sufficientemente lenti (curve 230 – 220 – 200) si ottengono strutture completamente ferritico – perlitiche e l'uscita dalle coperture a 500°C non comporta ulteriori trasformazioni.

Se si verifica un raffreddamento più rapido esiste la possibilità di formazione di strutture bainitiche – martensitiche in proporzioni variabili, che obbligano ad effettuare un ciclo di ricottura dopo la laminazione, in modo da riportare il materiale in una condizione di equilibrio sia chimico che strutturale (riduzione delle segregazioni e trasformazione delle fasi metastabili) con conseguente riduzione delle durezza ottenute.

3. IL SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO BARRE TMP

3.1 Introduzione

L'attuale sistema di raffreddamento barre è frutto di tutta una serie di idee e progetti di revamping avvenuti a partire dalla fine degli anni '90 e tuttora in atto. Come già accennato nel capitolo 2, infatti, inizialmente non esisteva alcun letto di raffreddamento, bensì un'area che fungeva da magazzino intermedio in cui le barre venivano lasciate raffreddare in aria libera, per poi essere inviate in un forno di ricottura. Questo secondo forno comportava un costo piuttosto elevato alla luce della configurazione attuale dell'impianto. Negli ultimi anni, in seguito alla trasformazione dello stabilimento da statale a privato, l'esigenza di ridurre i costi ha cambiato radicalmente la politica aziendale, portando ad una serie di investimenti in ricerca e sviluppo, revamping impianti o addirittura, laddove possibile, sostituzione di vecchi impianti con nuovi sistemi più performanti.

Nel caso specifico del TMP, si è resa necessaria una sostituzione completa degli impianti a valle del treno di laminazione, quindi la costruzione del sistema di raffreddamento e dell'attuale impianto di taglio e confezionamento.

L'aspetto legato alla gestione / manutenzione del nuovo sistema di raffreddamento a placche ha creato inizialmente problemi non banali, causati principalmente da:

- pratiche operative non ancora ottimizzate a causa della mancanza di uno storico dati
- nuove criticità impiantistiche e qualitative sorte nel corso dell'utilizzo dell'impianto
- laminazione di nuove qualità acciaio per le quali non era ancora disponibile una conoscenza approfondita a livello di curve di trasformazione, criticità di raffreddamento etc.

Ciò ha permesso nel corso degli anni di ottimizzare il sistema di raffreddamento, grazie ai seguenti aspetti:

- gestione / manutenzione delle placche attraverso pratiche operative studiate ad hoc
- revisione e perfezionamento del sistema di raffreddamento a livello di meccanica e automazione
- miglioramento del controllo di qualità attraverso un costante aggiornamento sulle conoscenze dei materiali a livello di gestione delle criticità in laminazione, raffreddamento ma anche processi di produzione a monte del TMP (degasaggio, metallurgia in siviera, colata continua etc.)

Attualmente, la necessità di operare in un contesto sempre più difficile, in parte legato alla situazione contingente a livello di dinamiche di mercato ed economico – politico, le esigenze di alleggerire i costi e migliorare la produttività e la flessibilità degli impianti, rendono insufficienti le prestazioni dell'attuale sistema di raffreddamento. Il presente progetto di revamping si pone lo scopo di risolvere queste problematiche attraverso una soluzione ottimizzata in funzione di un giusto compromesso tra i vari aspetti sopra descritti.

3.2 Configurazione impiantistica

L'area letti di raffreddamento è distinta in due parti uguali e speculari: il letto di raffreddamento linea 1 ed il letto di raffreddamento linea 2.

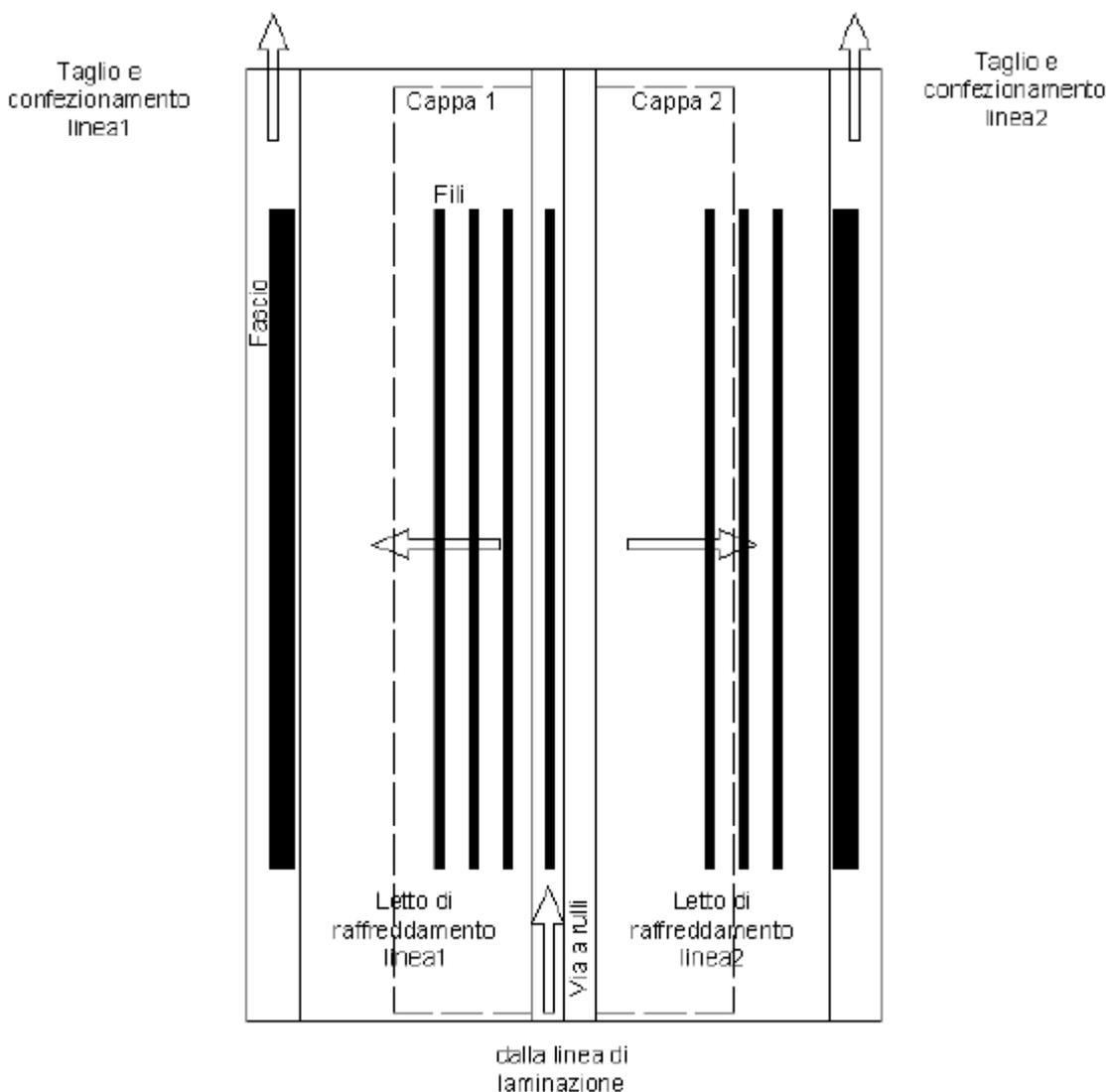


Fig. 55 – Schema impiantistico del sistema di raffreddamento barre TMP

Al momento dello sfornamento della billetta nell'area Forno di riscaldamento viene individuato il Letto di raffreddamento che accoglierà la barra laminata. Nel caso in cui lo sviluppo del laminato superi la lunghezza massima utile dei letti, all'interno dell'area Linea di laminazione questo viene suddiviso in spezzoni utilizzando le cesoie. Ciascuno spezzone viene chiamato "filo". Tipicamente da una billetta standard (200 mm x 200 mm x 12 m) possono essere generati fino a quattro fili. Una volta scelto un Letto di raffreddamento tutti i fili generati da una billetta verranno accolti sul medesimo letto e frenati fino a fermarli a partire dalla velocità di laminazione utilizzando un sistema di freni a scomparsa.

Ciascun letto di raffreddamento è costituito fondamentalmente da una serie di rastrelli a gole disposti ortogonalmente al laminato, e suddivisi in rastrelli fissi e mobili.



Fig. 56 – Rastrelli fissi e mobili

I rastrelli permettono la traslazione dei fili del laminato con passo quadro verso l'esterno del letto di raffreddamento, dove un sistema di motorulli, scontri e catene organizza più fili in un "fascio", il quale verrà trasferito all'area taglio e confezionamento.



Fig. 57 – Zona di formazione del fascio per invio a taglio e confezionamento

Nella zona iniziale di ciascuna placca avviene la fase di raffreddamento controllato del laminato utilizzando un sistema di cappe mobili. Tale zona è schermata:

- inferiormente da lamierini fissi in acciaio inossidabile
- superiormente da un sistema di cappe mobili

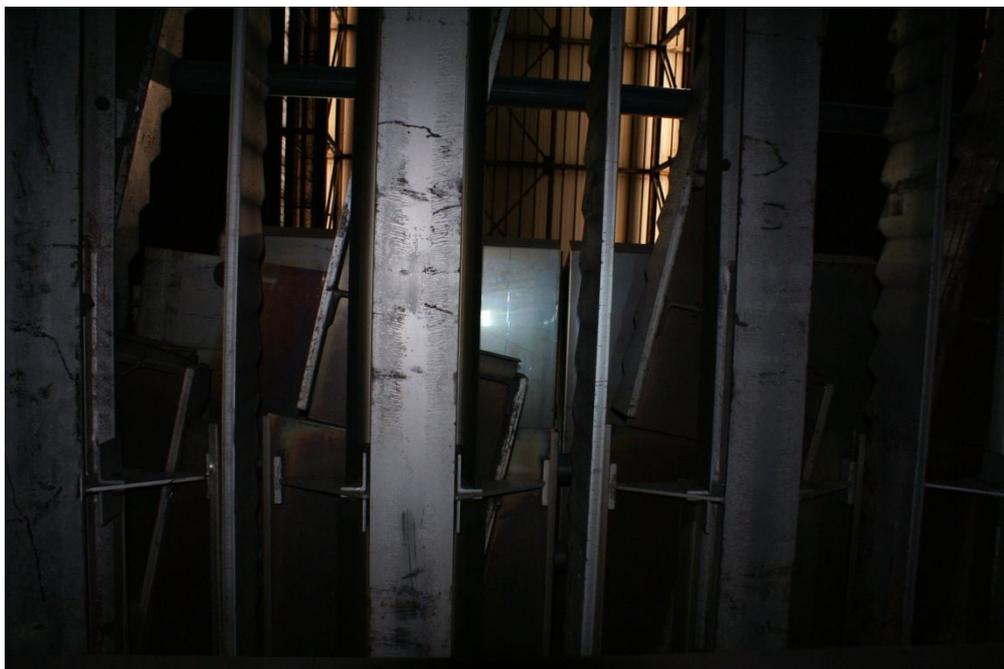


Fig. 58 – Copertura inferiore in lamierini di acciaio inox

Le cappe mobili sono strutture isolanti (in ca wool) rivestite esternamente con lamierini di acciaio inox, e si trovano sospese sul laminato grazie al sostegno di supporti centrali a croce, su cui è montato il sistema di movimentazione verticale delle cappe.



Fig. 59 – Coibentazione superiore e sistema di sostegno e movimentazione cappe

I sostegni centrali e il sistema di movimentazione sono comuni ai due letti di raffreddamento, di conseguenza l'altezza delle cappe sarà la stessa per entrambe le linee. La regolazione dell'altezza delle cappe avviene manualmente, nel rispetto della pratica operativa standard PO-TMP-014-1 "Treno TMP – Modalità di raffreddamento in placche coibentate" (v. pagg. 47 – 49). L'altezza è indicata su una scala graduata situata sulla struttura a croce, tramite la quale l'operatore addetto alla regolazione controlla il raggiungimento del valore desiderato (v. fig. 60).

La temperatura dei fili sui letti di raffreddamento è controllata da quattro pirometri, due per linea, puntati all'ingresso e all'uscita delle cappe.

Attualmente la traslazione dei fili sui rastrelli viene regolata affinché la temperatura di uscita cappa non superi i 500°C laddove la pratica operativa prescriva un raffreddamento controllato per quella determinata marca acciaio. In caso contrario, la cappa viene posizionata alla massima altezza possibile, in quanto non è possibile escluderla (caso ideale).

Per rispettare i vincoli progettuali dei letti in termini di portata massima, a seconda del profilo è possibile avere fili su ciascuna tasca dei rastrelli oppure avere alternanza tra tasche piene e vuote. Quest'ultimo caso si presenta per i profili più grandi, ed esistono disposizioni di lavoro in merito.



Fig. 60 – Sistema di movimentazione cappe con scala graduata per controllo altezza

Un sistema di tracking di livello 2, interfacciato con il sistema di automazione, traccia i dati di processo di ciascun lotto di produzione dalla zona di infornamento a quella di taglio e confezionamento compresa. I lotti di produzione sono pianificati sul sistema gestionale SAP e le informazioni necessarie per la laminazione vengono trasmesse sul sistema d'area.

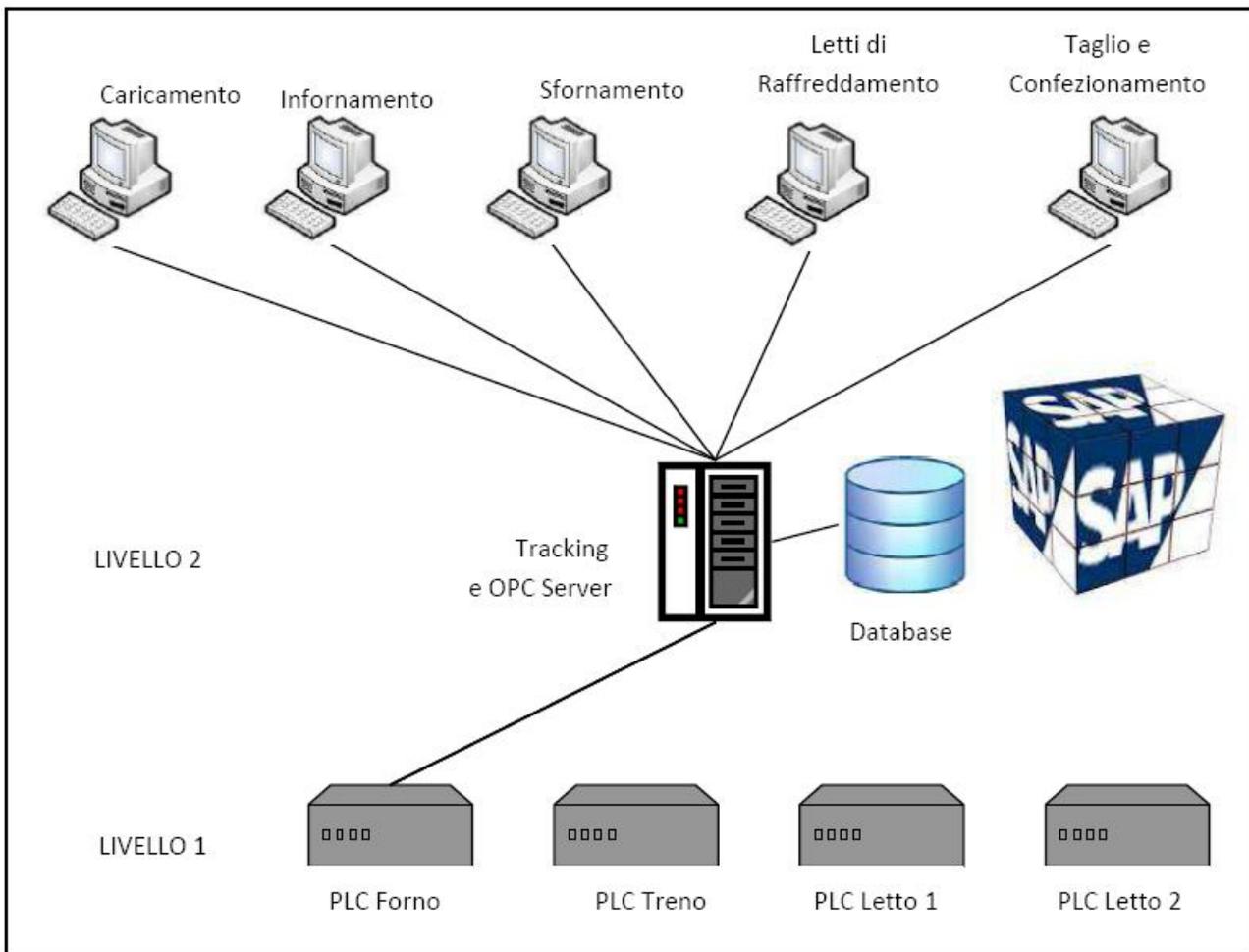


Fig. 61 – Interfacciamento sistemi IT

Il sistema archivia inoltre sul database tutti i dati di processo per ogni billetta di una colata dal suo riscaldamento in forno fino al vero e proprio sviluppo del filo che poi, una volta tagliato, andrà a comporre il pacco.

I dati archiviati comprendono:

- assorbimento di corrente di ciascun motore delle gabbie di laminazione
- numero di giri di ciascuna gabbia di laminazione
- temperature zone forno
- temperatura Pirometro S1 all'uscita dal forno
- misurazione di profilo (diametro max e min o lati e diagonali max e min)
- lunghezza dei fili prodotti dalla billetta
- temperatura ingresso cappa
- temperatura uscita cappa

3.3 Meccanica del sistema di raffreddamento

Le due placche di raffreddamento si sviluppano per una larghezza totale di 12 metri ed una lunghezza di 120 metri.



Fig. 62 – Placche del sistema di raffreddamento barre TMP

La struttura principale consiste in una serie di rastrelli fissi alternati a rastrelli mobili, disposti simmetricamente lungo l'asse longitudinale del sistema di raffreddamento. Ciascun rastrello presenta degli intagli a V, in modo da creare una serie di "tasche", capaci di accogliere le barre in uscita dal treno. Quest'ultime, data la specularità dell'impianto, giungono nella zona centrale attraverso una via a rulli.



Fig. 63 – Barre incandescenti appena giunte in placca

Si rende necessario adottare un sistema di frenatura con un'azione graduale in modo da evitare urti e quindi sollecitazioni dannose alla struttura portante. Tale sistema consiste in una base che, sollevandosi, alza le barre dalla via a rulli, che quindi perdono il contatto con i rulli e frenano per semplice attrito. La larghezza della via a rulli è studiata in modo da:

- accogliere tutta la gamma di profili (forma e dimensioni)
- facilitare il prelievo della barra dai rastrelli collocandola il più vicino possibile alla cappa

Nella figura seguente è visibile il sistema di frenatura delle barre:

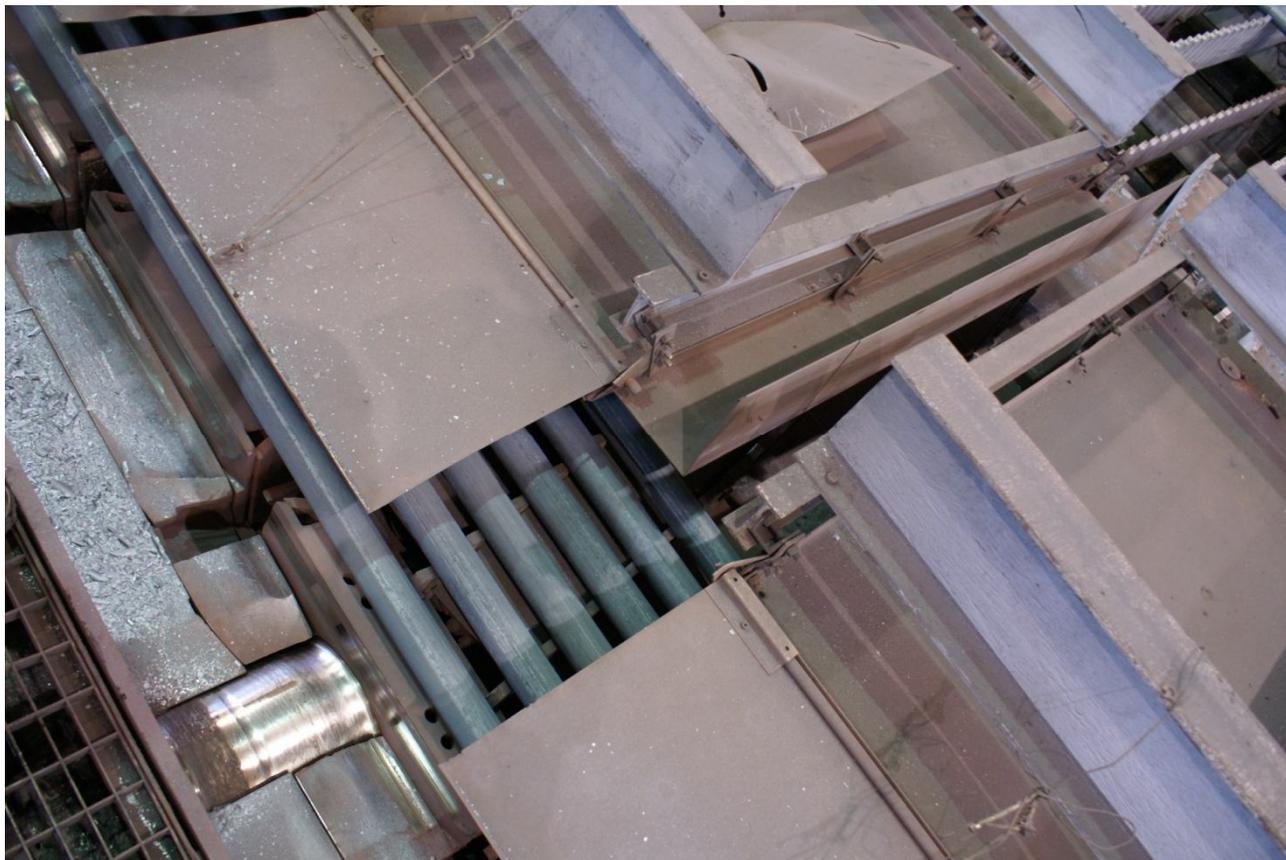


Fig. 64 – Integrazione del sistema di frenatura barre con la via a rulli in placca TMP

Si vede molto bene la via a rulli, divisa in due parti: quella a sinistra in figura è fissa, mentre la parte di destra si solleva, per mezzo di una serie di azionamenti meccanici, scollegando la barra dalla via a rulli e permettendo la frenatura per attrito. Guardando bene la figura si può notare un altro particolare molto importante, cioè il fatto che la via a rulli non è orizzontale, bensì inclinata verso il basso in direzione della cappa, in questo modo la barra che giunge sulla via a rulli si posizionerà, per semplice gravità, proprio sopra il sistema di frenata, più precisamente nel punto più vicino alla cappa, punto in cui possono giungere facilmente i rastrelli mobili per il prelievo della barra ed il suo posizionamento sulla prima tasca del letto.

Un altro aspetto importante per il dimensionamento della via a rulli è conoscere quanti metri di profilo vengono sviluppati a partire da una billetta. Ipotizzando il caso più comune, cioè quello di partire da una billetta di 200 mm di lato e 12 m di lunghezza, è possibile calcolare lo sviluppo in metri di ciascun profilo. I risultati sono illustrati nella tabella a pagina seguente.

Profilo (tondo / quadro)	Dimensione (mm)	Sviluppo (m)	Fili sviluppati	Profilo (tondo / quadro)	Dimensione (mm)	Sviluppo (m)	Fili sviluppati
t	38	423,2	4	t	80	95,5	1
t	39	401,8	4	t	82	90,9	1
t	40	382,0	4	t	83	88,7	1
t	41	363,6	4	t	85	84,6	1
t	42	346,5	4	t	88	78,9	1
t	43	330,5	4	t	90	75,5	1
t	44	315,7	4	t	92	72,2	1
t	45	301,8	4	t	93	70,7	1
t	46	288,8	3	t	95	67,7	1
t	47	276,7	3	t	98	63,6	1
t	48	265,3	3	t	100	61,1	1
t	50	244,5	3	t	103	57,6	1
t	51	235,0	3	t	105	55,4	1
t	52	226,0	3	t	110	50,5	1
t	53	217,6	2	t	115	46,2	1
t	54	209,6	2	t	118	43,9	1
t	55	202,0	2	t	120	42,4	1
t	56	194,9	2	t	125	39,1	1
t	57	188,1	2	q	40	300,0	3
t	58	181,7	2	q	45	237,0	3
t	59	175,6	2	q	47	217,3	3
t	60	169,8	2	q	48	208,3	3
t	62	159,0	2	q	50	192,0	2
t	63	154,0	2	q	55	158,7	2
t	65	144,7	2	q	60	133,3	2
t	66	140,3	2	q	63	120,9	2
t	67	136,1	2	q	65	113,6	2
t	68	132,2	2	q	67	106,9	1
t	70	124,7	2	q	70	98,0	1
t	72	117,9	2	q	75	85,3	1
t	73	114,7	2	q	80	75,0	1
t	75	108,6	1	q	85	66,4	1
t	76	105,8	1	q	90	59,3	1
t	77	103,1	1	q	100	48,0	1
t	78	100,5	1				

Tab. 6 – Sviluppo in metri e numero di fili sviluppati per i profili prodotti nell'anno 2011

In realtà i dati riguardanti lo sviluppo in metri sono dati di massima in quanto esistono delle perdite di materiale:

- durante l'informamento (decarburazione, formazione di scaglie che poi dovranno essere rimosse)
- a causa delle spuntature a caldo (bonifica all'estremità) alle cesoie
- legate alla laminazione (aspetto trascurabile rispetto agli altri due, ma comunque presente)

Inoltre non è corretto considerare una billetta teorica che sia esattamente lunga 12 m e 200 x 200 mm su tutta la sua lunghezza. Tutto ciò comporta la necessità di conoscere la massa di ciascuna billetta in modo da poter ottimizzare il taglio delle barre in funzione della lunghezza desiderata dal cliente, con lo scopo di ridurre al minimo gli scarti. Nel fare ciò, si cerca laddove possibile di inserire nella placca barre di lunghezza non superiore a 110 metri, in modo da lasciare un adeguato margine alle estremità della cappa riducendo al minimo gli effetti di bordo sul raffreddamento alle estremità della barra stessa.

Il dato inerente il numero di fili sviluppati invece è esatto: ad esempio, una barra tonda da 38 mm sarà sempre tagliata in modo da avere 4 fili distinti, quello che cambierà sarà la lunghezza dei fili, ottimizzata in funzione della massa della billetta e della misura richiesta dal cliente.

Quando bisogna laminare un profilo che sviluppa due o più fili, una volta che la barra è stata tagliata, senza nessun altro accorgimento accadrebbe che il filo a valle giungerebbe in placca regolarmente e sarebbe correttamente frenato, il successivo filo però sarebbe vicinissimo al primo, quindi andrebbe a contatto con quest'ultimo generando un incaglio sul letto. L'idea è quella di aumentare la velocità del filo a valle una volta uscito completamente dall'ultima gabbia di laminazione in modo da creare un margine tra filo a valle e filo a monte. In questo modo il sistema di raffreddamento ha il tempo di frenare il primo filo e di posizionarlo sulla prima tasca. Subito dopo giungerà il secondo filo, poi, eventualmente, il terzo ed infine il quarto. Per aumentare la velocità dei rulli all'uscita treno si impiega un'alimentazione elettrica a frequenza variabile (funzione del profilo e delle sue dimensioni), a sua volta generata da un alternatore mosso da un motore elettrico a corrente continua controllato in velocità.

I rastrelli delle due placche di raffreddamento si dividono, come già detto, in fissi e mobili. Ai rastrelli fissi è affidato il compito di sostenere il laminato, mentre i rastrelli mobili servono per l'avanzamento delle barre secondo il sistema del "passo quadro".

Il movimento a passo quadro è un movimento suddiviso in quattro fasi:

- arretramento dei rastrelli mobili
- innalzamento
- avanzamento
- discesa

Nella prima fase i rastrelli arretrano di un passo, successivamente, alzandosi, sollevano tutto il laminato fino a portarlo ad un'altezza superiore a quella dei rastrelli fissi; il movimento di avanzamento riporta i rastrelli mobili nella posizione iniziale di partenza, e con il loro abbassamento le barre tornano a gravare sui rastrelli fissi. In questo modo tutto il laminato ha compiuto un passo in avanti.

I movimenti dei rastrelli sono ottenuti tramite:

- un albero ad eccentrico per quanto riguarda il moto verticale
- un sistema di cilindri oleodinamici per quanto riguarda il moto orizzontale

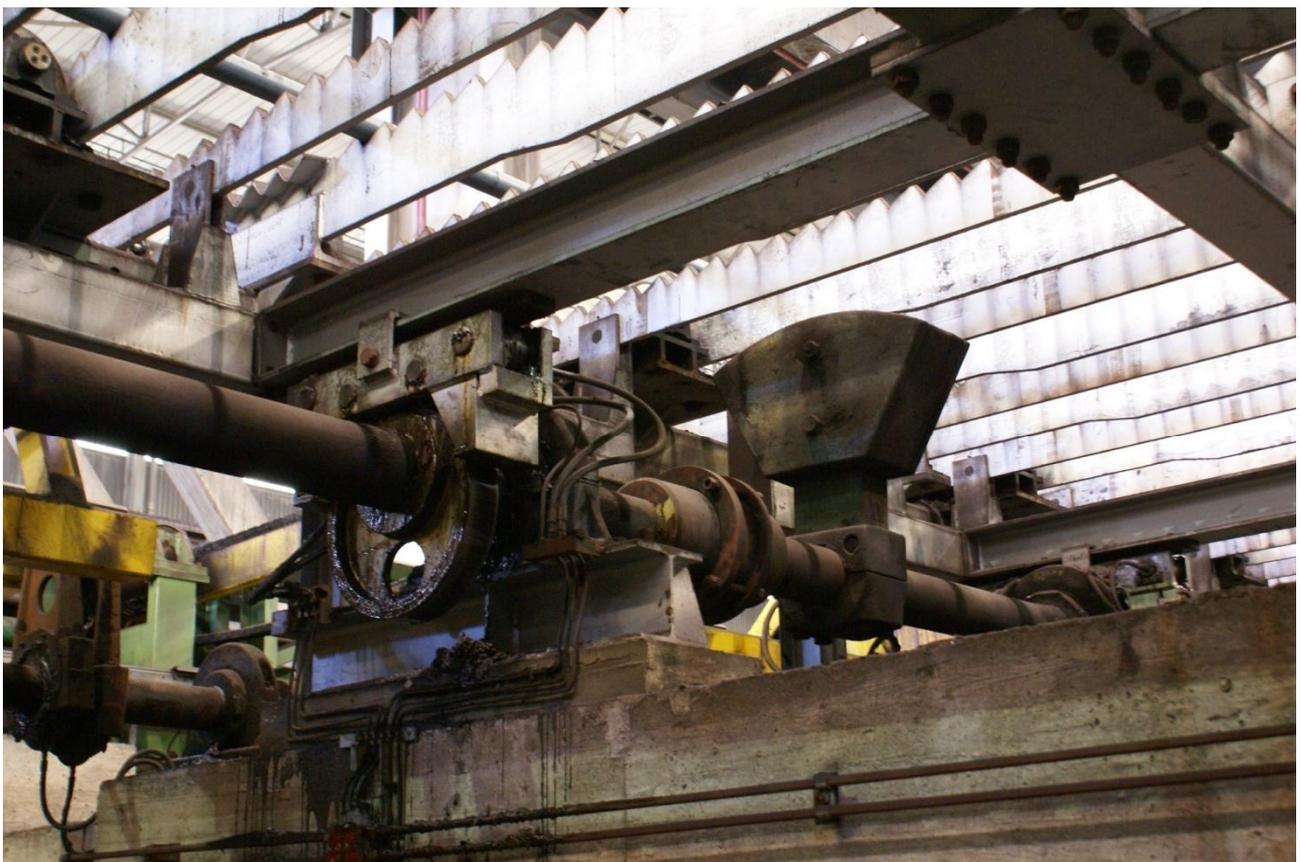


Fig. 65 – Particolare del sistema di movimento ad eccentrico per il moto verticale

Nella figura precedente è visibile il sistema di movimento verticale dei rastrelli mobili. La posizione dell'eccentrico corrisponde alla configurazione a rastrelli abbassati, nel momento in cui è necessario eseguire un passo, l'albero ruota di 180° , e lo spostamento dell'eccentricità verso l'alto corrisponde ad un innalzamento dei rastrelli e quindi del laminato. Naturalmente esistono più eccentrici opportunamente distanziati su tutta la lunghezza della placca in modo da avere una ripartizione uniforme dei carichi. Durante il sollevamento è necessario esercitare una forza maggiore del peso del laminato, che si traduce in una coppia troppo elevata per poter essere applicata. Per ovviare a questo inconveniente, lungo l'albero sono collocati dei contrappesi (uno dei quali visibile in figura) posizionati in senso opposto agli eccentrici, in modo tale che quando i rastrelli mobili sono in basso (letto fermo) essi si trovano in alto. Durante il sollevamento del laminato, i contrappesi favoriscono la salita dei rastrelli mobili per gravità, in questo modo la coppia necessaria all'albero principale risulta sensibilmente ridotta e facilmente ottenibile per mezzo di un gruppo motore – riduttore. Nel momento in cui le barre sono avanzate di un passo e i rastrelli mobili devono scendere, i contrappesi sono situati in basso (in senso opposto a quello di figura 65), quindi oppongono resistenza al moto discensionale, tuttavia questo effetto è bilanciato dal peso stesso del laminato, pertanto anche la fase di discesa risulta facilmente gestibile a livello di coppia e velocità.

Per ragioni costruttive, i motori sono posizionati con l'asse ortogonale all'albero a eccentrici, pertanto è necessario un riduttore con assi a 90° per portare il moto verso il sistema di sollevamento.



Fig. 66 – Riduttore con assi a 90° : ingresso del moto a sinistra, uscita in direzione ortogonale



Fig. 67 – Motore elettrico per movimento verticale rastrelli mobili

Il movimento in direzione orizzontale è reso possibile attraverso cilindri oleodinamici:

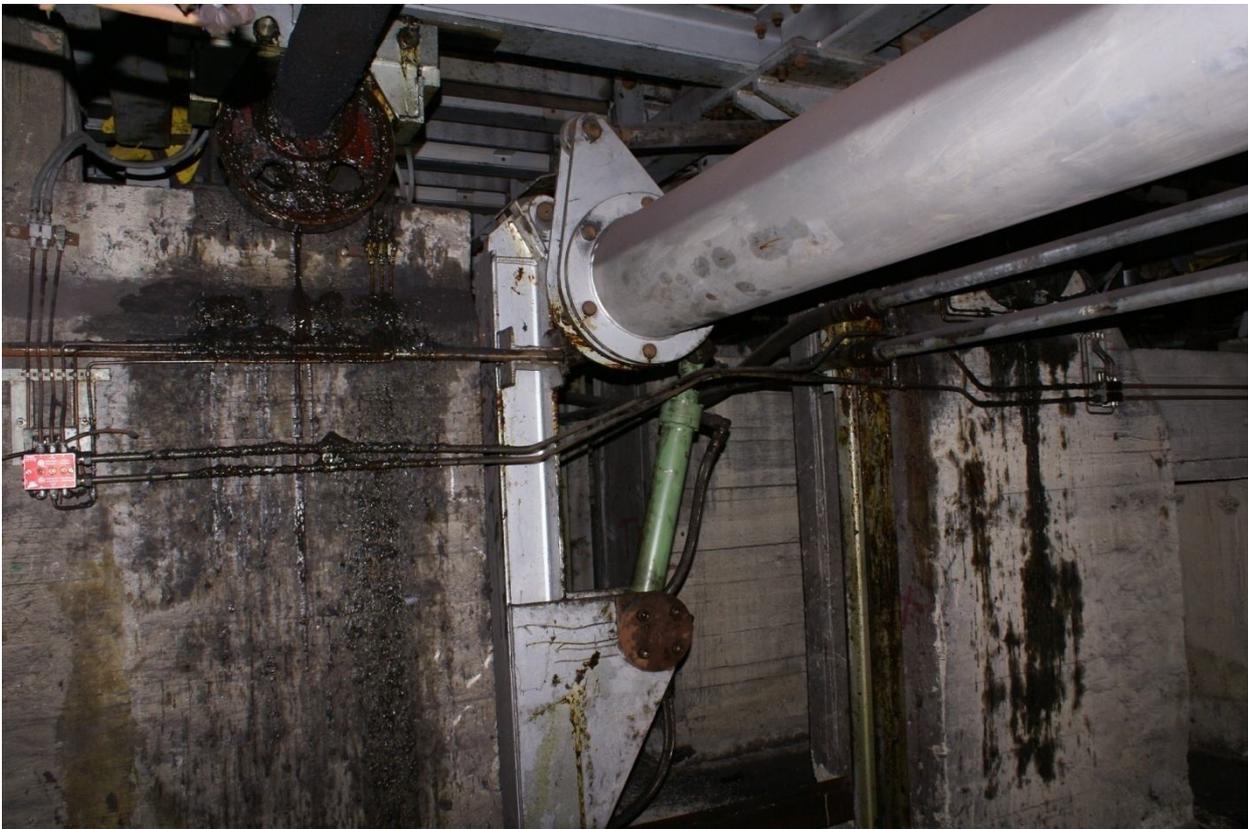


Fig. 68 – Sistema di movimentazione orizzontale dei rastrelli

Ciascuna placca di raffreddamento è suddivisa in 4 sezioni, secondo lo schema riportato in figura:

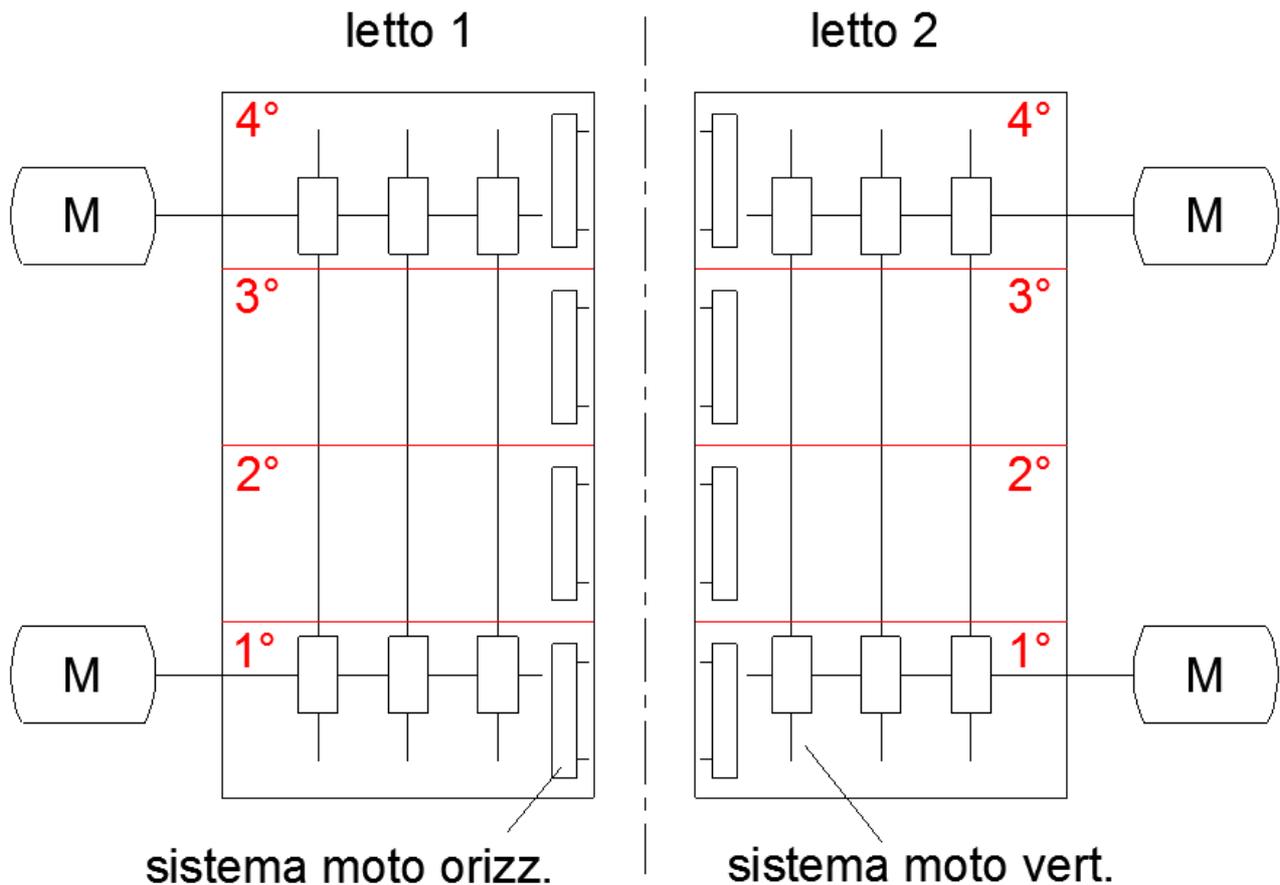


Fig. 69 – Schema funzionamento meccanico rastrelli mobili in placca 1-2 TMP

La suddivisione in sezioni riguarda, oltre ai rastrelli mobili, anche la cappa e il sistema di movimentazione orizzontale. Riguardo alla cappa si è già accennato in precedenza a questa suddivisione, la quale comportava la presenza di uno spazio vuoto responsabile dell'effetto sinusoidale (v. fig. 44, pag. 45). È importante notare che mentre ciascuna sezione ha il proprio sistema di movimentazione orizzontale dei rastrelli (il che comporta la necessità di sincronizzare tutti i movimenti parziali), gli alberi ad eccentrici si sviluppano su tutta la lunghezza della placca senza alcuna interruzione. Per ciascuna placca ci sono tre alberi ad eccentrico per ragioni di ripartizione del carico, i quali ricevono il moto da 6 riduttori ad assi ortogonali, mossi tre a tre da due motori che girano in modo sincronizzato. Il motore situato nella prima sezione funge da master, mentre quello nella quarta sezione funge da slave, vale a dire segue il movimento del primo attraverso un sistema di sincronizzazione studiato ad hoc. Ciascuna delle due placche, inoltre, ha una centralina oleodinamica per il moto orizzontale dei rastrelli.

3.4 Criticità impiantistiche attuali

Allo stato attuale il sistema di raffreddamento barre TMP presenta le seguenti criticità impiantistiche:

Cappe dipendenti l'una dall'altra

Attualmente le cappe del letto 1 e del letto 2 sono ancorate alla medesima struttura portante centrale ed il sistema di movimentazione cappe è comune ai due letti. Ciò comporta che l'altezza delle cappe è sempre la stessa per entrambi i letti. Questo aspetto è critico nel frequente caso in cui sul letto 1 siano depositate barre di profilo e/o marca differente rispetto a quelle accolte dal letto 2. La criticità si traduce in scelte di compromesso qualitative e/o in perdite di produttività per il letto con tempo di raffreddamento inferiore e/o scelte qualitative di compromesso o comunque cautelative.

Impostazione altezza manuale

Attualmente, la regolazione dell'altezza delle cappe avviene tramite sistema elettromeccanico ad azionamento manuale. L'operatore del pulpito di controllo, agendo su dei pulsanti, regola l'altezza delle cappe controllandone la posizione su una scala graduata in base ad una procedura discriminata per tipologia di prodotto. Nonostante la professionalità degli operatori la regolazione manuale può comportare errori umani e comunque non garantisce un'elevata precisione.

Registrazione altezza

Allo stato attuale, l'effettiva posizione delle cappe nel tempo non è in alcun modo registrata, né tanto meno compare nei dati di processo del sistema di tracking. In caso di necessità di un riscontro a posteriori non è possibile risalire all'effettiva posizione delle cappe in un certo istante. Pertanto, in tale circostanza viene fatto affidamento al rispetto delle procedure e all'ipotesi di corretto posizionamento.

Rilevazione accurata temperature

Attualmente le temperature di ingresso e uscita dalla cappa sono rilevate da due pirometri per letto. I pirometri hanno lo svantaggio di essere puntati su una determinata tasca dei rastrelli dei letti, ovvero in posizione fissa. Di conseguenza non possono misurare la temperatura su fili più adiacenti e necessitano di controlli accurati sul posizionamento da eseguire con una certa periodicità. Tali temperature, inoltre, sono trasmesse al sistema di tracking sistematicamente in ritardo, e questo può causare un'archiviazione dei dati non attendibile.

4. SCHEMA DEL LAVORO SVOLTO

Il progetto di revamping è articolato nelle seguenti fasi:

- 1) Analisi di produttività per ciascuna area / impianto, con riferimento alle coppie profilo – marca precedentemente individuate
- 2) Analisi dei colli di bottiglia per ciascuna coppia profilo – marca
- 3) Analisi delle criticità impiantistiche e qualitative attuali relative al sistema di raffreddamento
- 4) Sviluppo delle modifiche impiantistiche a livello di meccanica ed automazione
- 5) Valutazione dei benefici in termini di produttività e qualità
- 6) Valutazione di costi e tempi

Per quanto riguarda l'argomento produttività, il calcolo può essere semplificato concentrandosi solo sulle principali aree / impianto del reparto, ovvero:

- forno di riscaldamento
- treno di laminazione
- letti di raffreddamento
- taglio e confezionamento

Il calcolo dovrà essere svolto tenendo conto solo delle coppie profilo – marca ritenute strategiche in termini di produttività e criticità qualitative / impiantistiche legate alla produzione. L'aspetto legato alle marche acciaio è stato in parte affrontato nel capitolo 2, in cui sono state individuate le famiglie degli acciai da cementazione e bonifica.

Una volta note le produttività è necessario confrontare i valori di tutte le aree / impianto in modo da trovare l'impianto che fa da collo di bottiglia. In realtà i risultati di questa analisi sono in parte noti, in quanto sperimentalmente le aree critiche da questo punto di vista sono il letto oppure il taglio e confezionamento (in particolare il sistema di taglio, dal momento che la produttività delle reggettrici automatiche è molto elevata). Lo scopo dell'analisi dei colli di bottiglia è quindi quello di dimostrare questi risultati empirici per mezzo di tabelle e grafici, e di giustificare la necessità di un revamping del sistema di raffreddamento barre con obiettivi di produttività e qualità, oggetto del presente lavoro di tesi, a cui seguirà, in futuro, un eventuale revamping del sistema di taglio a freddo al fine di incrementare la produttività (gli aspetti qualitativi giocano un ruolo trascurabile in questo settore, in quanto il problema del taglio non è la qualità, ottenuta automaticamente con un taglio a freddo, bensì la lentezza del processo).

L'analisi delle attuali criticità impiantistiche e qualitative inerenti il raffreddamento è un argomento che è già stato affrontato nei capitoli 2 e 3, ai quali si rimanda per ulteriori approfondimenti.

Lo sviluppo delle modifiche impiantistiche a livello di meccanica e automazione rappresenta il cuore di tutto il progetto di revamping, e deve tener conto delle attuali criticità cercando contemporaneamente di elaborare soluzioni a budget il più possibile ridotto, in modo da rendere il revamping effettivamente realizzabile un domani.

Infine, sulla base delle modifiche proposte dovrà, essere effettuata un'analisi costi – benefici, cercando di prevedere nella maniera più accurata possibile (compatibilmente con gli strumenti e i mezzi a disposizione) quali saranno i miglioramenti in termini di produttività e qualità ottenibili con il revamping studiato.

Tutte le precedenti considerazioni si possono riassumere in uno schema a blocchi, visibile a pagina seguente.

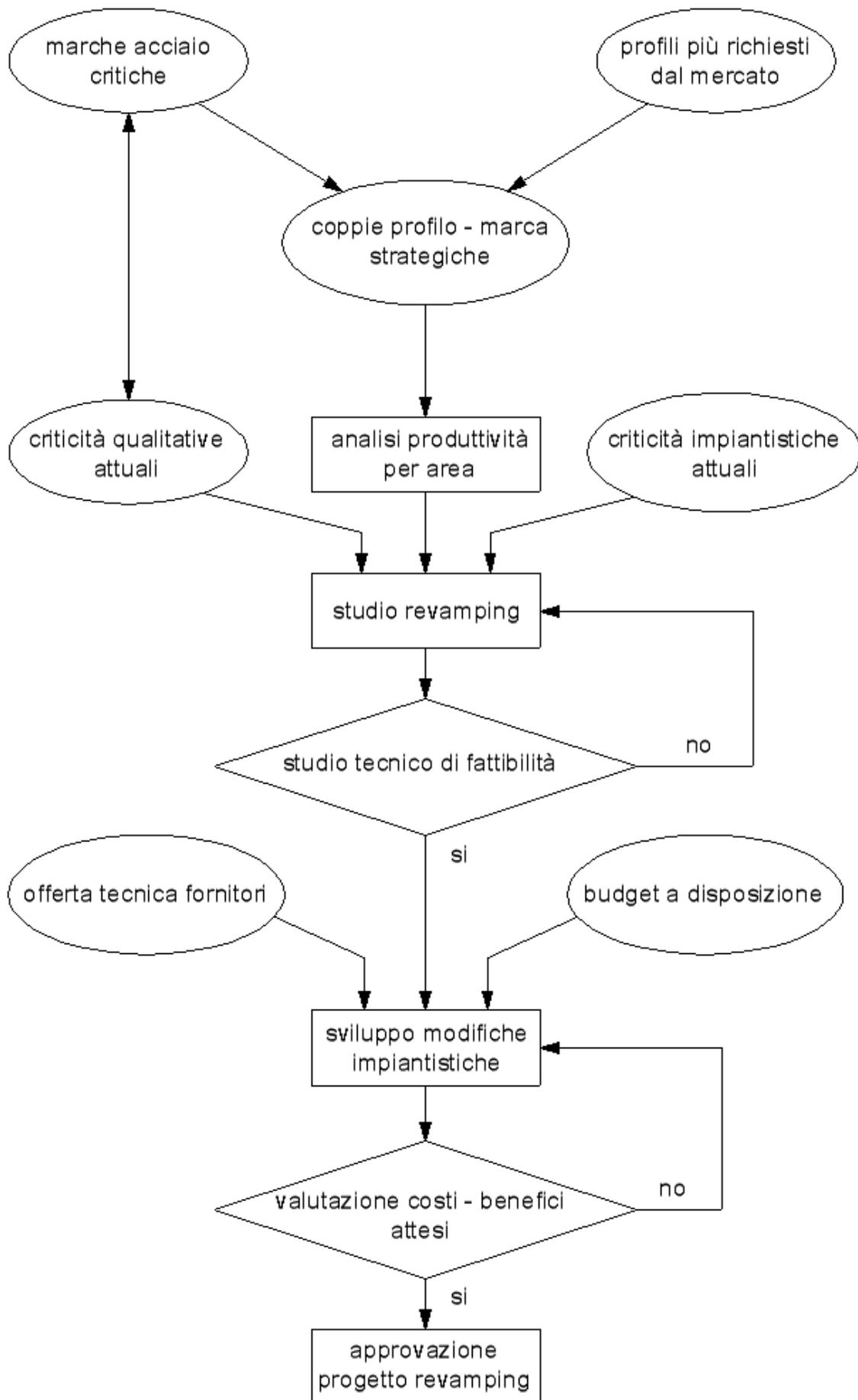


Fig. 70 – Diagramma a blocchi del progetto di revamping

5. MODELLO TERMICO DI RAFFREDDAMENTO

5.1 Aspetti generali

Il calcolo della produttività delle varie aree / impianto è abbastanza semplice, ad eccezione del sistema di raffreddamento, per il quale non è stato mai effettuato in precedenza uno studio completo del raffreddamento delle barre, salvo un modello analitico semplificato per il raffreddamento di barre tonde con coibentazione superiore senza la schermatura riflettente (la quale è stata prevista in seguito, a causa di criticità legate al transitorio, v. oltre per ulteriori dettagli). L'obiettivo di questo capitolo è quello di fornire un modello analitico di raffreddamento sulla base del quale effettuare il calcolo della produttività del sistema di raffreddamento. Tale modello deve presentare diverse caratteristiche, in particolare:

- deve fornire risultati il più vicini possibile alla realtà con tempi di calcolo ridotti
- deve permettere lo studio del raffreddamento sotto cappa ed in aria libera
- deve essere impostato a livello parametrico, per quanto riguarda le temperature di ingresso/uscita cappa, il profilo (forma e dimensioni) e la lunghezza della cappa
- nel caso di raffreddamento sotto cappa, deve tener conto della posizione della barra (come dimostrato in seguito, non tutte le tasche sono "uguali" ai fini della velocità di raffreddamento)

A livello generale, il raffreddamento delle barre avviene per convezione ed irraggiamento, in quanto si può ritenere trascurabile il trasferimento di calore per conduzione attraverso gli stessi rastrelli. Come dimostrato nei calcoli successivi, in realtà il meccanismo dominante è l'irraggiamento, a causa del fatto che la potenza termica emessa è proporzionale alla quarta potenza della temperatura, mentre per la convezione sussiste una legge lineare. Tuttavia sarebbe un errore trascurare l'effetto della convezione: si pensi alle correnti d'aria che provocano l'effetto sinusoidale, di cui si è abbondantemente discusso nel capitolo 2. In questa sede, dovendo effettuare un calcolo semplificato ma allo stesso tempo il più possibile accurato, questo effetto verrà trascurato, ipotizzando una simmetria lungo l'asse longitudinale del letto di raffreddamento, in modo da poter studiare il problema nel piano. Per quanto riguarda la validazione del modello, saranno sovrapposte le curve di raffreddamento sperimentali con quelle teoriche ottenute dal calcolo analitico.

5.2 Convezione

Pur essendo ben noto il fenomeno della convezione naturale, la complessità del moto del fluido rende molto difficile ottenere relazioni analitiche semplici per la trasmissione del calore risolvendo le equazioni del moto e dell'energia. Per la convezione naturale esistono alcune relazioni analitiche, che però mancano di generalità, perché ottenute da geometrie semplici sotto certe ipotesi semplificative. Con l'eccezione di pochi casi semplici, le relazioni di scambio termico in convezione naturale sono dunque basate su studi sperimentali.

Il regime di flusso in convezione naturale è governato da un numero adimensionale, detto numero di Grashof, pari al rapporto tra la forza di galleggiamento e la forza viscosa agenti sul fluido:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)\delta^3}{\nu^2}$$

dove

g = accelerazione di gravità, m/s^2

β = coefficiente di dilatazione cubica, $1/K$ ($\beta = 1/T$ per i gas perfetti)

T_s = temperatura alla superficie, $^{\circ}C$

T_∞ = temperatura del fluido sufficientemente lontano dalla superficie, $^{\circ}C$

δ = lunghezza caratteristica della geometria, m

ν = viscosità cinematica del fluido, m^2/s

La potenza termica trasmessa in convezione naturale da una superficie al fluido circostante è espressa dalla legge di Newton della convezione:

$$W_{conv} = hA(T_s - T_\infty)$$

dove A è l'area della superficie di scambio termico e h è il coefficiente medio di scambio termico della superficie.

Il coefficiente di scambio termico si può ricavare indirettamente dalla seguente formula, relativa al calcolo del numero di Nusselt:

$$Nu = \frac{h\delta}{\lambda} = C(GrPr)^n = CRa^n$$

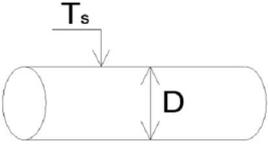
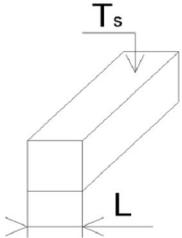
dove Ra è il numero di Rayleigh, prodotto dei numeri di Grashof e di Nusselt.

I valori delle costanti C ed n dipendono dalla geometria della superficie e dal regime di flusso, caratterizzato dal valore del numero di Rayleigh.

È molto importante notare che nell'utilizzare le precedenti relazioni, tutte le proprietà del fluido devono essere valutate alla temperatura di film

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Nel caso specifico, le uniche due geometrie oggetto di studio sono barra tonda e barra quadra, i cui dati principali sono riassunti nella tabella sottostante.

Geometria	Lunghezza caratteristica δ	Numero di Nusselt Nu
<p>Cilindro orizzontale</p> 	D	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$
<p>Barra quadra</p> 	L	$Nu = 0.25Gr^{0.25} Pr^{0.25}$

Tab. 7 – Correlazioni empiriche per il numero di Nusselt per convezione naturale per barre tonde e quadre

Nella tabella seguente sono riportate le proprietà termodinamiche dell'aria a pressione atmosferica per diversi valori di temperatura.

Temperatura T K	Densità ρ kg/m ³	Calore specifico c_p J/(m · °C)	Conducibilità termica λ W/(m · °C)	Diffusività termica α m ² /s	Viscosità dinamica μ kg/(m · s)	Viscosità cinematica ν m ² /s	Numero di Prandtl Pr
<i>Aria</i>							
200	1.766	1003	0.0181	1.02×10^{-5}	1.34×10^{-5}	0.76×10^{-5}	0.740
250	1.413	1003	0.0223	1.57×10^{-5}	1.61×10^{-5}	1.14×10^{-5}	0.724
280	1.271	1004	0.0246	1.95×10^{-5}	1.75×10^{-5}	1.40×10^{-5}	0.717
290	1.224	1005	0.0253	2.08×10^{-5}	1.80×10^{-5}	1.48×10^{-5}	0.714
300	1.177	1005	0.0261	2.21×10^{-5}	1.85×10^{-5}	1.57×10^{-5}	0.712
310	1.143	1006	0.0268	2.35×10^{-5}	1.90×10^{-5}	1.67×10^{-5}	0.711
320	1.110	1006	0.0275	2.49×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.77×10^{-5}	0.710
330	1.076	1007	0.0283	2.64×10^{-5}	1.99×10^{-5}	1.86×10^{-5}	0.708
340	1.043	1007	0.0290	2.78×10^{-5}	2.03×10^{-5}	1.96×10^{-5}	0.707
350	1.009	1008	0.0297	2.92×10^{-5}	2.08×10^{-5}	2.06×10^{-5}	0.706
400	0.883	1013	0.0331	3.70×10^{-5}	2.29×10^{-5}	2.60×10^{-5}	0.703
450	0.785	1020	0.0363	4.54×10^{-5}	2.49×10^{-5}	3.18×10^{-5}	0.700
500	0.706	1029	0.0395	5.44×10^{-5}	2.68×10^{-5}	3.80×10^{-5}	0.699
550	0.642	1039	0.0426	6.39×10^{-5}	2.86×10^{-5}	4.45×10^{-5}	0.698
600	0.589	1051	0.0456	7.37×10^{-5}	3.03×10^{-5}	5.15×10^{-5}	0.698
700	0.504	1075	0.0513	9.46×10^{-5}	3.35×10^{-5}	6.64×10^{-5}	0.702
800	0.441	1099	0.0569	11.7×10^{-5}	3.64×10^{-5}	8.25×10^{-5}	0.704
900	0.392	1120	0.0625	14.2×10^{-5}	3.92×10^{-5}	9.99×10^{-5}	0.705
1000	0.353	1141	0.0672	16.7×10^{-5}	4.18×10^{-5}	11.8×10^{-5}	0.709
1200	0.294	1175	0.0759	22.2×10^{-5}	4.65×10^{-5}	15.8×10^{-5}	0.720
1400	0.252	1201	0.0835	27.6×10^{-5}	5.09×10^{-5}	20.2×10^{-5}	0.732
1600	0.221	1240	0.0904	33.0×10^{-5}	5.49×10^{-5}	24.9×10^{-5}	0.753
1800	0.196	1276	0.0970	38.3×10^{-5}	5.87×10^{-5}	29.9×10^{-5}	0.772
2000	0.177	1327	0.1032	44.1×10^{-5}	6.23×10^{-5}	35.3×10^{-5}	0.801

Tab. 8 – Dati termodinamici dell'aria a pressione atmosferica

Una volta nota la potenza termica emessa in un certo istante è possibile risalire alla velocità di raffreddamento corrispondente a quell'istante. Essendo

$$W = \frac{dQ}{dt} = mc \frac{dT}{dt}$$

si ottiene

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{mc}$$

Poiché molte proprietà termodinamiche variano in maniera più o meno marcata con la temperatura (v. tabella 8), è necessario tener conto di ciò nel modello di calcolo, attraverso interpolazione lineare dei valori corrispondenti alle temperature immediatamente superiore e inferiore alla temperatura istantanea. Questo aspetto è illustrato dettagliatamente nel paragrafo 5.4.

5.3 Irraggiamento

Un corpo ad una temperatura generica T emette nell'ambiente circostante energia, secondo la seguente relazione:

$$W = \varepsilon \sigma S (T^4 - T_{amb}^4)$$

dove

W = potenza termica, W (Watt)

ε = emissività

S = superficie di scambio, m^2

σ = costante di Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(m^2 K^4)$

T_{amb} = temperatura dell'aria ambiente, espressa in Kelvin (K)

Questa formula è valida nel caso di un unico corpo. Nel caso di più corpi le cose si complicano notevolmente in quanto è necessario tenere conto delle azioni mutue di scambio energetico. Lo studio del raffreddamento in placca comporta lo studio di due casi:

- raffreddamento in aria libera
- raffreddamento controllato sotto cappa

In entrambi i casi, tuttavia, è necessario tenere in considerazione le barre adiacenti alla barra oggetto di studio, studiando gli scambi mutui per irraggiamento.

5.3.1. Irraggiamento in aria libera

Come detto, le barre in placca sono affiancate ad una certa distanza le une dalle altre e pertanto il raffreddamento di ogni singola barra risente dell'effetto riscaldante delle barre limitrofe. In prima approssimazione, date le distanze ridotte tra le barre (max. 32 cm con passo 3), si può considerare costante con la distanza l'energia irradiata da ogni barra. L'energia radiante assorbita da una barra posta vicino ad un'altra che a sua volta irradia è però dipendente dall'angolo "di visuale", nel senso che una barra emette radiazione a 360° ma solo la parte corrispondente a quell'angolo viene assorbita dalla barra vicina. Le figure seguenti aiutano a comprendere meglio.

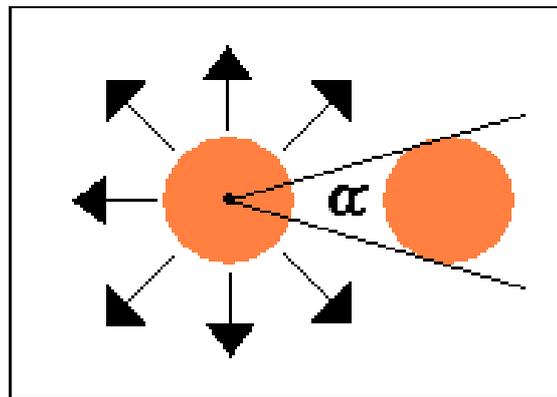


Fig. 71 – Angolo di visuale tra due barre adiacenti

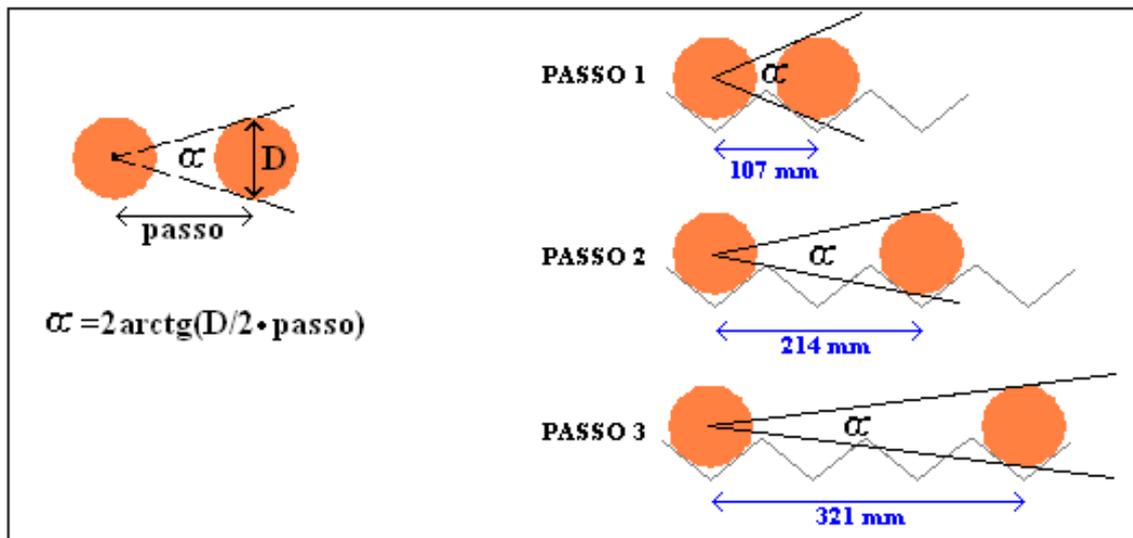


Fig. 72 – Determinazione geometrica dell'angolo di visuale in funzione del passo

Si vede chiaramente che, a parità di diametro, una barra subito adiacente ad un'altra (passo 1) viene investita da una quantità di calore radiante molto superiore rispetto ad una che abbia la più vicina ad

una distanza di tre tasche. Questa quantità assorbita è pari alla quantità W definita a pagina 85 moltiplicata per $\alpha/(2\pi)$. Se le due barre vicine sono ad una temperatura simile, si può pensare che il calore entrante nella barra irradiata sia uguale e contrario a quella parte di calore ceduta dalla barra stessa alla vicina. In pratica è come se la barra trattenesse una frazione di energia pari ad $\alpha/(2\pi)$ dell'energia totale emessa. Se le barre adiacenti sono due (una per lato) l'effetto si raddoppia. Normalmente in placca ogni barra è preceduta da un'altra più fredda e seguita da un'altra più calda, per cui si deve introdurre un'ulteriore approssimazione e considerare, almeno per un tratto limitato di placca, le barre come aventi la stessa T . Tenendo presente che nella pratica la barra precedente è più calda mentre quella seguente è più fredda, si può ritenere questa ipotesi accettabile.

Considerato che i profili sono variabili e che il passo adottato (n° di tasche occupate) varia al variare di questi, è possibile valutare per i tondi il valore di energia trattenuta da ogni barra, come indicato nella tabella seguente.

% ENERGIA RADIANTE TRATTENUTA TONDO (dati di tabella)						
tasche vuote tra due barre	dimensione	passo	1 barra a fianco	2 barre a fianco	2 barre + inox sotto	2 barre + inox + cappa riflettente
0	38	1	5,6	11,2	16,8	22,4
0	45	1	6,6	13,2	19,8	26,4
0	50	1	7,3	14,6	21,9	29,2
0	55	1	8,0	16,0	24,0	32,0
0	60	1	8,7	17,4	26,1	34,8
0	65	1	9,4	18,8	28,2	37,6
0	70	1	10,1	20,1	30,2	40,3
1	75	2	5,5	11,0	16,6	22,1
1	80	2	5,9	11,8	17,7	23,5
1	85	2	6,2	12,5	18,7	25,0
1	90	2	6,6	13,2	19,8	26,4
1	95	2	7,0	13,9	20,9	27,8
1	100	2	4,9	9,8	14,8	19,7
2	105	3	5,2	10,3	15,5	20,7
2	110	3	5,4	10,8	16,2	21,6
2	115	3	5,6	11,3	16,9	22,6
2	120	3	5,9	11,8	17,7	23,5
2	125	3	6,1	12,2	18,4	24,5

Tab. 9 – Percentuale di energia radiante trattenuta causa barre adiacenti e coibentazione (per tondi)

In realtà questa tabella contiene due colonne riguardanti la zona coibentata, i cui valori riportati si basano sull'ipotesi di poter considerare l'effetto della coibentazione inferiore uguale all'effetto di una barra adiacente, idem per la coibentazione superiore: quindi con il letto pieno, sotto cappa la percentuale di energia radiante trattenuta si calcola come se intorno ad una barra ce ne fossero 4. Questa ipotesi però non verrà applicata nello studio del raffreddamento sotto cappa, in quanto verrà studiato analiticamente mediante il calcolo dei fattori di vista (v. paragrafo successivo).

Gli stessi concetti finora esposti si possono estendere anche ai profili quadri, i cui risultati sono visibili in tabella.

% ENERGIA RADIANTE TRATTENUTA PER QUADRO (calcolo teorico)						
tasche vuote tra due barre	dimensione	passo	1 barra a fianco	2 barre a fianco	2 barre + inox sotto	2 barre + inox + cappa riflettente
0	40	1	7,19	14,39	21,58	28,77
0	45	1	8,28	16,57	24,85	33,13
0	47	1	8,73	17,47	26,20	34,93
0	48	1	8,96	17,92	26,88	35,84
0	50	1	9,42	18,84	28,26	37,68
0	55	1	10,60	21,20	31,80	42,40
0	60	1	11,83	23,65	35,48	47,30
0	63	1	12,58	25,16	37,74	50,33
1	65	2	5,64	11,28	16,92	22,56
1	67	2	5,84	11,68	17,52	23,36
1	70	2	6,15	12,29	18,44	24,59
1	75	2	6,66	13,33	19,99	26,66
1	80	2	7,19	14,39	21,58	28,77
1	85	2	7,73	15,46	23,20	30,93
2	90	3	5,14	10,29	15,43	20,58
2	100	3	5,81	11,62	17,42	23,23

Tab. 10 – Percentuale di energia radiante trattenuta causa barre adiacenti e coibentazione (per quadro)

Si tenga presente che i record delle ultime due tabelle riguardano solo i profili prodotti nell'anno 2011. Il modello termodinamico tuttavia permette di estendere il calcolo a tutti i profili compresi nel range di produzione.

Per correttezza si dovrebbero decurtare i valori ottenuti del 20/30%, tenuto conto dei fenomeni perturbativi come le dispersioni, le diffusioni, il potere riflettente reale delle superfici, nonché di tutte le ipotesi semplificative fatte, e che qui di seguito sono riassunte:

- considerare costante l'energia irradiata da ogni barra nelle vicinanze della stessa (in realtà vi sono dispersioni ma le distanze sono piccole)
- date 2 barre, assumere che il calore entrante nella barra 2 sia uguale e contrario a quella parte di calore ceduta dalla barra 2 stessa alla barra 1 con lo stesso principio dell'angolo di visuale (in realtà la superficie ricevente è cilindrica e non piana e vi possono essere riflessioni e dispersioni)
- considerare le barre come aventi la stessa temperatura (è l'ipotesi più audace, perché in realtà non è mai verificata: infatti soprattutto nelle laminazioni a 1 filo le barre arrivano distanziate anche di oltre 2 minuti e questo comporta differenze sostanziali di T, però il nostro scopo è creare sotto cappa un effetto forno che renda queste differenze le minori possibili. In più, come già accennato in precedenza, c'è la compensazione tra barra che precede e barra che segue)
- infine, attribuire alle piastre inox sotto le barre un effetto simile a quello delle barre limitrofe
Si tenga poi conto che le piastre non ricoprono tutta la larghezza della cappa

5.3.2. Irraggiamento sotto cappa

Lo studio del raffreddamento sotto cappa deve tener conto dei seguenti aspetti:

- posizione effettiva della barra all'interno della cappa: le barre collocate nelle zone più esterne si raffredderanno più velocemente di quelle situate nella zona centrale
- massa termica presente sotto cappa: quanta energia irradiano le barre sotto cappa verso le coibentazioni inferiore e superiore (quindi bisogna conoscere quante barre sono presenti e le loro temperature)
- revamping: il modello termico di raffreddamento deve essere completamente parametrico in modo da poter studiare l'effetto di eventuali modifiche in sede di revamping

La nomenclatura utilizzata in seguito è visibile in figura (per semplicità le tasche non sono state disegnate).

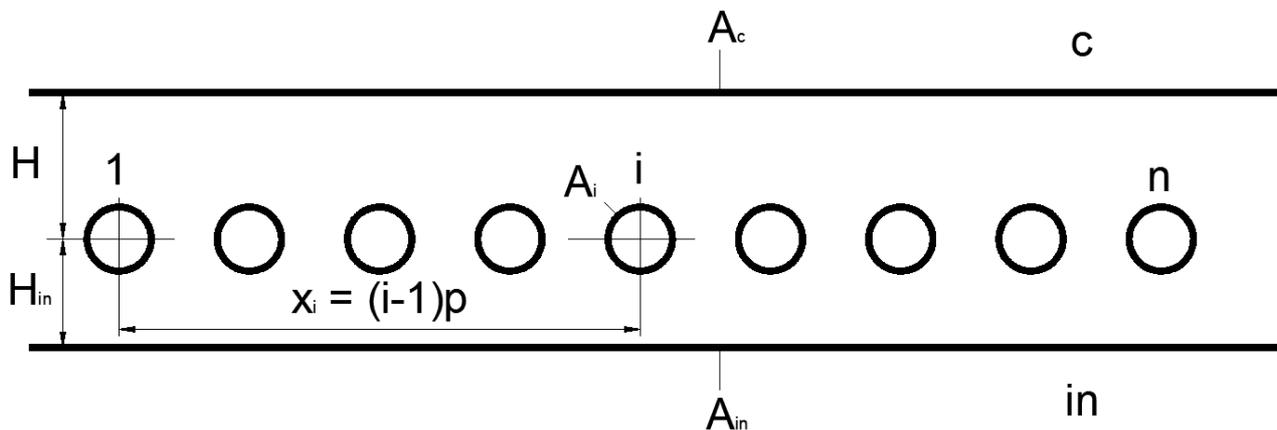


Fig. 73 – Nomenclatura adottata

Il modello di raffreddamento prevede che la barra entri sotto cappa, occupando la posizione 1, ed avanzi fino ad occupare l'ultima posizione n. A ciascuna posizione corrisponde una ben determinata potenza termica emessa. Un altro problema è quello di stimare la massa termica, in sostanza quanta energia radiante va ad incidere sulle due coibentazioni. A tale scopo è necessario stimare una distribuzione di temperatura, assegnando ad una barra un valore di temperatura plausibile. Dovendo per forza di cose ottenere, alla fine, un modello snello e contemporaneamente versatile, la stima della distribuzione di temperatura è stata effettuata basandosi su una prova di raffreddamento in placca di un profilo di medie dimensioni. La prova è stata condotta con letto pieno ed impianto a regime (in modo da evitare di falsificare i risultati a causa di fermate per guasti, blocking o altro).

Durante tale prova è stato costantemente monitorato, tramite pirometro a mano, il raffreddamento di una barra dall'ingresso sotto cappa fino all'uscita, ottenendo quindi una curva di raffreddamento per punti. Da qui è stata ricavata un'approssimazione polinomiale di tale curva. I risultati di questa analisi sono visibili nel grafico riportato in basso.

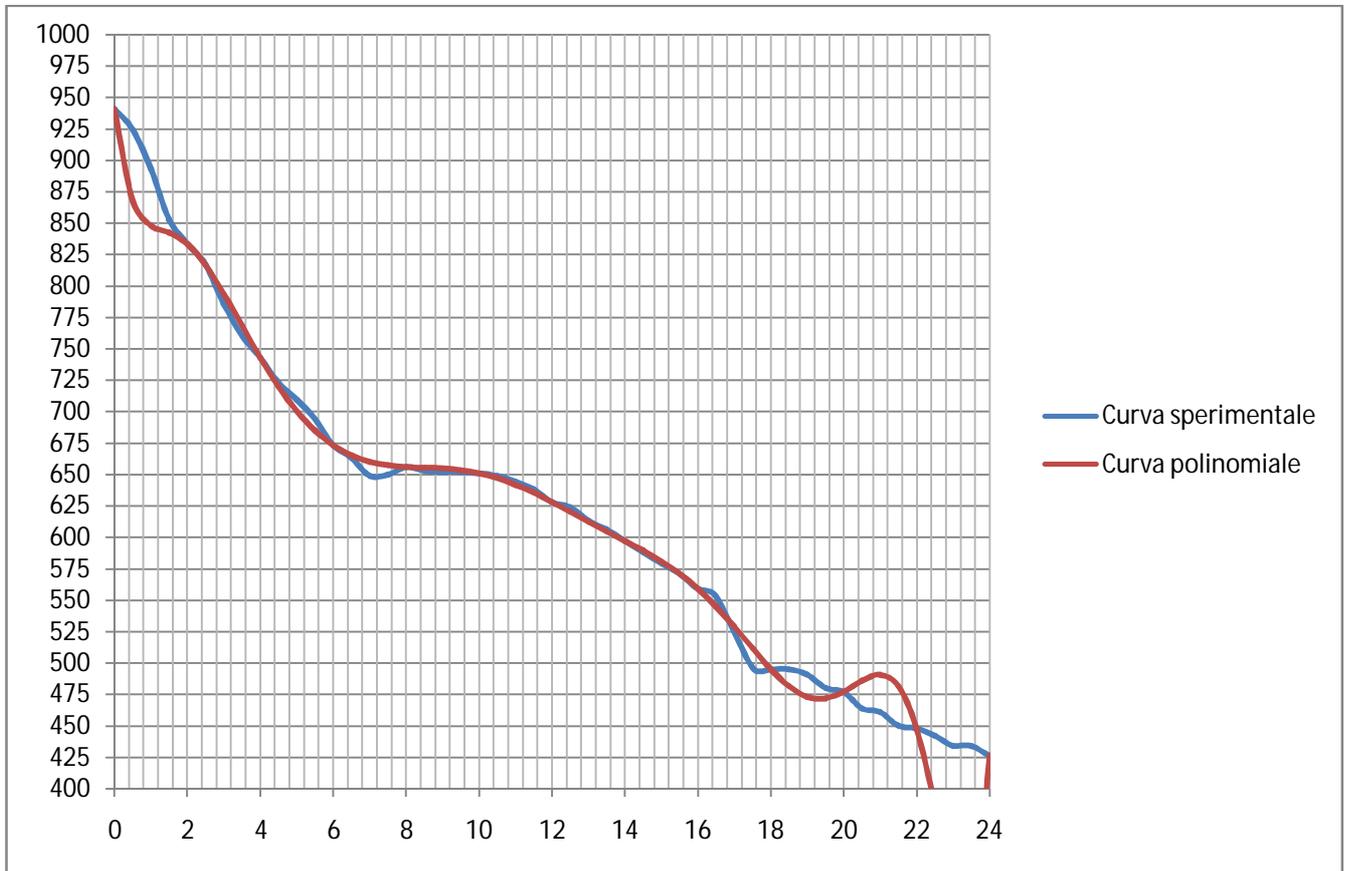


Fig. 74 – Curva sperimentale e polinomiale approssimata relativa a raffreddamento T60, VBC42S

È stato scelto un polinomio di grado 12, in quanto valori superiori comportavano problemi di malcondizionamento della matrice di inversione del sistema di equazione implementato su Matlab. In ordinate sono riportate le temperature in °C mentre in ascissa è riportato il tempo in minuti. L'idea alla base della stima della massa termica in placca è legata al fatto che se l'impianto marcia a regime, esiste una legge di proporzionalità diretta tra la distanza percorsa (da intendere naturalmente a step e non in maniera continua) ed il tempo. Questo permette di poter calcolare la temperatura sotto cappa in una ben determinata tasca semplicemente conoscendo la sua posizione x_i . Se la curva polinomiale approssimata è $T(t)$, il valore della temperatura corrispondente ad una certa posizione x_i sarà

$$T(x_i) = T\left(\frac{x_i}{(n-1)p} t_{max}\right)$$

dove

$(n-1)p$ è la distanza totale percorsa da una barra sotto cappa

t_{\max} è il tempo che intercorre tra l'ingresso sotto cappa e l'uscita, ricavabile dal grafico precedente

In questo modo è possibile conoscere la distribuzione approssimata di temperatura sotto cappa, e quindi è possibile stimare con sufficiente precisione l'energia radiante che incide sulla coibentazione superiore e su quella inferiore. Inoltre, è possibile affermare che se la cadenza produttiva della placca è tale che ogni 5 minuti (ad esempio) viene eseguito un passo, ciò significa che a regime la barra che si trova in posizione x_i alla temperatura T_i dopo 5 minuti andrà a occupare la posizione x_{i+1} , e nel frattempo la temperatura sarà scesa al valore T_{i+1} . Inoltre, nell'ottica di studiare il raffreddamento di una barra a partire da una certa temperatura d'ingresso (che volendo può essere leggermente superiore a quella stimata per la determinazione della massa termica senza comportare grossi errori), è possibile prevedere nel modello che la barra si muova di tasca in tasca semplicemente associando a ciascuna posizione la potenza termica emessa in quella determinata tasca, e facendo in modo che la barra esegua un passo nel momento in cui la sua temperatura raggiunga il valore previsto per la tasca successiva.

5.3.3. Modello analitico di raffreddamento controllato

Lo studio del modello prevede la considerazione di tutti gli scambi energetici verso la cappa superiore (nel seguito indicata per semplicità come "cappa"), una generica barra in posizione x_i e la cappa inferiore (nel seguito indicata come "inox").

Potenza termica incidente sulla cappa ($W_{inc,c}$):

- potenza emessa da laminato ($W_{em,l}$)
- potenza riflessa da laminato ($W_{rif,l}$)
- potenza emessa da inox ($W_{em,in}$)
- potenza riflessa da inox ($W_{rif,in}$)

Potenza termica incidente su una certa barra ($W_{inc,i}$):

- potenza emessa da cappa ($W_{em,c}$)
- potenza riflessa da cappa ($W_{rif,c}$)
- potenza emessa da inox ($W_{em,in}$)
- potenza riflessa da inox ($W_{rif,in}$)

Potenza termica incidente su inox ($W_{inc,in}$):

- potenza emessa da laminato ($W_{em,l}$)
- potenza riflessa da laminato ($W_{rif,l}$)
- potenza emessa da cappa ($W_{em,c}$)
- potenza riflessa da cappa ($W_{rif,c}$)

Tralasciando per il momento i fattori di vista (da prendere in considerazione solo nel calcolo degli scambi mutui), di seguito sono riportate le formule per il calcolo dei contributi sopra illustrati.

Potenza emessa da barra i – esima

$$W_{em,i} = \varepsilon_{acc} \sigma A_i (T_i^4 - T_{amb}^4) \quad (1)$$

(l'emissività dell'acciaio è stata fissata a 0.85 tenendo conto dell'ossidazione alle alte temperature)

Potenza riflessa da barra i – esima

$$W_{rif,i} = (1 - \varepsilon_{acc}) W_{inc,i} \quad (2)$$

Potenza emessa da inox

$$W_{em,in} = \varepsilon \sigma A (T_{in}^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

(l'emissività delle due coibentazioni è stata fissata a 0.25 tenendo conto di una piccola perdita di potere riflettente a scopo cautelativo, inoltre l'area delle due coibentazioni è la stessa per cui non è necessario inserire un pedice per distinguere l'area dell'inox dall'area della cappa)

Potenza riflessa da inox

$$W_{rif,in} = (1 - \varepsilon) W_{inc,in} \quad (4)$$

Potenza emessa da cappa

$$W_{em,c} = \varepsilon \sigma A (T_c^4 - T_{amb}^4) \quad (5)$$

Potenza riflessa da cappa

$$W_{rif,c} = (1 - \varepsilon)W_{inc,c} \quad (6)$$

Ora che sono noti tutti i contributi, è possibile trovare le espressioni analitiche delle potenze incidenti su cappa, inox, ed una barra in posizione generica i . Risulta altresì necessario tenere conto dei fattori di vista mutui (il cui calcolo è illustrato più avanti)

Potenza termica incidente sulla cappa:

$$W_{inc,c} = \sum_{i=1}^n (W_{em,i} + W_{rif,i})f_{i,c} + (W_{em,in} + W_{rif,in})f_{in,c} \quad (7)$$

Potenza termica incidente sull'inox:

$$W_{inc,in} = \sum_{i=1}^n (W_{em,i} + W_{rif,i})f_{i,in} + (W_{em,c} + W_{rif,c})f_{c,in} \quad (8)$$

(nota: a causa della simmetria della configurazione, i calcoli eseguiti per la cappa sono gli stessi eseguiti per l'inox a patto di scambiare i pedici "in" con "c" e viceversa)

Potenza termica incidente su una barra generica:

$$W_{inc,i} = (W_{em,c} + W_{rif,c})f_{c,i} + (W_{em,in} + W_{rif,in})f_{in,i} \quad (9)$$

Per il momento sono state individuate 9 equazioni, tuttavia ci sono 11 incognite ($W_{inc,c}$, $W_{inc,i}$, $W_{inc,in}$, $W_{em,i}$, $W_{rif,i}$, $W_{em,in}$, $W_{rif,in}$, $W_{em,c}$, $W_{rif,c}$, T_{in} , T_c). Si tenga presente che l'obiettivo è trovare la potenza incidente sulla barra i – esima, pertanto i fattori di vista sono da intendersi come parametri, sulla base dei quali discriminare tutte le posizioni i da 1 fino ad n . Ciò significa che mancano ancora due equazioni. In realtà queste due equazioni si possono trovare facilmente considerando il bilancio energetico della cappa e dell'inox in una situazione di impianto a regime (cadenza regolare).

La potenza emessa deve essere uguale a quella assorbita, pertanto si ha (sia per cappa che per inox):

$$W_{em,c/in} = \varepsilon W_{inc,c/in} \quad (10 / 11)$$

A questo punto il sistema comprende 11 equazioni ed 11 incognite, ed essendo un sistema lineare, la soluzione esiste ed è unica. Di seguito sono riportati solo i risultati più importanti, espressi in una forma implicita funzionale al calcolo finale della potenza incidente sulla barra i-esima.

$$T_{in}^4 - T_{amb}^4 = \frac{1}{\sigma A} \frac{a' + \frac{c'a}{b}}{b' - \frac{c'c}{b}} \quad (12)$$

$$T_c^4 - T_{amb}^4 = \frac{a}{b\sigma A} + \frac{c}{b} (T_{in}^4 - T_{amb}^4) \quad (13)$$

in cui compaiono le seguenti costanti:

$$a = \varepsilon_{acc} \sigma A_i \sum_{i=1}^n (T_i^4 - T_{amb}^4) f_{i,c}; \quad b = 1 - (1 - \varepsilon_{acc}) \sum_{i=1}^n f_{c,i} f_{i,c}; \quad c = (1 - \varepsilon_{acc}) \sum_{i=1}^n f_{in,i} f_{i,c} + f_{in,c}$$

$$a' = \varepsilon_{acc} \sigma A_i \sum_{i=1}^n (T_i^4 - T_{amb}^4) f_{i,in}; \quad b' = 1 - (1 - \varepsilon_{acc}) \sum_{i=1}^n f_{in,i} f_{i,in}; \quad c' = (1 - \varepsilon_{acc}) \sum_{i=1}^n f_{c,i} f_{i,in} + f_{c,in}$$

Una volta ricavato il primo membro della (12), è possibile ricavare facilmente il primo membro della (13). A questo punto i due termini così ottenuti si possono usare nelle equazioni seguenti:

$$W_{inc,c/in} = \sigma A (T_{c/in}^4 - T_{amb}^4) \quad (14/15)$$

A questo punto è sufficiente ricavare i primi membri delle equazioni (3), (4), (5), (6), e sostituendoli nella (9), ricavare la potenza termica incidente sulla barra i – esima. Questo calcolo deve essere eseguito per tutte le n posizioni (tasche disponibili) sotto cappa. Nel ricavare la curva di raffreddamento, man mano che la temperatura scende la barra eseguirà in automatico (all'interno del modello di calcolo) i passi fino ad uscire dalla cappa una volta raggiunti i 500°C.

Per quanto riguarda il calcolo dei fattori di vista, è stato eseguito tenendo conto che le superfici riflettono solo in modo diffuso. Questa è la ragione per cui lo stesso fattore di vista è stato usato sia per la potenza termica emessa che per quella riflessa. Il calcolo analitico dei fattori di vista è illustrato dettagliatamente in seguito.

Fattore di vista barra i-esima – cappa/inox ($f_{i,c/in}$)

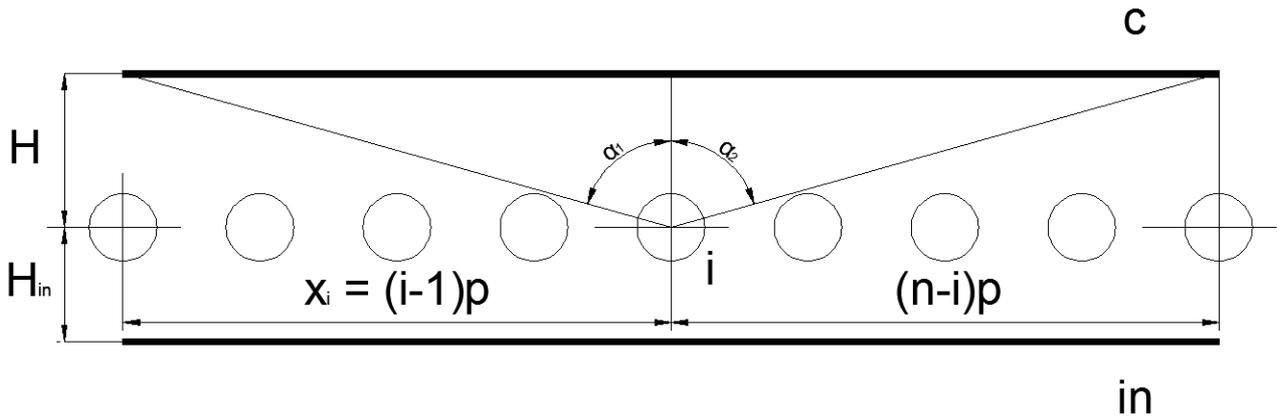


Fig. 75 – Determinazione approssimata fattore di vista barra – cappa e barra - inox

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{(n-i)p}{H} \right); \quad \alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{(i-1)p}{H} \right)$$

$$f_{i,c} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{(n-i)p}{H} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{(i-1)p}{H} \right) \right]$$

$$f_{i,in} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{(n-i)p}{H_{in}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{(i-1)p}{H_{in}} \right) \right]$$

Per ragioni di semplicità di calcolo (necessaria al fine di poter parametrizzare il numero di tasche e la larghezza della cappa), le barre 1 ed n risultano coperte per metà, pertanto la radiazione incidente su di esse è minore di quella reale, ne consegue che il raffreddamento previsto dal modello è più veloce di quello reale; in realtà ciò è controbilanciato dal fatto che alle estremità ci sono effetti di bordo che, uniti alla presenza di correnti d'aria, determinano una diminuzione della velocità di raffreddamento.

Fattore di vista cappa/inox – barra i-esima ($f_{c/in,i}$)

Questi fattori di vista si calcolano facilmente sfruttando la legge di reciprocità:

$$A_i f_{i,j} = A_j f_{j,i}$$

Pertanto si ricava

$$f_{c/in,i} = \frac{A_i f_{i,c/in}}{A}$$

Fattore di vista inox – cappa e cappa – inox ($f_{in,c}$ ed $f_{c,in}$)

Il metodo di calcolo è illustrato nella seguente figura.

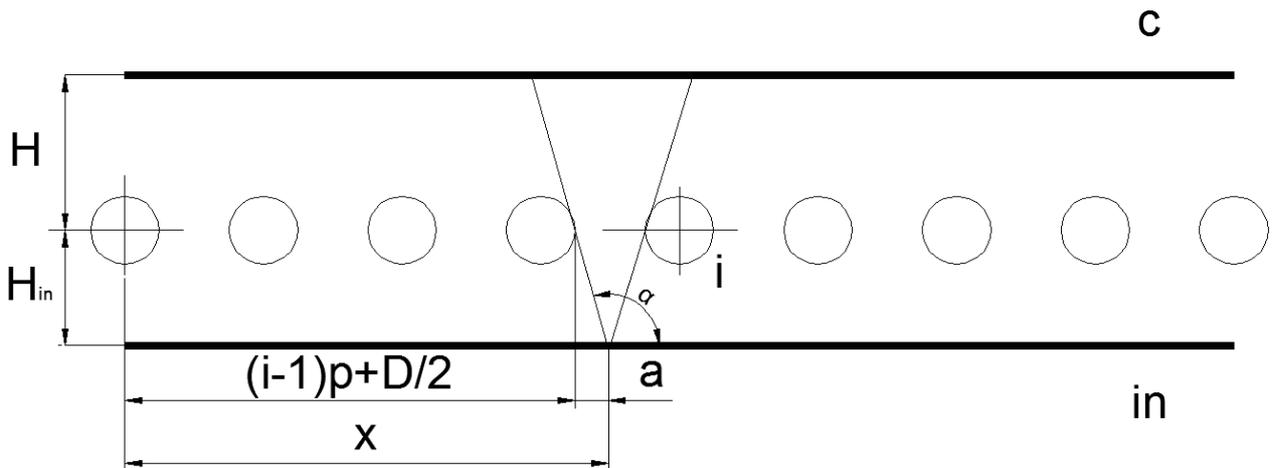


Fig. 76 – Determinazione geometrica dell'angolo α

In seguito viene illustrato il calcolo del fattore di vista inox – cappa, l'altro fattore si può ottenere analogamente a quanto fatto prima, sfruttando quindi la regola di reciprocità. Il metodo di calcolo è in realtà un metodo approssimato: fissato un punto x sull'inox, si vanno ad individuare tutti gli angoli di visuale tra le varie barre adiacenti, individuazione in realtà approssimata dal fatto che i segmenti inclinati rappresentati in figura non sono tangenti alle barre ma passano per i loro quadranti, generando un errore sull'angolo, errore che comunque si può ritenere trascurabile considerando le incertezze del modello dovute ad altri fattori come il potere riflettente, la lunghezza della cappa, eventuali correnti d'aria e così via. È inoltre da tener presente il fatto che introdurre nel modello la determinazione del punto di tangenza avrebbe appesantito notevolmente l'algoritmo di

calcolo, in quanto tale punto dipende dal numero di tasche vuote tra una barra e l'altra, dalla dimensione del profilo e dalla sua forma. Questo metodo è stato assunto valido in prima approssimazione anche per i profili quadrati.

L'angolo α si può determinare usando le seguenti relazioni matematiche:

$$\alpha = \operatorname{atan2}\left(\frac{H + H_{in}}{km}\right)$$

$$m = \begin{cases} \min\left\{x; \left|[(i-1)p + D/2 - x] \frac{H + H_{in}}{H_{in}}\right|\right\} & \text{se } x > (i-1)p + D/2 \\ \min\left\{L - x; \left|[(i-1)p + D/2 - x] \frac{H + H_{in}}{H_{in}}\right|\right\} & \text{se } x < (i-1)p + D/2 \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} -1 & \text{se } x > (i-1)p + D/2 \\ +1 & \text{se } x < (i-1)p + D/2 \end{cases}$$

Al fine del calcolo del fattore di vista è necessario conoscere anche l'angolo β indicato in figura:

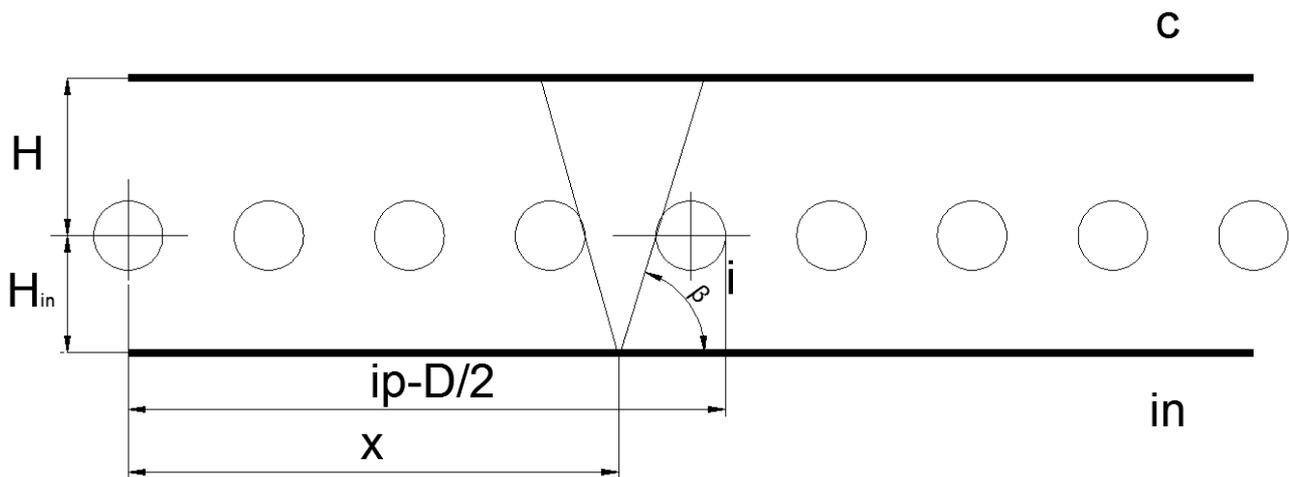


Fig. 77 – Determinazione geometrica dell'angolo β

L'angolo α si può determinare usando le seguenti relazioni matematiche:

$$\beta = \operatorname{atan2}\left(\frac{H + H_{in}}{km}\right)$$

$$m = \begin{cases} \min\left\{x; \left|[ip - D/2 - x] \frac{H + H_{in}}{H_{in}}\right|\right\} & \text{se } x > ip - D/2 \\ \min\left\{L - x; \left|[ip - D/2 - x] \frac{H + H_{in}}{H_{in}}\right|\right\} & \text{se } x < ip - D/2 \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} -1 & \text{se } x > ip - D/2 \\ +1 & \text{se } x < ip - D/2 \end{cases}$$

Considerato un punto x sull'inox ed un tratto infinitesimo dx situato a cavallo di questo punto, è necessario calcolare tutti gli angoli di visuale α_i, β_i con $i = 1, \dots, n-1$. Per capire meglio il contesto si consideri la seguente figura:

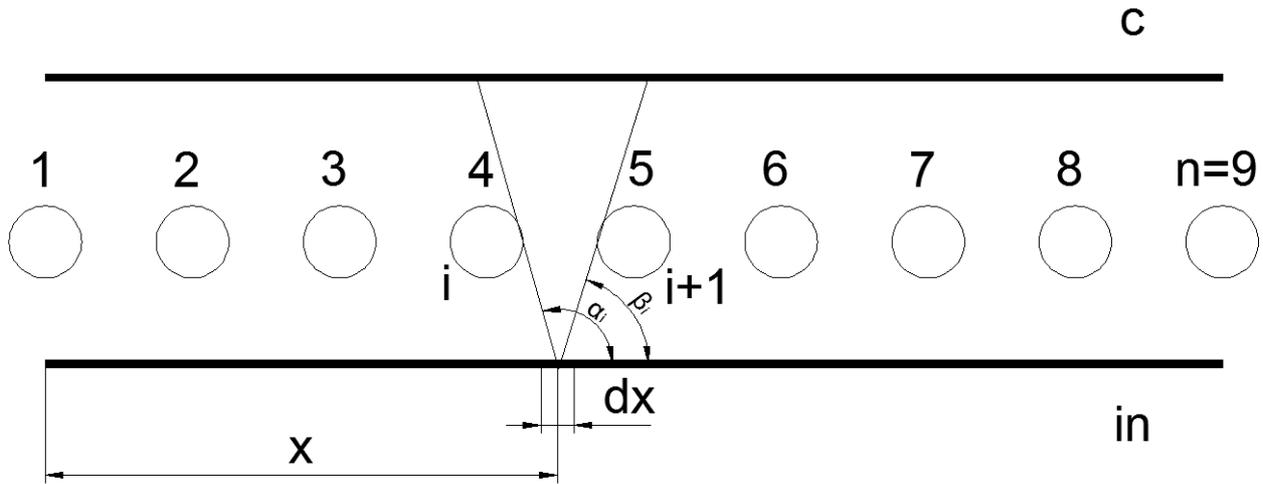


Fig. 78 – Determinazione angoli di visuale per un tratto infinitesimo lungo dx in posizione x

Per ciascun tratto infinitesimo si calcolerà l'angolo complessivo di visuale tra il tratto stesso e la cappa, dato da

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha_i - \beta_i}{2\pi}$$

L'elevata lunghezza della placca di raffreddamento in rapporto alla larghezza della zona coibentata permette di ipotizzare una simmetria rispetto ad un asse ortogonale al foglio, quindi di studiare il problema nel piano. Pertanto il fattore di vista da inox a cappa si può ottenere tramite un integrale sulla larghezza L :

$$f_{in,c} = \frac{1}{L} \int_0^L \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i - \beta_i}{2\pi} dx$$

Dal punto di vista operativo questa formula risulta "scomoda" a causa delle disuguaglianze riportate a pagina 97. Per ottenere una forma più semplice per il calcolo dell'integrale conviene effettuare $n-1$ integrali su tutta la lunghezza, ciascuno con riferimento ad una coppia di barre, in altre parole si ha

$$f_{in,c} = \sum_{i=1}^{n-1} \int_0^L \frac{\alpha_i - \beta_i}{2\pi} dx$$

La formula definitiva del calcolo del fattore di vista è riportata in basso:

$$f_{in,c} = \frac{1}{2\pi L} \sum_{i=1}^{n-1} \left[\int_0^L \alpha_i dx + \int_0^L \beta_i dx \right]$$

Per ciascun valore di $i = 1 \dots n-1$ ciascuno dei due integrali tra parentesi quadra deve essere ulteriormente diviso in due parti, in quanto l'espressione di α_i cambia in corrispondenza di $x = (i-1)p + D/2$, mentre l'espressione di β_i cambia in corrispondenza di $x = ip - D/2$.

Per quanto riguarda il calcolo del fattore di vista cappa – inox esso risulta uguale a quello inox – cappa a causa del fatto che le aree sono uguali e tenendo conto della regola di reciprocità.

Una volta nota la potenza incidente sulla barra nel corso del raffreddamento (tenendo presente che varia in funzione della temperatura assumendo i valori corrispondenti ad $i = 1 \dots n$) è possibile calcolare la potenza assorbita dalla barra tramite la semplice relazione

$$W_{ass,i} = \varepsilon_{acc} W_{inc,i}$$

Tenendo presente inoltre l'influenza delle barre adiacenti, se y è il valore percentuale di energia radiante trattenuta (N.B. poiché lo studio dell'influenza dell'inox e della cappa è stato già studiato a parte è necessario prendere come riferimento il valore corrispondente a due barre), la potenza emessa dalla barra in corrispondenza della tasca i – esima vale

$$W_{em,i} = \varepsilon_{acc} \sigma A_{barra} (T^4 - T_{amb}^4) \left(1 - \frac{y}{100}\right) - W_{ass,i}$$

5.4 Curva di raffreddamento

L'ipotesi alla base del calcolo della velocità di raffreddamento della barra è che gli effetti dovuti alla convezione ed all'irraggiamento si possano sommare algebricamente. Detta W_{irr} la potenza termica emessa per irraggiamento e W_{conv} la potenza emessa per convezione naturale, si può affermare quindi che la potenza termica emessa dalla barra in un certo istante t dipende dalla temperatura T ed è pari a

$$W(T) = W_{irr} + W_{conv}$$

Come già accennato a pagina 84, la velocità di raffreddamento si può esprimere come

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{mc}$$

Per determinare la curva di raffreddamento è necessario calcolare, in funzione della velocità di raffreddamento all'istante t , la temperatura raggiunta all'istante $t + \Delta t$, ottenibile dalla precedente relazione intendendo il primo membro non più come una derivata ma come un rapporto tra piccole variazioni:

$$\Delta T = \frac{W}{mc} \Delta t \text{ da cui } T(t + \Delta t) = T - \Delta T = T - \frac{W}{mc} \Delta t$$

Δt deve essere molto piccolo, nel caso specifico è sufficiente anche un valore pari a 1 o 2 secondi, quello che cambia è la precisione della curva, nel senso che minore è Δt più il risultato è accurato.

Per quanto riguarda il valore di temperatura iniziale, è necessario capire qual è la temperatura di ingresso delle barre sotto cappa. Essa dipende fondamentalmente dalla dimensione del profilo, in quanto i profili di grosse dimensioni subiscono un minore numero di "colpi" rispetto ai profili più piccoli (un colpo è un restringimento di sezione nel passaggio attraverso una gabbia) e quindi la loro laminazione termina molto prima dell'ultima gabbia, pertanto da qui fino all'ingresso in placca si registra un calo di temperatura dell'ordine della decina di gradi, con una temperatura finale minore di quella registrata per i profili più piccoli. Quest'ultimi, infatti, subiscono un maggiore numero di restringimenti di sezione e percorrono una distanza minore (dall'ultima gabbia in presa) per giungere in placca, tutto ciò comporta una temperatura finale maggiore di quella registrata per i profili grossi, ciò nonostante la minore capacità termica che comporta un rapido calo di temperatura durante il raffreddamento.

La misura della temperatura di ingresso sotto cappa è stata effettuata tramite pirometro a mano direttamente sulla placca di raffreddamento su un profilo tondo da 60 mm di diametro. La temperatura media rilevata è di 1040 °C, e trattandosi di un profilo medio questo valore è stato assunto valido anche per profili di dimensioni piccole e grandi. Tale valore è stato usato nel calcolo della produttività illustrato nel successivo capitolo, mentre nel paragrafo seguente il valore di partenza deve essere uguale a quello del primo punto della curva di raffreddamento sperimentale in modo da permettere un confronto tra i due andamenti.

5.5 Verifica modello termico di raffreddamento

Di seguito sono riportati tre grafici, ciascuno dei quali rappresenta il confronto tra la curva di raffreddamento ottenuta tramite il modello analitico precedentemente illustrato e la curva rilevata sperimentalmente (in condizioni di impianto a regime e letto pieno, ipotesi su cui si basa il modello analitico e quindi essenziali ai fini del confronto stesso). Si nota che per quanto riguarda il tempo di raffreddamento, il modello analitico fornisce risultati praticamente analoghi a quelli sperimentali, di conseguenza è affidabile per poterlo utilizzare nel calcolo della produttività. Per quanto riguarda invece l'andamento effettivo di temperatura, in tutti e tre i grafici si riscontra un allontanamento dalla curva nella zona centrale, dovuta al fatto che il modello analitico non tiene conto del fenomeno della recalescenza, fenomeno che in realtà si manifesta durante la trasformazione di fase attraverso un incremento di temperatura dovuto alla restituzione del calore latente di trasformazione (si può immaginare, volendo, che tale incremento di temperatura sia dovuto ad una sorgente interna di calore). Si tenga presente che il confronto tra curva analitica e curva sperimentale è valido per temperature maggiori o uguali a 500°C, in quanto sotto i 500°C le barre escono dalla cappa raffreddandosi in aria libera, mentre la curva analitica si basa sull'ipotesi di raffreddamento in cappa. I grafici relativi ai confronti sono riportati nelle pagine seguenti.

Curve di raffreddamento (sperimentale e analitica) relative a VTK34B-4 BS.90

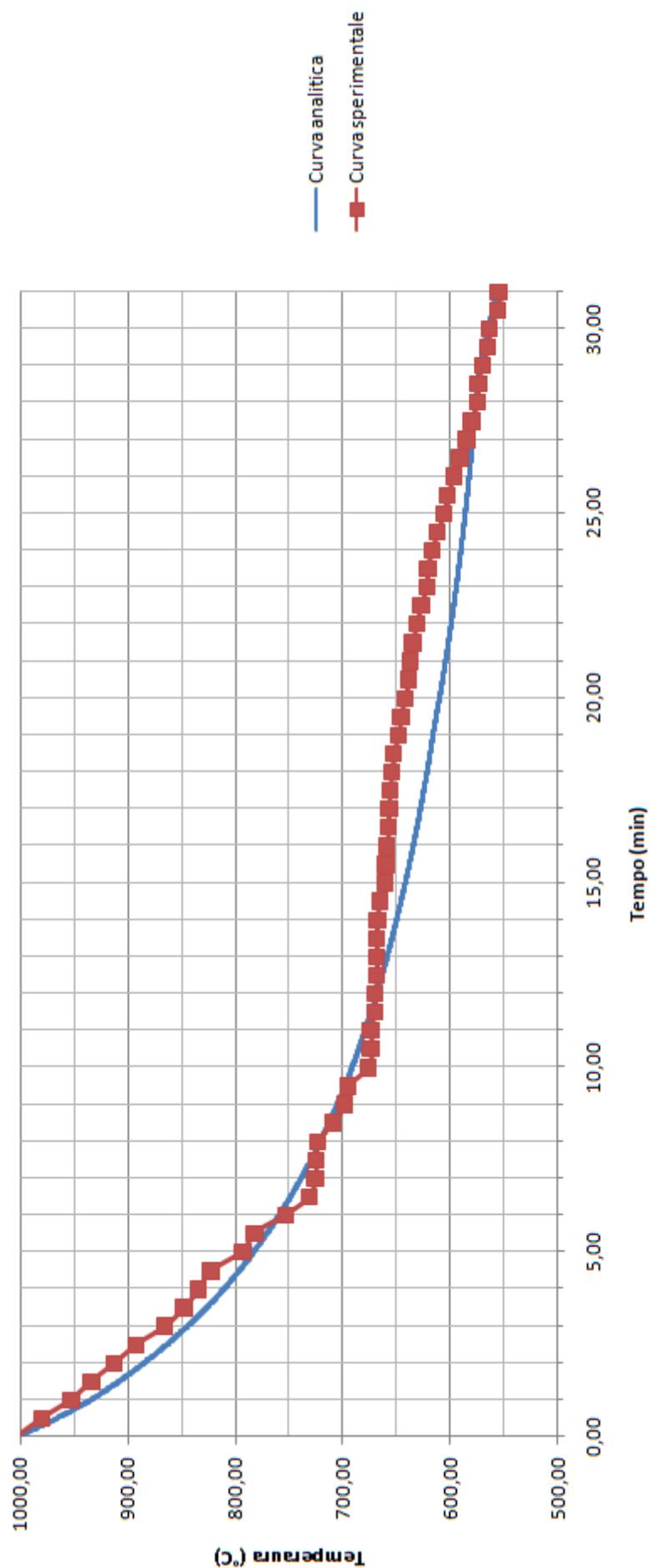


Fig. 79 – Confronto curve di raffreddamento per profilo quadro 90 mm, marca VTK34B-4

Curve di raffreddamento (sperimentale e analitica) relative a VBC48S TO.76

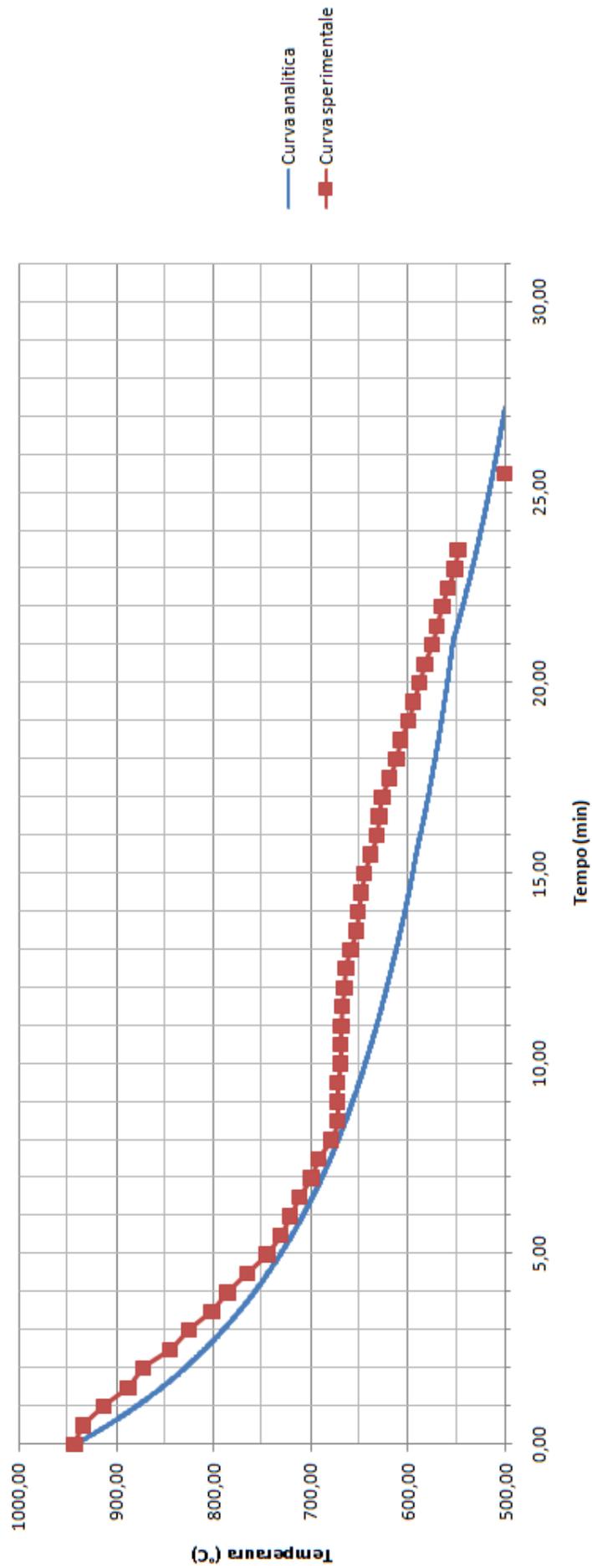


Fig. 80 – Confronto curve di raffreddamento per profilo tondo 76 mm, marca VBC48S

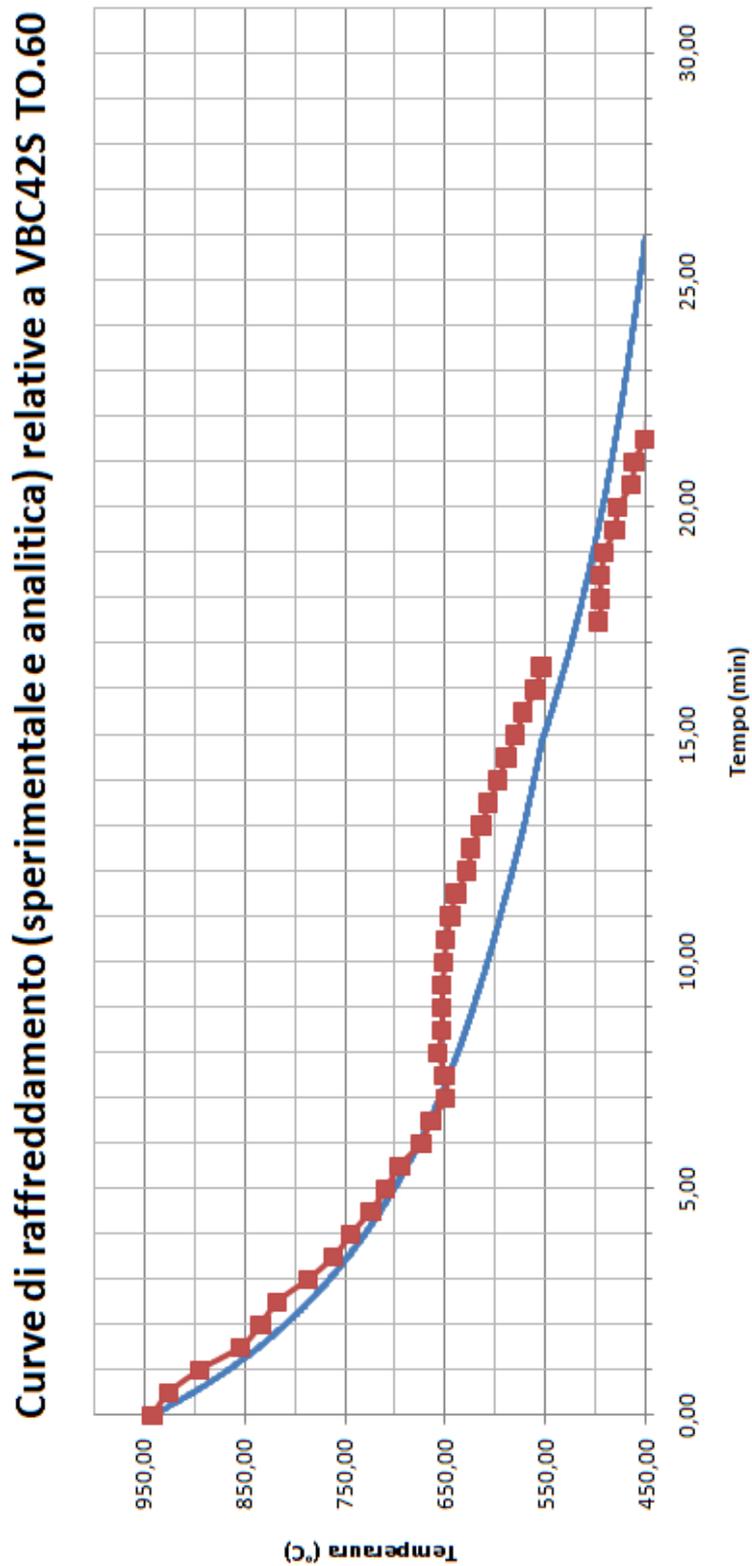


Fig. 81 – Confronto curve di raffreddamento per profilo tondo 60 mm, marca VBC42S

6. STUDIO DEL REVAMPING

6.1 Introduzione

In questo capitolo viene affrontato lo studio del revamping del sistema di raffreddamento barre, tenendo conto delle risorse economiche in termini di budget a disposizione e dell'offerta tecnica dei fornitori. Nel primo paragrafo viene affrontato il calcolo della produttività per ciascuna area / impianto, identificando le aree che fungono da collo di bottiglia per la linea, per poi passare all'analisi delle possibili soluzioni impiantistiche con l'obiettivo di:

- incrementare la resa produttiva dell'impianto
- risolvere le criticità impiantistiche attuali
- risolvere le criticità qualitative attuali

6.2 Produttività

Dall'elaborazione congiunta dei dati di targa dell'impianto e dei dati raccolti sperimentalmente è stato possibile calcolare la produttività di ciascuna macroarea del processo produttivo. La produttività di ciascuna macroarea è stata comparata a quella della zona subito a monte nel processo per ciascun tipo di profilo. Si ricorda che l'ordine delle macroaree è il seguente:

- inforname nto
- forno di riscaldamento
- linea di laminazione
- letti di raffreddamento
- taglio e confezionamento

A seconda del tipo di prodotto le aree del processo possono influenzarsi a vicenda generando un collo di bottiglia in termini di produttività che può risiedere o sui letti di raffreddamento oppure sull'area taglio e confezionamento, come meglio illustrato in seguito.

Le zone inforamento e forno di riscaldamento hanno una produttività indipendente dal profilo da laminare:

- inforamento: produttività > 120 tonnellate / ora
- forno di riscaldamento: produttività di targa = 120 tonnellate / ora

La linea di laminazione, il letto di raffreddamento e l'area taglio e confezionamento hanno una produttività fortemente dipendente dalle dimensioni del profilo laminato. Il principale vincolo produttivo della linea di laminazione è rappresentato dal massimo sforzo sopportabile dalla meccanica dell'impianto e dalla massima potenza erogabile dai motori elettrici delle gabbie. Detto ciò, al limite teorico, la linea di laminazione può laminare senza interruzioni tra una billetta e la successiva. I dati inerenti la produttività treno sono illustrati in tabella:

Profilo	Produttività [t/h]	Profilo	Produttività [t/h]	Profilo	Produttività [t/h]
T125	313,82	T66	299,38	Q100	336,48
T120	301,63	T65	293,2	Q95	319,89
T118	292,74	T63	293,2	Q90	313,82
T115	280,45	T62	293,2	Q85	302,68
T110	313,82	T60	293,2	Q80	284,42
T105	313,82	T58	294,33	Q75	313,82
T100	297,57	T57	294,33	Q70	311,15
T98	292,3	T55	291,85	Q65	306,87
T95	277,33	T54	291,85	Q60	311,15
T93	273,23	T53	291,85	Q55	311,15
T90	313,82	T52	281,6	Q50	284,68
T85	306,78	T50	281,6	Q48	276,38
T83	30,78	T48	281,6	Q47	276,38
T80	297	T47	281,6	Q45	311,15
T78	297	T45	281,6	Q40	284,68
T76	306,78	T44	281,6		
T75	306,78	T42	281,6		
T73	306,78	T41	269,67		
T72	306,78	T40	264,31		
T70	299,38	T38	245,92		
T68	299,38				

Tab. 11 – Produttività treno per i profili laminati nell'anno 2011

La produttività dell'area taglio e confezionamento è stata ricavata con la combinazione di calcoli teorici e rilievi in campo. I calcoli teorici hanno contemplato fondamentalmente:

- i tempi di taglio dei vari abbinamenti tra conformazione e lunghezza del fascio in funzione del profilo

- il numero di legature necessarie per pacco in funzione dell'abbinamento profilo / lunghezza

I rilievi in campo sono serviti principalmente al recupero dei seguenti dati:

- tempi passivi tra le operazioni primarie
- tempi necessari per l'avanzamento dei fasci sulle vie a rulli e sui trasferitori
- tempi di conformazione pacco sugli impilatori
- tempi di legatura pacco

L'area dei letti di raffreddamento è stata coinvolta in rilievi in campo con pirometro portatile, atti a determinare la temperatura finale del laminato in ingresso al letto in funzione del profilo. I rilievi del pirometro portatile sono stati integrati con i rilievi degli strumenti di processo dell'impianto. I risultati hanno dimostrato che la temperatura del laminato in ingresso al letto di raffreddamento è trascurabilmente dipendente dal profilo prodotto e con buona approssimazione può essere ritenuta fissa al valore di 1040°C.

Ognuna delle due placche di raffreddamento può essere immaginata composta da tre sottoaree, ciascuna con la propria produttività:

- area prima della cappa (situata tra la via a rulli e l'inizio della copertura della cappa)
- area sotto la cappa di raffreddamento
- area dopo la cappa di raffreddamento

Attualmente, l'area prima della cappa è coperta da lamierini in acciaio inox che fungono da cappa. In realtà questi lamierini erano stati concepiti per evitare il raffreddamento rapido per i profili più piccoli prima dell'ingresso in cappa, ed erano per questa ragione costruiti con delle cerniere che permettessero all'operatore di poterli includere / escludere a seconda della dimensione del profilo laminato. Risultano necessarie delle corde metalliche in modo da tenere la lamina ad una certa posizione. Questi dettagli sono visibili nella figura 44 a pagina 45. Nella figura successiva è visibile uno di questi lamierini in posizione sollevata.



Fig. 82 – Lamierini in acciaio inox a prolungamento della cappa originale

In breve, questi lamierini, chiamati anche “grembialine”, furono aggiunti dopo che fu attuato in sede di revamping un allontanamento della cappa dalla via a rulli. Ciò comportava che i profili di piccole dimensioni si raffreddavano molto rapidamente prima di entrare in cappa e pertanto la trasformazione di fase non avveniva a velocità controllata. Quindi sono stati concepiti questi lamierini retrattili, che di fatto prolungano la cappa attuale. Dalla parte opposta della cappa ci sono altri lamierini in acciaio inox, i quali però svolgono una funzione diversa: quella di impedire l’ingresso dell’aria ambiente (“fredda”) sotto cappa e di creare un ricircolo di aria calda tale da mantenere l’effetto forno previsto per il raffreddamento controllato. Inoltre ciò permette l’omogeneizzazione della temperatura sulla lunghezza della placca, riducendo al minimo l’effetto sinusoidale. Tutte le considerazioni precedenti sono illustrate in figura.

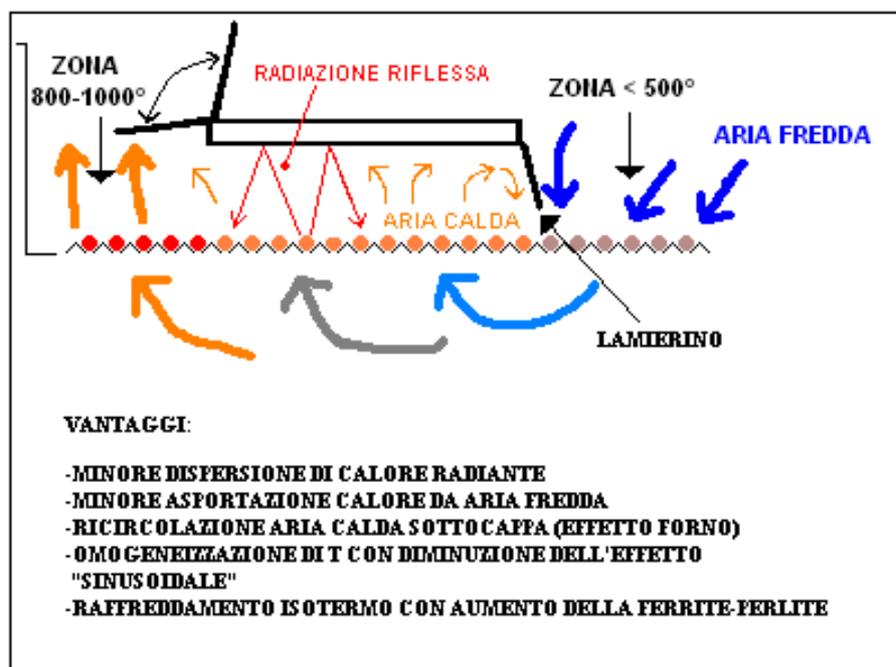


Fig. 83 – Conformazione attuale della cappa di raffreddamento

In realtà, allo stato attuale, alcuni lamierini in acciaio inox sono rotti o addirittura mancanti, per cui, nonostante ci fossero disposizioni di lavoro che regolamentano il loro impiego, adesso quelle rimaste sono sempre abbassate. Questo significa che l'analisi di produttività della configurazione attuale deve essere fatta considerando un'area prima della cappa nulla, immaginando quindi che la cappa inizi in corrispondenza della prima tasca della placca di raffreddamento.

Per ciascun abbinamento marca / profilo preso a riferimento, sono state calcolate le produttività delle tre sottoaree di un letto di raffreddamento considerando i seguenti casi:

- configurazione attuale: area prima della cappa nulla, area sotto cappa larga 2 metri e area dopo cappa pari a 6,2 metri (secondo l'attuale configurazione ed assimilando le grembialine alla cappa)
- configurazione cappa fissa con variazione della larghezza sotto cappa: larghezza da 1 metro a 6 metri a passi di 0,2 metri e con larghezza dopo cappa variabile di conseguenza (se la cappa si allunga di una quantità x, lo spazio dopo cappa diminuisce della stessa quantità)
- configurazione cappa traslante: larghezza area prima della cappa variabile discretizzata a passi interi di tasca, larghezza cappa da 1 metro a 6 metri a passi di 0,2 metri e larghezza dopo cappa variabile di conseguenza

La produttività di ciascuna sottoarea è assoggettata ai seguenti vincoli:

- temperatura laminato = 1040°C
- temperatura minima ingresso cappa = 900°C
- temperatura massima uscita cappa = 500°C
- temperatura massima taglio e confezionamento = 180°C

Per quanto riguarda le temperature minima / massima di ingresso / uscita cappa, tali valori sono stati scelti in modo che la trasformazione di fase avvenga sotto cappa per tutte le marche attualmente in laminazione. Non si esclude che in futuro si possa eseguire un raffreddamento controllato su misura di una determinata marca acciaio, comunicando al sistema d'area il range di temperatura critico e tramite un controllo ad anello chiuso effettuare il raffreddamento ad hoc (v. modifiche impiantistiche proposte).

Per rispettare i vincoli di portata massima del letto di raffreddamento è necessario prevedere un certo numero di tasche vuote tra una barra e l'altra (che può anche essere nullo nel caso di profili piccoli). Tali dati sono già stati riportati nelle tabelle 9 e 10.

L'idea di studiare una configurazione con cappa traslante nasce nell'ottica di massimizzare la produttività del letto e di migliorare i requisiti qualitativi in termini di struttura.

Il calcolo della produttività letto è integrato con il modello termodinamico illustrato nel capitolo precedente. I parametri da inserire sono i seguenti:

- tipo e dimensione di profilo (es. T60, Q40)
- studio transitorio o situazione di regime (questo solo per il raffreddamento in aria libera, in quanto lo studio del transitorio sotto cappa dipende fortemente dalla situazione a monte del letto e dal fatto che la massa termica presente sotto cappa aumenta con il passare del tempo fino a raggiungere un certo valore di regime, e ciò complicherebbe notevolmente il modello analitico, con tempi di calcolo elevatissimi)
- lunghezza del profilo: il foglio fornisce in automatico, per le dimensioni prodotte nell'anno 2011, la lunghezza media pesata, per gli altri profili è necessario un inserimento manuale)
- tempo di campionamento: a parità di numero di record, un tempo di campionamento troppo basso provoca il mancato raggiungimento della temperatura finale impostata (ci vorrebbe infatti un numero di record maggiore), mentre un tempo di campionamento troppo alto dà luogo a passi troppo grandi per cui se si esagera la temperatura al secondo step risulterebbe addirittura un numero negativo. Il foglio di lavoro genera un messaggio di avviso nel caso si dovesse verificare uno di questi due errori.
- temperatura iniziale e finale: per semplicità sono stati creati tre fogli di lavoro, uno per lo studio del raffreddamento prima della cappa, uno per lo studio sotto cappa e uno per lo studio dopo la cappa, pertanto la temperatura iniziale può essere la temperatura di arrivo del filo in placca, la temperatura di ingresso sotto cappa o la temperatura di uscita dalla cappa, stesso ragionamento per la temperatura finale, che può essere la temperatura di ingresso sotto cappa, la temperatura di uscita dalla cappa e la temperatura di arrivo al taglio e confezionamento.
- spazio disponibile: può essere la distanza prima della cappa, la lunghezza della cappa, oppure la distanza rimanente dopo la cappa. Da questo valore, tenendo conto del tipo e della dimensione del profilo, il foglio di lavoro calcola in automatico il numero di tasche vuote tra una barra e l'altra (in virtù dei limiti meccanici di peso), e sottraendolo al numero di tasche disponibili, calcola il numero di tasche effettivamente utilizzato, all'aumentare del quale aumenta la produttività secondo una legge di proporzionalità diretta.

Nelle pagine seguenti sono riportate una serie di tabelle in cui viene calcolata la produttività per le coppie profilo / marca ritenute strategiche, nella configurazione attuale (cappa larga 2000 mm), nella configurazione con cappa fissa e varie larghezza e nella configurazione con cappa traslata e varie lunghezze.

Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T125			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	14,2	7200	37,3
1200	13,5	7000	37,3
1400	13,5	6800	35,6
1600	22,5	6600	35,6
1800	23,4	6400	33,9
2000	26,4	6200	32,2
2200	30,3	6000	32,2
2400	34,1	5800	30,5
2600	34,1	5600	28,8
2800	38	5400	28,8
3000	38	5200	27,1
3200	41,9	5000	27,1
3400	45,7	4800	25,4
3600	45,7	4600	23,7
3800	43,5	4400	23,7
4000	53,3	4200	22,1
4200	53,3	4000	22,1
4400	57,1	3800	20,4
4600	57,1	3600	18,7
4800	63,9	3400	18,7
5000	64,7	3200	17
5200	64,7	3000	15,3
5400	63,4	2800	15,3
5600	63,4	2600	13,6
5800	72,2	2400	13,6
6000	75,9	2200	11,9

Tab. 12 – Produttività Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T125

Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T38			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	38,7	7200	104,3
1200	46,6	7000	101,2
1400	50,5	6800	98
1600	53,3	6600	96,4
1800	66,7	6400	93,3
2000	73,8	6200	90,1
2200	81,4	6000	86,9
2400	89,7	5800	83,8
2600	96,7	5600	80,6
2800	100,5	5400	79
3000	108,1	5200	76,9
3200	115,3	5000	72,7
3400	123,2	4800	68,6
3600	130,7	4600	66,4
3800	138,3	4400	63,2
4000	145,3	4200	60,1
4200	149,3	4000	56,5
4400	157,1	3800	56,3
4600	164,3	3600	52,2
4800	172,1	3400	49
5000	179,3	3200	46,8
5200	187,1	3000	42,7
5400	194,3	2800	39,5
5600	198,3	2600	37,9
5800	205,3	2400	34,8
6000	213,3	2200	31,6

Tab. 13 – Produttività Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T38

Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T54			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	42,5	7200	14,5
1200	53,2	7000	137,2
1400	54	6800	133
1600	61,4	6600	130,4
1800	63,3	6400	126,5
2000	75,7	6200	122,2
2200	82,7	6000	117,9
2400	89,3	5000	113,7
2600	95,4	5600	109,4
2800	99,3	5400	107,2
3000	106,5	5200	102,9
3200	113,2	5000	98,6
3400	119,9	4800	94,4
3600	126,5	4600	90,1
3800	133,1	4400	85,8
4000	139,6	4200	81,5
4200	142,9	4000	79,3
4400	149,4	3800	85,1
4600	155,8	3600	70,8
4800	162,3	3400	66,5
5000	168,7	3200	62,2
5200	175,1	3000	57,9
5400	181,5	2800	53,6
5600	184,7	2600	51,5
5800	191,1	2400	47,2
6000	197,4	2200	42,9

Tab. 14 – Produttività Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T54

Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T75			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	43,3	7200	96,5
1200	43,3	7000	93,6
1400	43,3	6800	90,6
1600	55,3	6600	90,6
1800	62,3	6400	87,7
2000	70,1	6200	84,8
2200	77,1	6000	81,9
2400	84,5	5800	78,9
2600	91,2	5600	76
2800	93,3	5400	73,1
3000	106,1	5200	70,2
3200	113,2	5000	67,2
3400	120,3	4800	64,3
3600	127,4	4600	61,4
3800	134,5	4400	58,5
4000	141,6	4200	55,6
4200	141,6	4000	55,6
4400	148,7	3800	52,6
4600	155,8	3600	49,7
4800	162,8	3400	46,8
5000	169,9	3200	43,9
5200	176,9	3000	40,9
5400	184	2800	38
5600	191	2600	35,1
5800	198	2400	32,2
6000	205	2200	29,2

Tab. 15 – Produttività Acciaio da cementazione 16CrNi5 profilo T75

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T125

Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	14,2	7200	37,3
1200	18,5	7000	37,3
1400	18,5	6800	35,6
1600	22,5	6600	35,6
1800	26,4	6400	34,9
2000	26,4	6200	32,2
2200	30,3	6000	32,2
2400	34,1	5800	30,5
2600	31,1	5600	29,8
2800	38	5400	24,8
3000	38	5200	27,1
3200	41,3	5000	27,1
3400	45,7	4800	25,4
3600	45,7	4600	23,7
3800	49,5	4400	23,7
4000	53,3	4200	22,1
4200	53,3	4000	22,1
4400	57,1	3800	20,4
4600	57,1	3600	19,7
4800	60,9	3400	19,7
5000	64,7	3200	17
5200	64,7	3000	15,3
5400	68,4	2800	15,3
5600	68,4	2600	13,6
5800	72,2	2400	13,6
6000	75,9	2200	11,9

Tab. 16 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T125

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T38

Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	38,7	7200	114,3
1200	48,6	7000	117,2
1400	50,5	6800	98
1600	58,3	6600	96,4
1800	68,1	6400	93,3
2000	73,8	6200	90,1
2200	81,4	6000	86,9
2400	89,1	5800	83,8
2500	90,7	5600	80,6
2600	100,5	5400	79
3000	108,1	5200	75,9
3200	115,0	5000	72,7
3400	123,2	4800	69,6
3600	130,7	4600	66,4
3800	138,3	4400	63,2
4000	146,8	4200	60,1
4200	149,6	4000	58,5
4400	157,1	3800	55,3
4500	164,6	3600	52,2
4600	172,1	3400	49
5000	179,6	3200	45,8
5200	187,1	3000	42,7
5400	194,6	2800	39,5
5500	198,3	2600	37,9
5700	205,0	2400	34,0
6000	213,3	2200	31,6

Tab. 17 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T38

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q50

Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	37,2	7200	128,4
1200	43,3	7000	124,6
1400	46,3	3800	120,7
1600	52,5	3600	118,7
1800	57,3	3400	114,8
2000	63,1	3200	110,9
2200	68,1	3000	107
2400	73	5800	103,1
2600	77,7	5600	99,3
2800	80	5400	97,3
3000	84,3	5200	93,4
3200	89	5000	89,5
3400	93,4	4800	85,6
3600	97,3	4600	81,7
3800	101,8	4400	77,8
4000	105,9	4200	74
4200	107,9	4000	72
4400	111,9	3800	68,1
4600	115,8	3600	64,2
4800	119,6	3400	60,3
5000	123,4	3200	56,4
5200	127,1	3000	52,5
5400	130,0	2800	48,7
5600	132,6	2600	46,7
5800	136,1	2400	42,8
6000	139,7	2200	38,9

Tab. 18 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q50

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q100

Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	16,7	7200	37,5
1200	21,7	7000	37,5
1400	21,7	3800	35,8
1600	26,5	3600	35,8
1800	31,2	3400	34,1
2000	31,2	3200	32,4
2200	35,3	3000	32,4
2400	40,3	5800	30,7
2600	40,3	5600	29
2800	45,3	5400	29
3000	45,3	5200	27,3
3200	49,3	5000	27,3
3400	54,3	4000	25,6
3600	51,3	4600	23,9
3800	63,3	4400	23,9
4000	63,3	4200	22,2
4200		4000	
4400		3800	
4600		3600	
4800		3400	
5000		3200	
5200		3000	
5400		2800	
5600		2600	
5800		2400	
6000		2200	

Tab. 19 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q100

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T125 - Cappa traslata					
Larghezza Prima cappa [mm]	Produttività Prima cappa [t/h]	Larghezza Sotto cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
324	52,3	1000	15,7	6876	35,6
324	52,3	1200	20,3	6676	35,6
324	52,3	1400	20,3	6476	33,9
324	52,3	1600	24,6	6276	33,9
324	52,3	1800	28,9	6076	32,2
324	52,3	2000	28,9	5876	30,5
324	52,3	2200	33,1	5676	30,5
324	52,3	2400	37,3	5476	28,8
324	52,3	2600	37,3	5276	27,1
324	52,3	2800	41,5	5076	27,1
324	52,3	3000	41,5	4876	25,4
324	52,3	3200	45,7	4676	25,4
324	52,3	3400	49,8	4476	23,7
324	52,3	3600	49,8	4276	22,1
648	104,5	3800	54	3752	20,4
648	104,5	4000	58,1	3552	18,7
648	104,5	4200	58,1	3352	18,7
648	104,5	4400	62,2	3152	17
648	104,5	4600	62,2	2952	15,3
648	104,5	4800	66,3	2752	15,3
648	104,5	5000	70,4	2552	13,6
648	104,5	5200	70,4	2352	11,9
648	104,5	5400	74,4	2152	11,9
648	104,5	5600	74,4	1952	10,2
648	104,5	5800	78,5	1752	10,2
648	104,5	6000	82,6	1552	8,5

Tab. 20 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T125 – cappa traslata

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T38 - Cappa traslata					
Larghezza Prima cappa [mm]	Produttività Prima cappa [t/h]	Larghezza Sotto cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
108	46,9	1000	42,3	7192	102,7
216	93,7	1200	51,4	6784	96
216	93,7	1400	55,7	6584	94,8
216	93,7	1600	64,2	6384	93,3
216	93,7	1800	72,7	6184	90,1
216	93,7	2000	81,1	5984	86,9
216	93,7	2200	89,5	5784	83,8
324	140,3	2400	97,3	5476	79
324	140,3	2600	106,2	5276	75,9
324	140,3	2800	110,4	5176	74,3
324	140,3	3000	118,7	4976	71,1
324	140,3	3200	126,9	4776	68
324	140,3	3400	135,2	4476	64,8
432	187,5	3600	143,5	4168	60,1
432	187,5	3800	151,7	3968	56,9
432	187,5	4000	159,9	3768	53,7
432	187,5	4200	164	3568	52,2
432	187,5	4400	172,2	3368	49
432	187,5	4600	180,4	3168	45,8
540	234,4	4800	188,6	2968	41,1
540	234,4	5000	196,8	2768	37,9
540	234,4	5200	205	2468	34,8
540	234,4	5400	213,2	2268	31,6
540	234,4	5600	217,3	2068	30
540	234,4	5800	225,5	1868	26,9
540	234,4	6000	233,6	1668	23,7

Tab. 21 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T38 – cappa traslata

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q50 - Cappa traslata

Larghezza Prima cappa [mm]	Produttività Prima cappa [t/h]	Larghezza Sotto cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
108	64,5	1000	40,5	7392	126,4
108	64,5	1200	47	6392	122,5
108	64,5	1400	50,1	6392	118,6
108	64,5	1600	56	6492	116,6
108	64,5	1800	61,7	6292	112,7
216	129	2000	67,1	5384	106,9
216	129	2200	72,3	5784	103
216	129	2400	77,4	5584	99,1
216	129	2600	82,3	5384	95,3
216	129	2800	84,7	5184	93,3
216	129	3000	89,4	4384	89,4
216	129	3200	94	4784	85,5
216	129	3400	98,5	4584	81,6
216	129	3600	102,9	4384	77,8
216	129	3800	107,2	4184	73,9
216	129	4000	111,4	3984	70
216	129	4200	113,4	3784	68
216	129	4400	117,5	3584	64,2
216	129	4600	121,6	3384	60,3
216	129	4800	125,5	3184	56,4
324	193,5	5000	129,4	2376	50,5
324	193,5	5200	133,2	2376	46,7
324	193,5	5400	137	2476	42,0
324	193,5	5600	130,0	2276	40,0
324	193,5	5800	142,5	2376	36,9
324	193,5	6000	146,1	1376	33

Tab. 22 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q50 – cappa traslata

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q100 - Cappa traslata

Larghezza Prima cappa [mm]	Produttività Prima cappa [t/h]	Larghezza Sotto cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
324	63,6	1000	18,3	6376	35,8
324	63,6	1200	23,3	6376	36,8
324	63,6	1400	23,3	6476	34,1
324	63,6	1600	29	6276	34,1
324	63,6	1800	34,1	6076	32,4
324	63,6	2000	34,1	5376	30,7
324	63,6	2200	39,1	5376	30,7
324	63,6	2400	44,2	5476	29
324	63,6	2600	44,2	5276	27,3
324	63,6	2800	49,3	5376	27,3
324	63,6	3000	49,3	4376	25,6
324	63,6	3200	54,3	4376	
324	63,6	3400	59,3	4476	
324	63,6	3600	59,3	4276	
E40	127,3	3000	64,3	3752	
E40	127,3	4000	69,3	3552	
E48	127,3	4200	69,3	3352	
E48	127,3	4400	74,2	3152	
E48	127,3	4600	74,2	2952	
E48	127,3	4800	79,2	2752	
E48	127,3	5000	84,1	2552	
E48	127,3	5200	84,1	2352	
E48	127,3	5400	89,1	2152	
E48	127,3	5600	89,1	1952	
E48	127,3	5800	94	1752	
E48	127,3	6000	98,3	1552	

Tab. 23 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q100 – cappa traslata

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T125 con Water box			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
100L	15,7	7200	37,3
120C	20,3	7000	37,3
140C	20,3	6300	35,3
160C	24,6	6300	35,3
180C	28,9	6400	33,3
200L	28,9	6200	32,2
2200	33,7	6000	32,2
240C	37,3	5300	30,5
260C	37,3	5300	28,3
280C	41,5	5400	28,3
300L	41,5	5200	27,1
320C	45,7	5000	27,1
340C	49,8	4300	25,4
360C	49,8	4300	23,7
380C	54	4400	23,7
400L		4200	22,1
420C		4000	22,1
440C		3300	20,4
460C		3300	18,7
480C		3400	18,7
500L		3200	17
520C		3000	15,3
540C		2300	15,3
560C		2300	13,3
580C		2400	13,3
600L		2200	11,3

Tab. 24 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T125 – water box

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T38 con Water box			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
100C	42,8	7200	104,3
120C	51,4	7000	101,2
140C	55,7	6300	96
160C	64,2	6300	96,4
180L	72,7	6400	93,3
200C	81,1	6200	90,1
2200	89,5	6000	86,9
240C	97,9	5300	83,3
260C	106,2	5300	80,3
280L	110,4	5400	75
300C	118,7	5200	75,3
320C	126,3	5000	72,7
340C	135,2	4300	69,3
360C	143,5	4300	66,4
380L		4400	63,2
400C		4200	60,1
420C		4000	58,5
440C		3300	55,3
460C		3300	52,7
480L		3400	49
500C		3200	46,3
520C		3000	42,7
540C		2300	39,5
560C		2300	37,3
580L		2400	34,3
600C		2200	31,3

Tab. 25 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo T38 – water box

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q50 con Water box			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	40,6	7200	123,4
1200	47	7000	124,6
1400	50,1	6800	127,7
1500	53	6600	113,7
1600	51,7	6400	114,8
2000	57,1	6200	110,9
2200	72,3	6000	107
2400	77,4	5800	103,1
2500	62,3	5600	99,3
2600	64,7	5400	97,3
3000	89,4	5200	93,4
3200	94	5000	89,5
3400	99,5	4800	85,5
3500	102,9	4600	81,7
3600		4400	77,3
4000		4200	74
4200		4000	72
4400		3800	68,1
4500		3600	64,2
4600		3400	60,3
5000		3200	56,4
5200		3000	52,5
5400		2800	48,7
5500		2600	46,7
5600		2400	42,3
6000		2200	38,3

Tab. 26 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q50 – water box

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q100 con Water box			
Larghezza cappa [mm]	Produttività Sotto cappa [t/h]	Larghezza Dopo cappa [mm]	Produttività Dopo cappa [t/h]
1000	25,5	7200	37,5
1200	29,3	7000	37,5
1400	29,3	6800	35,0
1500	32,9	6600	35,8
1800	36,5	6400	34,1
2000	40	6200	32,4
2200	43,5	6000	32,4
2400	46,9	5800	30,7
2500	50,3	5600	29
2600	53,6	5400	29
3000	56,8	5200	27,3
3200	50	5000	27,3
3400	63,2	4800	25,6
3500	66,4	4600	23,9
3600		4400	23,9
4000		4200	22,2
4200		4000	
4400		3800	
4500		3600	
4600		3400	
5000		3200	
5200		3000	
5400		2800	
5500		2600	
5600		2400	
6000		2200	

Tab. 27 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 profilo Q100 – water box

In sintesi i risultati dei calcoli eseguiti ed esposti in forma tabellare esprimono che:

- le larghezze ottimali della cappa sono sostanzialmente due (2200 e 3000 mm)
- l'implementazione di cappe traslanti non è utile per aumentare la produttività, anzi la diminuisce

Tali risultati portano direttamente alle seguenti considerazioni.

Larghezza cappa

Teoricamente, la produttività sotto cappa è direttamente proporzionale alla larghezza della cappa (in quanto aumenta il numero di tasche occupate e quindi il numero di barre raffreddate contemporaneamente). In pratica però, maggiore è la larghezza della cappa maggiore è la massa termica in placca e quindi maggiore è l'effetto forno, pertanto questo fattore tenderebbe ad aumentare il tempo di raffreddamento riducendo la produttività. Dando uno sguardo all'incremento di produttività all'aumentare della larghezza si nota che man mano che la cappa diventa più larga, a parità di incremento di larghezza si registra un incremento di produttività sempre più basso; proiettando questo trend verso larghezze ancora maggiori si potrebbe concludere che esiste una larghezza critica superata la quale la produttività comincia a diminuire anziché aumentare. Comunque questo si verifica per valori molto elevati, valori in realtà fisicamente irrealizzabili in quanto non si avrebbe un sufficiente spazio libero dopo cappa per permettere di scendere al di sotto dei 200°C, limite di temperatura in ingresso alle segatrici. Tuttavia, il valore ottimale si trova effettuando un bilancio tra area a monte ed area a valle: occorre fare in modo che la produttività a valle sia uguale a quella a monte, naturalmente è molto difficile trovare due valori esattamente uguali, nella pratica si troveranno valori vicini, quindi la soluzione da prendere in considerazione come ottimale è quella con la minima differenza tra produttività a monte e a valle (si consideri che teoricamente sarebbe meglio avere una produttività a valle leggermente superiore, tuttavia differenze in negativo si possono accettare in quanto rientrano comunque nell'incertezza del modello analitico di calcolo).

La maggiore produttività per profilo può ricondursi a casi con cappa larga da 2000 a 3000 mm. Tale risultato suggerisce l'impiego di cappe di raffreddamento a larghezza variabile in base al profilo del laminato prodotto. Sono ottenuti incrementi di produttività teorici rispetto alla configurazione attuale riassunti nelle tabelle seguenti.

Acciaio da cementazione 16CrNi5 - Cappa fissa				
Profilo	Dimensione [mm]	Lunghezza cappa [mm]	Produttività cappa [t/h]	Incremento produttività [t/h]
T	38	Attuale 2000	73,8	10
		Ottimale 2400	83,8	
T	54	Attuale 2000	75,7	27,2
		Ottimale 3000	102,9	
T	75	Attuale 2000	71,1	7,3
		Ottimale 2200	77,4	
T	125	Attuale 2000	25,4	3,9
		Ottimale 2200	30,3	

Tab. 28 – Produttività Acciaio da cementazione 16CrNi5 Cappa Fissa

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 - Cappa fissa				
Profilo	Dimensione [mm]	Lunghezza cappa [mm]	Produttività cappa [t/h]	Incremento produttività [t/h]
Q	50	Attuale 2000	63,1	25,9
		Ottimale 3000	89	
Q	100	Attuale 2000	31,2	0
		Ottimale 2000	31,2	
T	38	Attuale 2000	81,4	2,4
		Ottimale 2400	83,8	
T	125	Attuale 2000	26,4	3,9
		Ottimale 2200	30,3	

Tab. 29 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 Cappa Fissa

Cappa traslante

L'obiettivo di massimizzare la produttività del letto e di rispettare i vincoli qualitativi sembra suggerire l'impiego di cappe traslanti in modo da creare uno spazio scoperto prima dell'ingresso sotto copertura direttamente proporzionale alla produttività condizionata dalla velocità di raffreddamento del prodotto dalla temperatura di laminazione a 900°C.

Assunta costante e non modificabile la larghezza complessiva del letto, tale ipotesi è smontata dal risultato dei calcoli. L'aumentare della larghezza scoperta prima della cappa fa diminuire forzatamente la larghezza della cappa e/o dell'area dopo cappa. La produttività complessiva del letto è vincolata alla minore produttività fra quelle delle tre sotto aree che la compongono. I risultati dei calcoli mostrano che la minore produttività non è mai quella dell'area prima della cappa. Ciò significa che nella zona prima della cappa il laminato permarrà per un tempo maggiore rispetto a quello necessario per raggiungere la temperatura di 900°C dalla temperatura di laminazione. Questo significa che il laminato prima di entrare in cappa avrà sicuramente una temperatura inferiore a 900°C e ciò non è ammissibile per ragioni qualitative (per alcuni acciai si scende sotto A_{c3}). Per risolvere tale inconveniente è stato pensato di valutare l'aumento di produttività dell'area dopo cappa aumentando la velocità di raffreddamento con il soffiaggio di aria fredda.

Tale soluzione, seppur risolutiva nei confronti dei problemi di produttività, non è applicabile per ragioni qualitative: un raffreddamento più veloce da 500°C a 180°C potrebbe portare alla formazione di strutture fragili qualora il gradiente di raffreddamento non fosse stato sufficientemente lento.

L'unica soluzione percorribile risulta quindi quella di mantenere la cappa in configurazione non traslata e di diminuire la temperatura del laminato, magari impiegando sistemi di sottrazione del calore di tipo *water box*. Portando la temperatura finale di laminazione a da 1040 a 900°C si otterrebbe un incremento della produttività con risultato globale per profilo indicato nella seguente tabella.

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 - Cappa fissa con Water Box				
Profilo	Dimensione [mm]	Lunghezza cappa [mm]	Produttività cappa [t/h]	Incremento produttività [t/h]
Q	50	Attuale 2000	63,1	26,3
		Ottimale 3000	89,4	
Q	100	Attuale 2000	31,2	2,9
		Ottimale 1800	34,1	
T	38	Attuale 2000	81,4	5,5
		Ottimale 2200	86,9	
T	125	Attuale 2000	26,4	5,8
		Ottimale 2200	32,2	

Tab. 30 – Produttività Acciaio da bonifica 42CrMoS4 Cappa Fissa con Water Box

Si noti che per i letti di raffreddamento la produttività con cappa traslante è sempre inferiore al caso con cappa fissa.

Acciaio da cementazione 16CrNi5 - Produttività impianto [t/h]								
Profilo	Dim	Forno	Treno	Letto di raffreddamento Cappa fissa			Taglio e confezionamento	
				Lunghezza cappa	1 Letto di raff.	2 Letti di raff.	1 Linea	2 Linea
T	38	120	245,92	2400mm	83,8	167,6	47,5	95
T	125	120	313,82	2200mm	30,3	60,6	76	152
Q	50	120	284,68	3200mm	89	178	57,8	115,6
Q	100	120	336,48	2400mm	43,8	87,6	99,4	198,8

Tab. 31 – Produttività Impianto con Acciaio da cementazione 16CrNi5

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 - Produttività impianto [t/h]												
Profilo	Dim	Forno	Treno	Letto di raffreddamento Cappa fissa			Letto di raffreddamento Cappa traslante			Taglio e confezionamento		
				Lunghezza cappa	1 Letto di raff.	2 Letti di raff.	Traslazione	Lunghezza cappa	1 Letto di raff.	2 Letti di raff.	1 Linea	2 Linea
T	38	120	245,92	2400mm	83,8	167,6	324mm	2200mm	83,8	167,6	42,5	85
T	125	120	313,82	2200mm	30,3	60,6	324mm	2000mm	28,9	57,8	63,9	127,8
Q	50	120	284,68	3200mm	89	178	216mm	3000mm	89,4	178,8	56,6	113,2
Q	100	120	336,48	2000mm	31,2	62,4	324mm	1800mm	32,4	64,8	84,2	168,4

Tab. 32 – Produttività Impianto con Acciaio da bonifica 42CrMoS4

Acciaio da bonifica 42CrMoS4 con Water box-Produttività impianto								
Profilo	Dim	Forno	Treno	Letto di raffreddamento Cappa fissa			Taglio e confezionamento	
				Lunghezza cappa	1 Letto di raff.	2 Letti di raff.	1 Linea	2 Linea
T	38	120	245,92	2200mm	86,9	173,8	42,5	85
T	125	120	313,82	2200mm	32,2	64,4	63,9	127,8
Q	50	120	284,68	3000mm	89,4	178,8	56,6	113,2
Q	100	120	336,48	1800mm	34,1	68,2	84,2	168,4

Tab. 33 – Produttività Impianto con Acciaio da bonifica 42CrMoS4 con Water Box

Casi studio riportati in letteratura dimostrano la possibilità di impiego di water box in impianti con caratteristiche simili a quelle del TMP. L'abbandono dell'idea dell'utilizzo di cappe traslanti si traduce fra l'altro in una notevole semplificazione impiantistica nella modifica delle coperture.

6.3 Modifiche impiantistiche proposte

Dal punto di vista qualitativo, produttivo e informatico per concretizzare gli obiettivi sopra definiti si propone di implementare le seguenti modifiche/innovazioni:

1. Scindere la gestione dei due letti di raffreddamento ed implementare un sistema automatizzato di gestione delle coperture.

Il rispetto tassativo delle pratiche operative con particolare riguardo a tempi di permanenza sotto copertura, rispondenza delle altezze delle coperture alla pratica operativa in funzione del profilo è di fondamentale importanza per ottenere curve di raffreddamento mirate all'ottenimento di strutture ferritico perlitiche; in questo caso l'implementazione di un sistema automatizzato di gestione delle altezze delle coperture direttamente dalla postazione di controllo dei letti di raffreddamento (ponte a cavallo) e l'installazione di un sistema avanzato per il controllo delle temperature, migliorerebbe l'efficienza di gestione delle coperture con ottimizzazione della pratica di raffreddamento minimizzando eventuali errori umani; inoltre, separare la gestione dei due letti permetterebbe di dirottare i fili laminati in diametri diversi sul secondo letto impostato con l'opportuna altezza delle coperture, qualora la prima fosse ancora occupata dal profilo laminato precedentemente evitando l'adozione di pratiche "di compromesso".

2. Variare la larghezza della cappa di raffreddamento in funzione del profilo

Variare la larghezza della cappa di raffreddamento, ovvero del numero di tasche dei rastrelli protetti da copertura, aumenta la produttività del letto di raffreddamento nei termini indicati nel capitolo "Produttività". Inoltre allungare l'attuale cappa diminuirebbe l'effetto dato dall'ingresso di aria fredda (si suppone infatti che la prima trasformazione avvenga non in prossimità dell'estremità della copertura ma un certo numero di tasche dopo e tanto più lungo è il tratto che l'aria fredda deve compiere in ingresso dalle estremità tanto più avrà modo di riscaldarsi nel suo percorso); inoltre la sostituzione delle alette con coperture comporterebbe una maggiore efficienza nella riflessione del calore. Allungare le coperture permetterebbe, poi, di mantenere il materiale sotto copertura a $T < 500^{\circ}\text{C}$ ottenendo un effetto "detensionante" senza impattare eccessivamente sulla produttività treno rispetto all'attuale assetto.

3. Utilizzo di Water Box

La possibilità di arrivare in placca con una temperatura di circa 900°C (inferiore all'attuale stimata a circa 1040°C) attraverso l'impiego di water box posti a fine laminazione, permette di congelare la grana cristallina in dimensioni sufficientemente fini da comportare una minore tendenza a formare inneschi di rottura, minore sensibilità a formare cricche di rettifica e maggiore tenacità del materiale.

4. Installare un sistema avanzato di rilevazione temperature

I pirometri attuali, come già detto in precedenza, sono fissi e rilevano la temperatura solo su un punto della barra quando è in ingresso e in uscita dalle cappe. L'idea è quella di sostituirli con un sistema di rilevazione della temperatura più accurato dato da uno scanner. Questo strumento offre una scansione lineare ortogonale a tutte le barre presenti sotto la cappa:

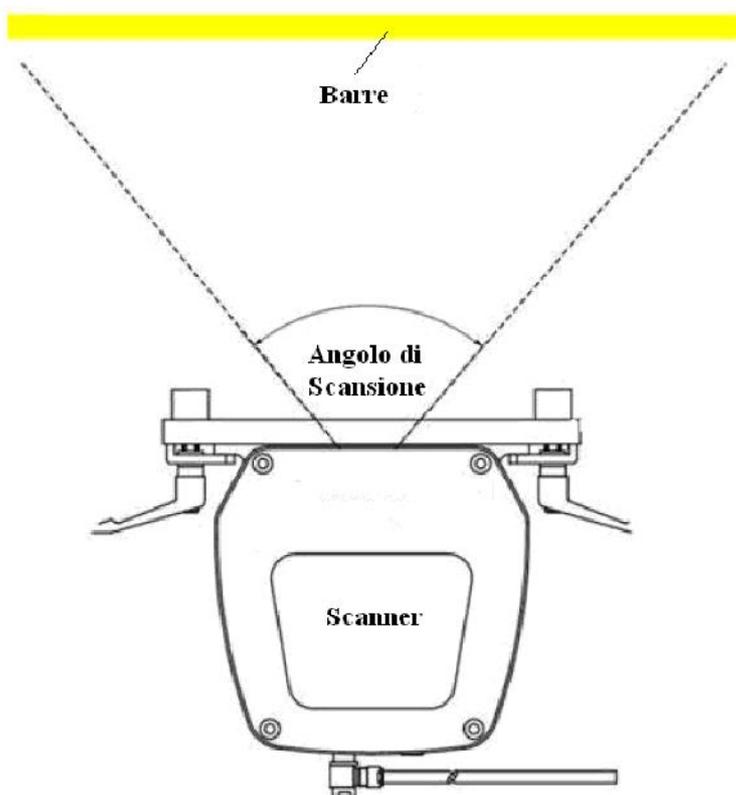


Fig. 84 – Scanner da posizionare sotto cappa

Rispetto ai pirometri, questo scanner permette di rilevare la temperatura delle barre nell'arco di un tempo uguale alla loro permanenza sotto le cappe. I dati della temperatura saranno poi trasferiti all'automazione e da qui prelevati dal tracking ai quali associerà il lotto di produzione e li archiverà.

5. Realizzare un sistema per il posizionamento automatico dell'altezza delle cappe

L'altezza delle cappe deve essere impostata in funzione della coppia qualità – profilo laminata in quel momento. Il tracking dovrà trasmettere le informazioni relative al lotto di produzione in laminazione in quell'istante al sistema di controllo del raffreddamento. Il sistema di controllo avrà poi mappata al suo interno una tabella in cui è indicata l'altezza delle cappe da impostare in automatico in funzione della qualità e del profilo. Infine, l'operatore del pulpito ponte a cavallo, sulla base della propria esperienza, avrà modo di verificare le impostazioni, dare conferma o se necessario modificarle.

6. Ampliare le capacità del sistema di tracking esistente

Il tracking, oltre a comandare il posizionamento delle cappe, dovrà archiviare sul database tutti i dati forniti dal sistema di controllo del raffreddamento:

- preset di linea
- altezza cappe
- temperatura barre
- permanenza barre sotto cappa
- sistema automatico o manuale
- cadenza di deposizione fili sul letto

Il tracking, inoltre, dovrà essere in grado di associare questi dati al lotto di produzione e di renderli disponibili per tutto l'impianto.

6.4 *Analisi benefici attesi dal revamping*

In linea generale l'ipotesi di *revamping* delle coperture con la possibilità di gestire in maniera indipendente i due letti di raffreddamento ed aumentare la larghezza delle coperture (aumento del numero di tasche sotto copertura), determina benefici qualitativi, di produttività e di controllo di processo.

Dal punto di vista della qualità, si ritiene infatti di poter evitare l'adozione di pratiche di raffreddamento "di compromesso" per ovviare a vincoli dettati dal montaggio/produttività attraverso la maggiore versatilità delle due cappe svincolate nella gestione l'una dall'altra. Il *revamping* comporterebbe anche un miglioramento della rettilineità dei fili dovuta ad un ridotto stazionamento sulla medesima tasca per effetto di un passo più costante. Ogni intervento che permetta di transitare sotto copertura con passi più regolari ed una più stretta ottemperanza delle pratiche operative in vigore, impatta in maniera positiva anche sugli aspetti qualitativi.

Inoltre l'archiviazione di dati di *tracking* permetterebbe la comprensione e la ricostruzione del profilo termico di ogni singolo filo qualora sia necessaria una indagine di tipo qualitativo.

L'ottenimento direttamente sul letto (con l'ottimizzazione delle curve di raffreddamento imposte) di durezza e strutture conformi ai requisiti richiesti permetterebbe di saltare cicli di ricottura post-laminazione con risparmi sostanziali in termini economici e nelle tempistiche di svincolo materiale.

Occorre, però, puntualizzare che una quantificazione attendibile dei benefici in termini qualitativi risulta di difficile valutazione; sul piano teorico si può eventualmente descrivere uno scenario plausibile di miglioramento come ad esempio supporre che il *revamping* permetta di ottenere un beneficio in termini di durezza pari ad un decremento del 10%. Ovviamente per riduzioni in termini di durezza <10% i benefici qualitativi di seguito descritti sfumano. Nel caso riportato per l'acciaio da cementazione 16CrNi5, la nostra popolazione di dati si posiziona statisticamente nel range indicato in celeste (Figura 45). Il caso illustrato riporta 30% di ferrite e 70% di bainite con una durezza di circa 240HB. Se si recuperasse un 10% in termini di durezza si otterrebbe una struttura con un 30% in meno di bainite con un rischio di rottura in fase di cesoiatura nettamente ridotto (tale aspetto dipende anche dalla potenza delle cesoie dei nostri clienti, tipicamente cesoie più potenti aumentano il rischio di rottura su strutture bainitiche).

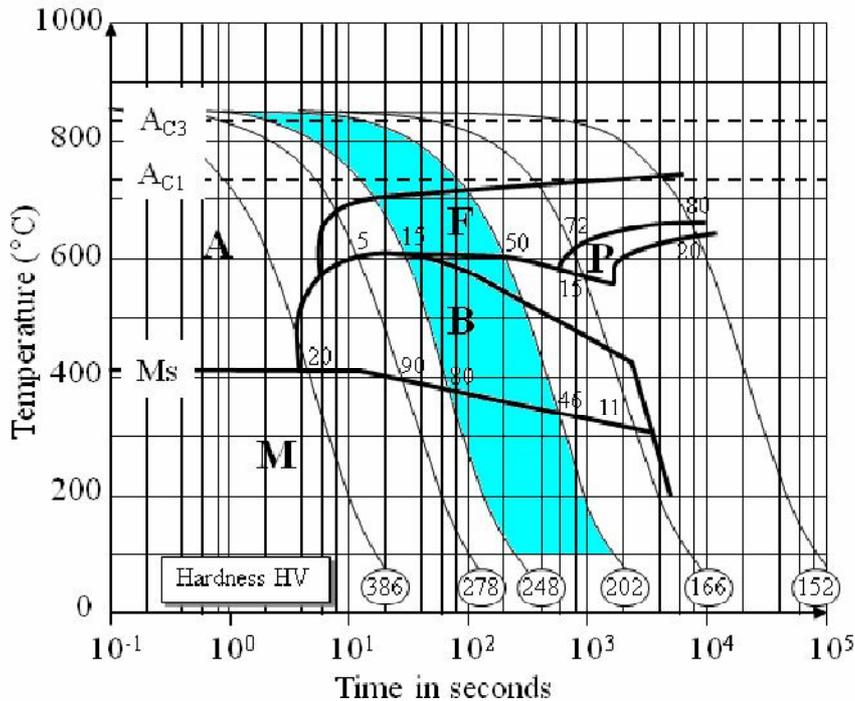


Fig. 85 – Curva CCT relativa ad un acciaio da cementazione 16CrNi5

Nel caso riportato per l'acciaio da bonifica 42CrMoS4, la nostra popolazione dati si posiziona statisticamente nel range indicato in celeste (v. figura 86). Se si recuperasse un 10% in termini di durezza, per il materiale che ha subito un raffreddamento secondo la curva prossima alla 335 (75% di bainite e durezza 330 HB) non si registrerebbero benefici, mentre per il materiale che ha subito un raffreddamento secondo la curva prossima alla 280 (75% di bainite e durezza 280 HB) saremmo al limite tra l'ottenimento delle sole strutture ferritico – perlitiche e quello delle strutture ferritico – perlitiche – bainitiche. Se si ottenessero, direttamente in placca di raffreddamento, solo strutture ferritico – perlitiche, non sarebbe necessario alcun successivo ciclo di ricottura.

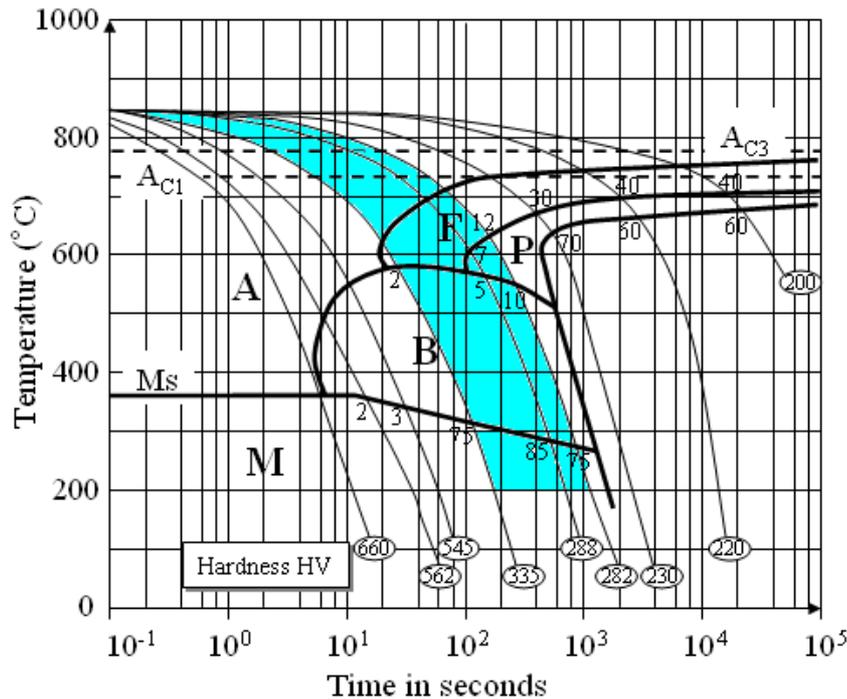


Fig. 86 – Curva CCT relativa ad un acciaio da bonifica 42CrMoS4

L'aumento di produttività legato al revamping è stato già illustrato in precedenza. D'altra parte, l'acquisizione di dati più accurati e specifici grazie alle modifiche impiantistiche, è di fondamentale importanza e porta enormi benefici sul sistema di controllo del raffreddamento. Di seguito sono riassunti i vantaggi derivanti dal revamping.

Installazione del sistema avanzato di rilevazione temperature:

- rilevazione temperatura più accurata rispetto ai pirometri
- disponibilità per ogni barra di un trend, che anche se è disponibile per un singolo punto, se incrociato con gli altri dati come l'altezza e il tempo di permanenza sotto cappa, permette un maggiore controllo del processo di raffreddamento unitamente ad una maggiore capacità di prevedere i risultati qualitativi raggiungibili in funzione di una determinata combinazione di parametri operativi

Realizzazione di un sistema per il posizionamento automatico delle cappe:

- eliminazione o comunque sensibile riduzione del possibile errore umano dell'operatore nel posizionare l'altezza delle cappe in funzione delle pratiche operative.
- feedback sull'effettiva altezza delle cappe impostata che indica se la pratica operativa di raffreddamento è stata rispettata oppure no. In quest'ultimo caso, sapendo che la modifica

dell'altezza delle cappe è stata effettuata manualmente dall'operatore oppure in automatico, è possibile risalire alla causa del mancato rispetto della POS.

Ampliamento della capacità del sistema di tracking attuale:

il revamping permetterà di acquisire informazioni fondamentali per controllare il processo di raffreddamento delle barre sui letti. Tutti i dati come la temperatura e l'altezza delle cappe, insieme a tutte le altre informazioni di processo acquisite fin dall'inforamento della billetta (associati ad ogni lotto di produzione), permetteranno di fornire un maggiore controllo sul processo di laminazione. I dati di feedback resi disponibili dal sistema di controllo di raffreddamento sono fondamentali soprattutto a livello qualitativo in quanto permettono di comprendere se la barra si è raffreddata nel rispetto della POS.

7. CONCLUSIONI

7.1 *Aspetti generali*

Questo Project Work rappresenta uno studio preliminare al quale dovranno seguire uno studio con rilevamenti termografici, un'analisi simulata agli elementi finiti, un'analisi dettagliata dei costi e un ritorno degli investimenti.

Detto ciò dall'elaborato emerge che le modifiche impiantistiche che rendono possibile un miglioramento in termini produttivi e qualitativi sono fondamentalmente la scissione della gestione delle cappe, la regolazione della larghezza delle cappe e l'implementazione di un sistema avanzato di tracking che permetta il posizionamento automatico delle cappe e un controllo di processo più accurato.

Gli incrementi teorici in termini di produttività risultano potenzialmente (in funzione del profilo prodotto) fino a:

- + 27,2 t/h per gli acciai da cementazione
- + 25,9 t/h per gli acciai da bonifica
- + 26,3 t/h per gli acciai da bonifica impiegando water box

Con i dati a disposizione l'implementazione di Water box dal punto di vista produttivo non comporta benefici tali da giustificare l'investimento. Si fa altresì notare che l'implementazione di tale sistema potrebbe portare sostanziali benefici qualitativi in termini di struttura.

In linea generale il revamping delle coperture permetterà senza dubbio di ottimizzare le condizioni di raffreddamento con impatto diretto sulla qualità del prodotto in uscita dalle coperture. Risulta di difficile quantificazione il reale effetto della nuova copertura sulla qualità del materiale. I benefici qualitativi ipotizzati andranno infatti confermati da evidenze sperimentali ottenute dall'impianto "revampato". Sarà quindi necessario effettuare laminazioni di prova al fine di monitorare e verificare i benefici ipotizzati, oppure avvalersi di modelli di simulazione termica validati di cui attualmente non disponiamo.

7.2 Scenari futuri di mercato

L'opportunità di escludere posizionando in verticale le cappe permetterebbe di laminare acciai che di routine vengono messi in opera "tal quali", senza cioè ulteriori processi di verticalizzazione come ad esempio i così detti "as normalized" tipicamente acciai micro legati o strutturali. L'esclusione delle cappe, attualmente non possibile, permetterebbe di applicare alle barre un raffreddamento più rapido con l'ottenimento di caratteristiche meccaniche elevate tali da consentire la messa in opera del materiale senza ulteriori trasformazioni. In realtà il nostro business nel tempo si è orientato all'acquisizione di mercati destinati allo stampaggio, abbandonando via via la fornitura di materiale da utilizzare tal quale; per tali motivi ad oggi non ci è possibile prevedere i volumi potenzialmente acquisibili su materiale "as normalized"; d'altronde senza una stima dei volumi potenzialmente acquisibili su tali mercati, non ci è possibile di giustificare un'eventuale modifica impiantistica atta alla fornitura di tale acciai.