

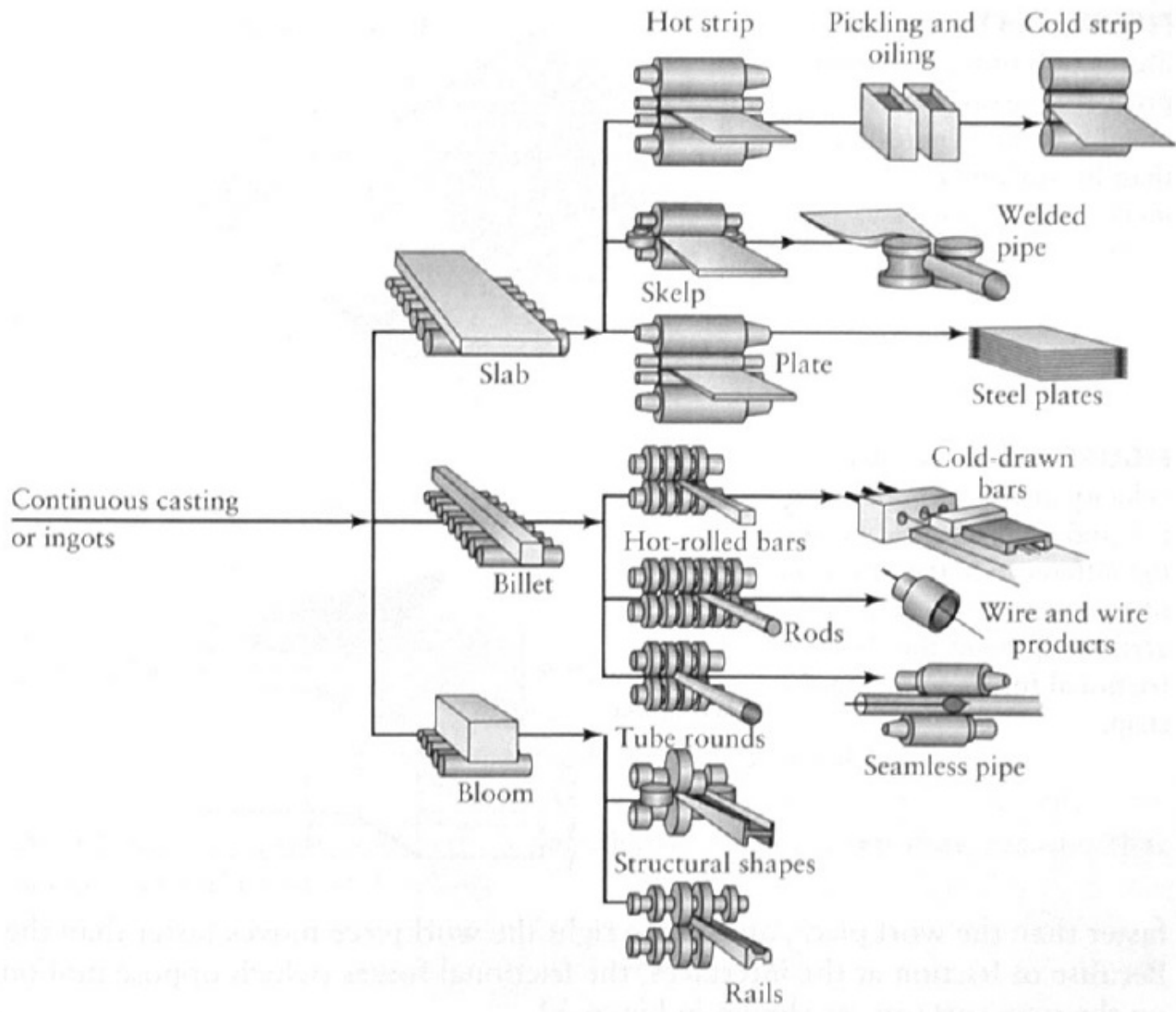
# Introduzione

Il processo di colata continua si è sviluppato con successo a partire dagli anni cinquanta per incrementare la produttività dell'acciaio affidata fino ad allora alla colata in lingotti.

In realtà già verso la fine del diciannovesimo secolo era nata la colata continua per metalli non ferrosi.

Il principio è quello di colare con continuità acciaio liquido trasformandolo nel corso della solidificazione in barre di metallo. A seconda delle dimensioni raggiunte dalla barra si distinguono diversi semilavorati : bramme (*slab*), blumi (*blooms*) e billette (*billets*), destinati a loro volta a successive lavorazioni per ottenere un prodotto siderurgico finito.

# Introduzione



# Introduzione

Uno dei principali vantaggi della colata continua è quello di ottenere con costi contenuti e tempi brevi barre di sezione finita e di forma appropriata per la diretta utilizzazione da parte dei treni di laminazione finitori. La qualità del prodotto si controlla nelle prime fasi della solidificazione ovvero nella lingottiera di rame che ne controlla anche la forma finale. I costi legati alla lingottiera costituiscono una cospicua parte delle spese per l'intero impianto.

# Impianto

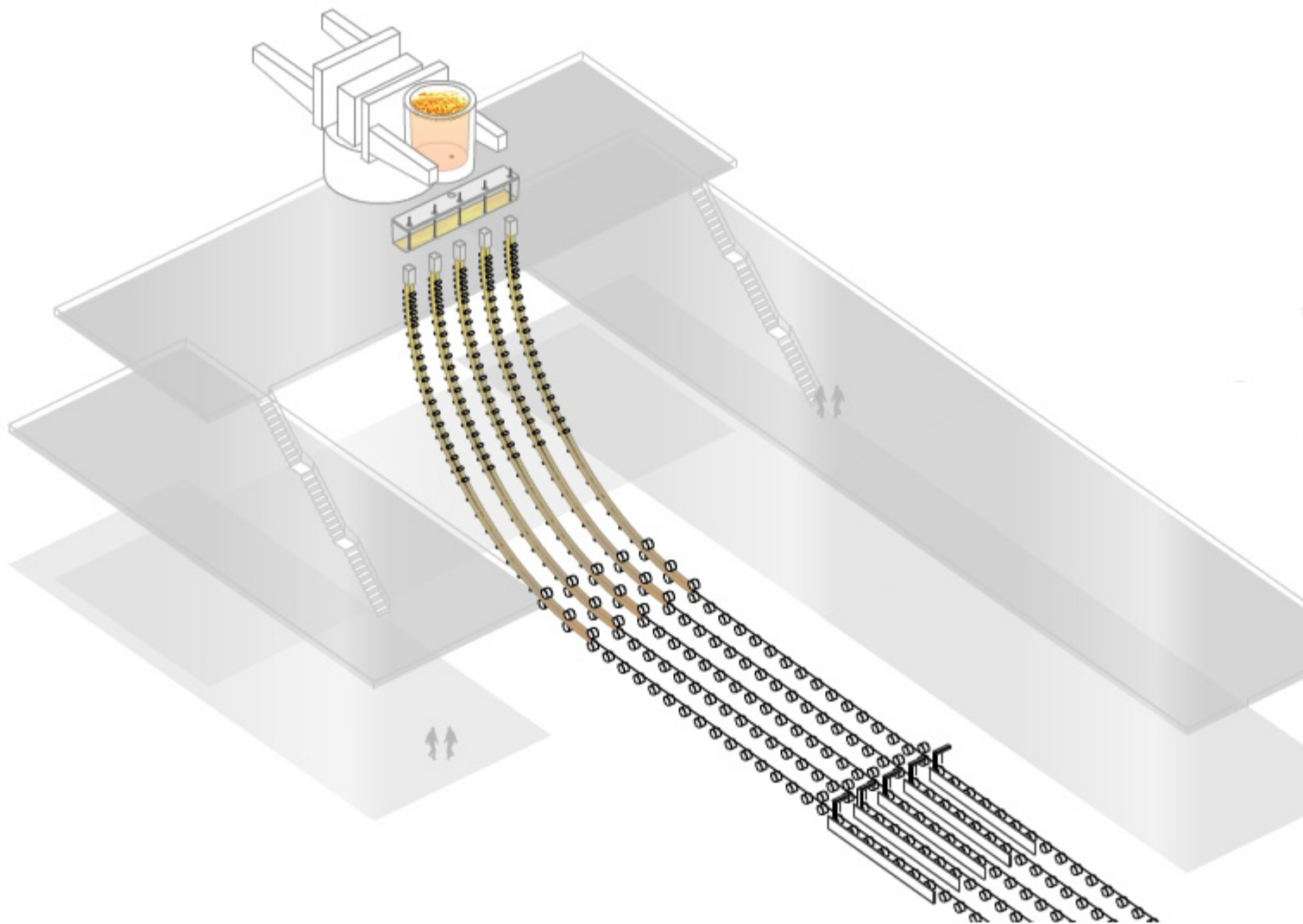
L'acciaio liquido arriva dai processi di seconda fabbricazione (affinazione) e quindi riversato in appositi contenitori di lamiera rivestiti internamente da refrattari chiamati siviere.

Le siviere alimentano un contenitore rivestito anch'esso in refrattario, la panierina, e destinato a ricevere il getto di acciaio. Il compito principale della panierina è mantenere un battente ferrostatico costante ossia garantire un deflusso regolare dell'acciaio; nel caso di più linee di colata ripartisce equamente il flusso d'acciaio.

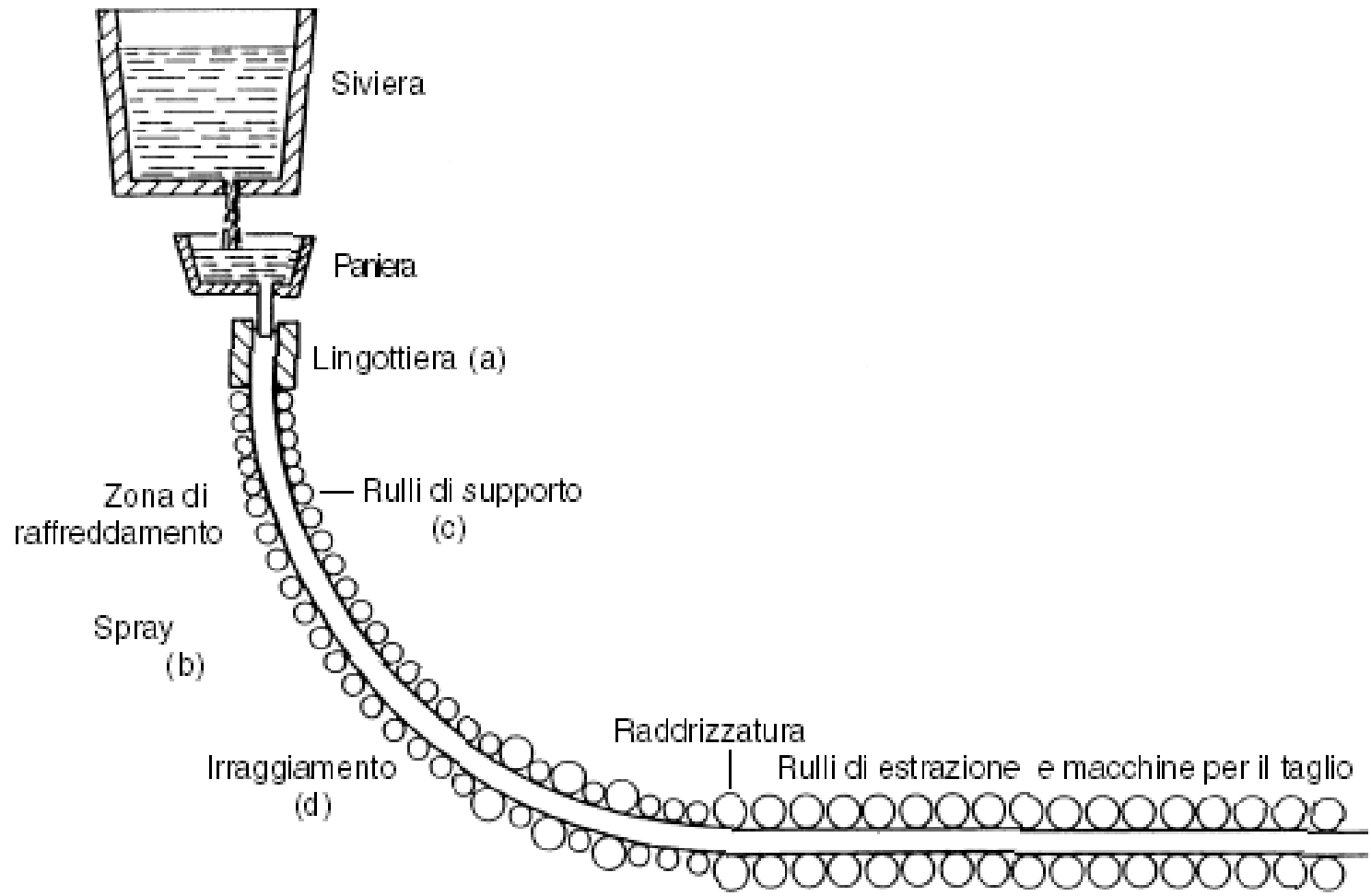
La solidificazione dell'acciaio liquido è affidata alla lingottiera, uno stampo in lega di rame raffreddato a circolazione forzata d'acqua.

Segue una zona di raffreddamento anche intenso per la barra, generalmente realizzato con spruzzi d'acqua in pressione.

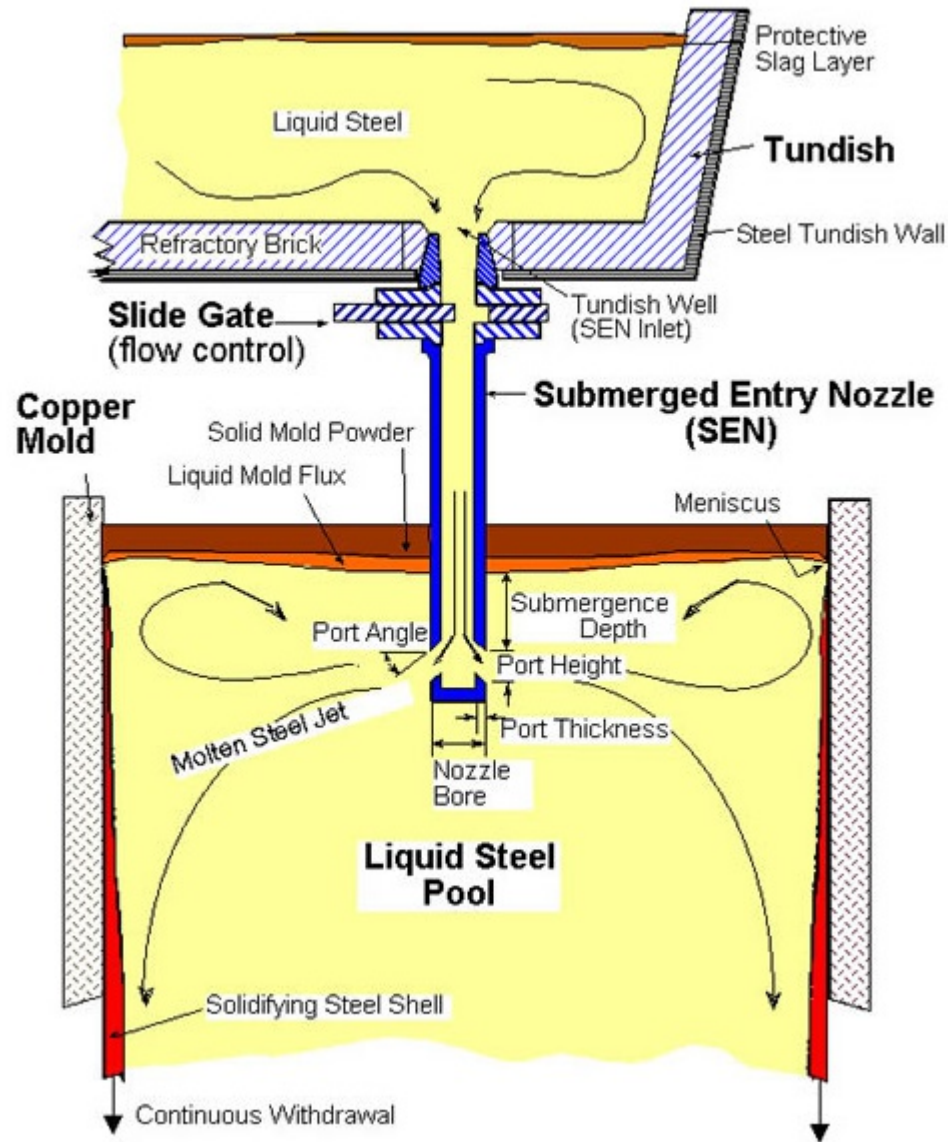
# Impianto



# Impianto



# Impianto



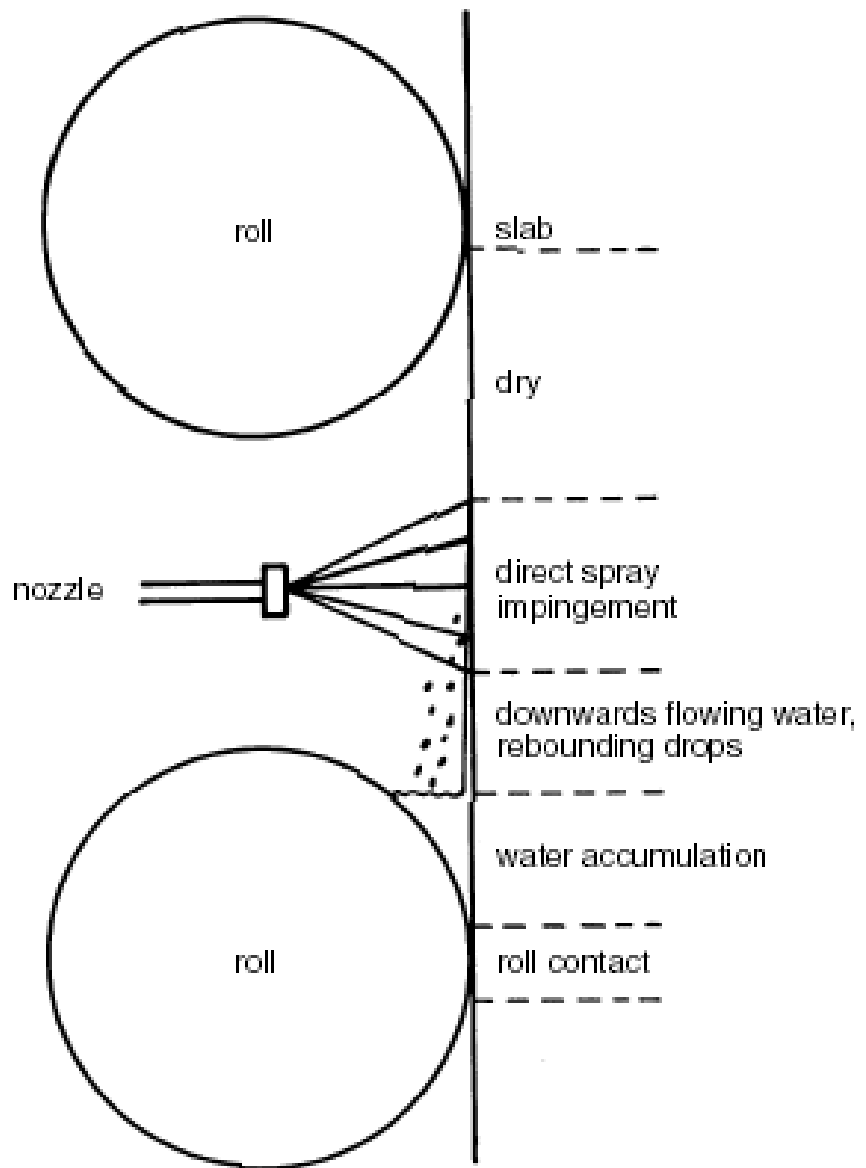
# Impianto

Nella lingottiera il calore viene smaltito principalmente dall'acqua di raffreddamento. Si forma così una pellicola solida chiamata pelle o guscio della linea che incrementa di spessore lungo la lingottiera fino a circa 3 cm. L'interno della linea rimane liquido o semisolido (*mushing zone*) per molti metri e il suo stato dipende dalla velocità di colata e dallo spessore della linea.

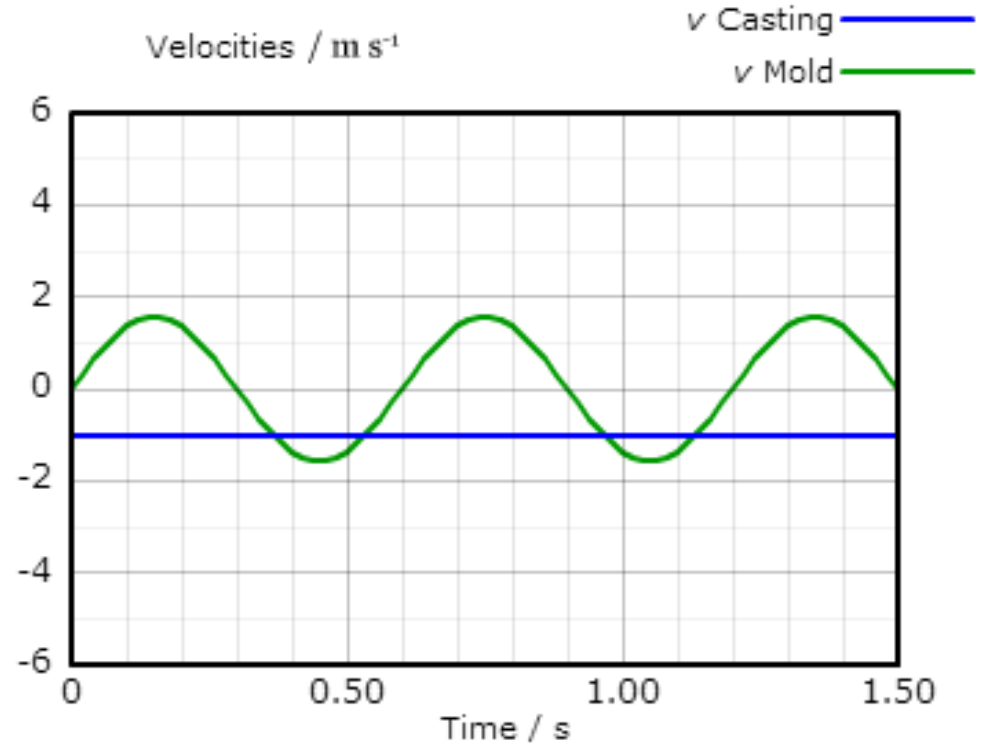
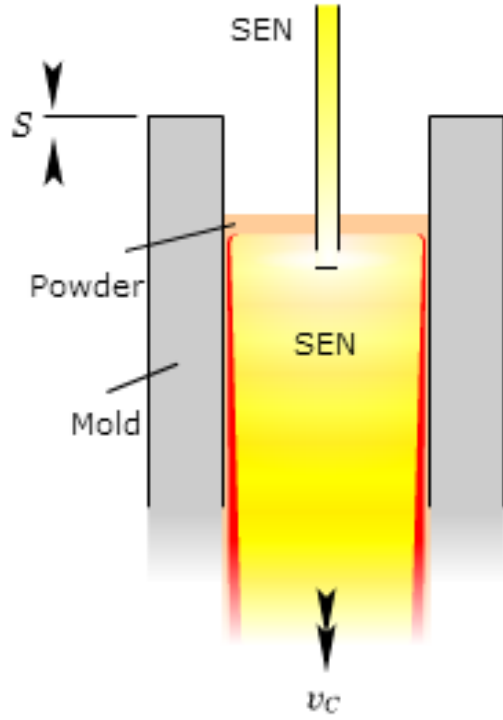
Appena si solidifica un guscio di spessore sufficiente a contenere l'acciaio liquido, la linea di colata abbandona la lingottiera (il tempo di permanenza è generalmente inferiore ad un minuto) per proseguire il raffreddamento secondario.



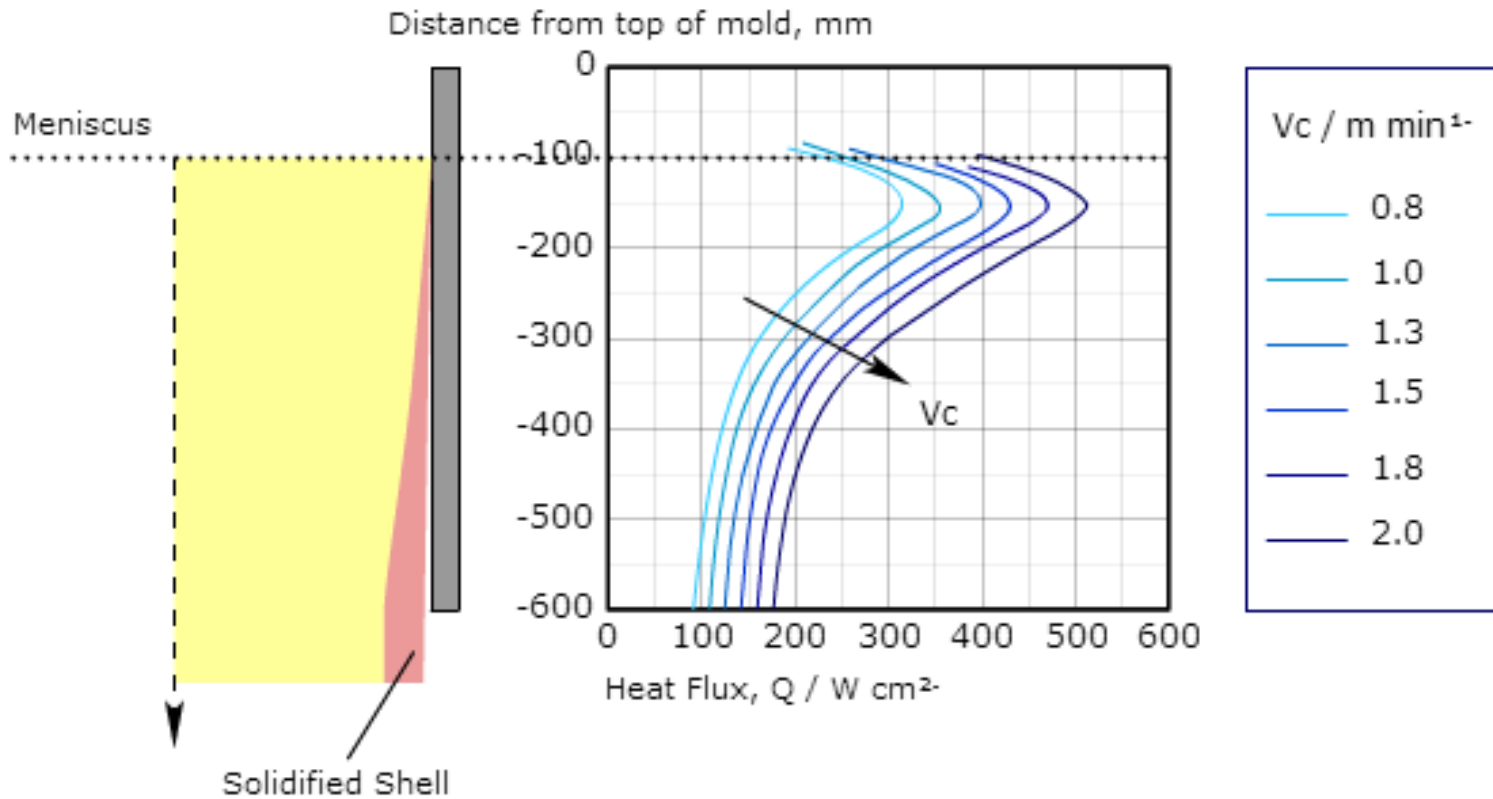
# Impianto



# Impianto



# Impianto

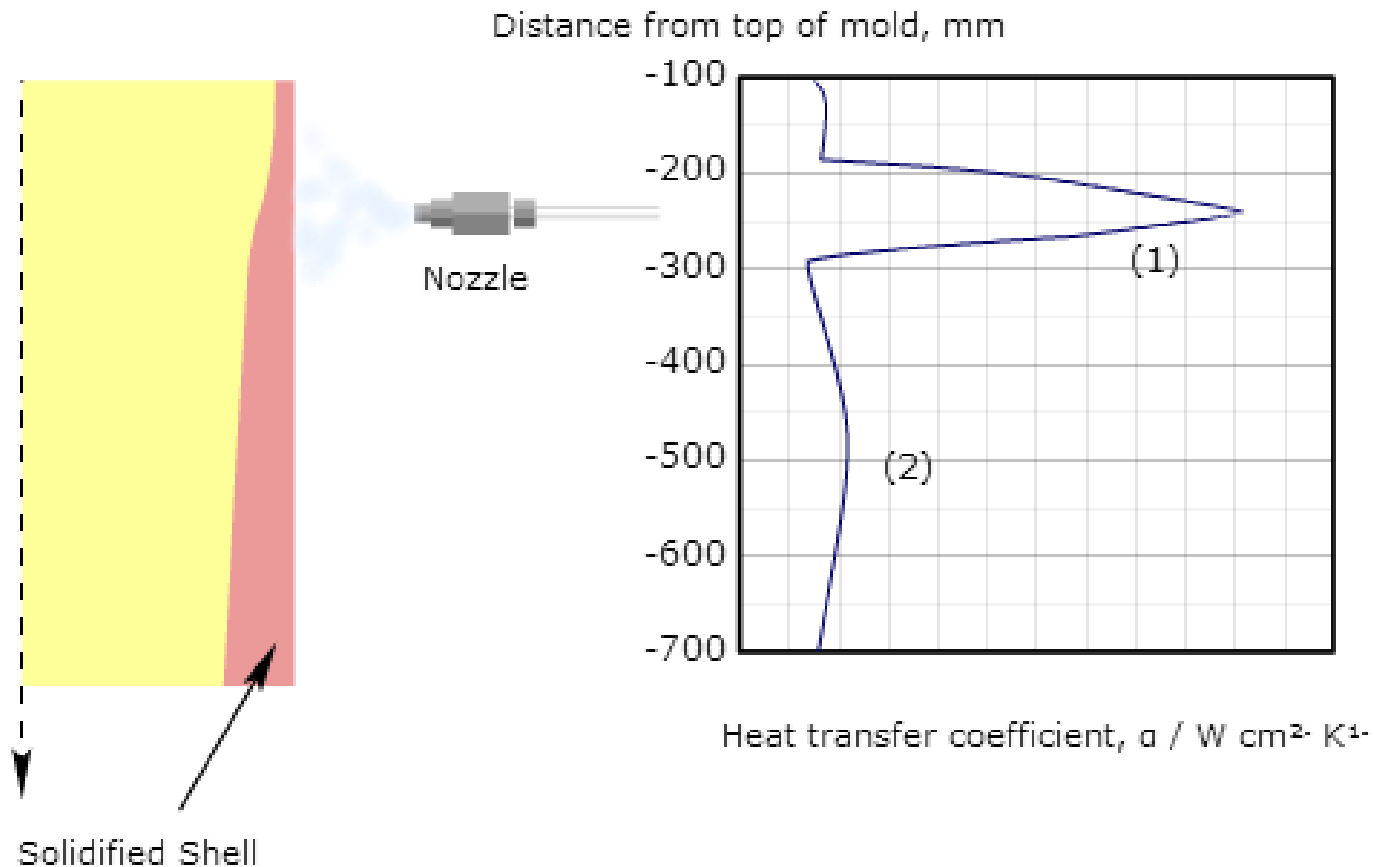


# Impianto

Lo spessore della pelle dipende dalla forma e dalle dimensioni della sezione trasversale della barra e per tali esigenze la velocità di colata, ossia la velocità di avanzamento della linea, varia da 0,5-1,8 m/min per le bramme fino a 2-5 m/min per le billette. Il motivo per cui la lingottiera non prosegue ulteriormente nella solidificazione è che durante il raffreddamento si ha una contrazione della pelle (ritiro di solidificazione) per cui viene meno il contatto linea-lingottiera e si perde l'efficienza di trasmissione del calore per la presenza di uno strato di aria che si interpone tra le pareti di rame e il guscio solido appena formatosi.

# Impianto

Nella zona sotto la lingottiera (zona di raffreddamento secondario) la sottrazione di calore avviene per irraggiamento, per contatto con i rulli di sostegno e mediante spruzzi d'acqua nebulizzata. Il raffreddamento deve essere il più regolare ed uniforme possibile lungo tutto il perimetro della barra.



# Lingottiera

Nella colata continua la lingottiera è l'unica parte esposta all'acciaio fuso e riveste il ruolo principale dovendo generare una pelle solida omogenea tale da garantire un efficiente trasferimento di calore. Esistono vari tipi di lingottiera, tutte comunque raffreddate ad acqua, a seconda del prodotto:

- lingottiera a piastre per bramme e blumi.
- Lingottiera tubolare per blumi di dimensioni contenute e tondi.
- Lingottiera ad ampiezza variabile per bramme a larghezza variabile.
- Lingottiera per la colata combinata per forme complesse come prodotti colati per travi

# Lingottiera

Le lingottiere a piastra sono le più diffuse e sono costituite da piastre di rame elettrolitico laminato raffreddate ad acqua. La zona di raffreddamento per la colata continua dell'acciaio varia dai 600 ai 900 mm di lunghezza, mentre la temperatura viene mantenuta tra i 100 e i 250°C. La forma adottata non è quella a pareti perfettamente parallele ma generalmente si dà una leggera rastrematura con restringimento di sezione verso il basso allo scopo di esercitare una certa pressione sulle superfici della linea nella direzione dell'uscita, compensare il ritiro di solidificazione e ritardarne il distacco dalle pareti della lingottiera, migliorando così la trasmissione del calore nella parte bassa della lingottiera.

# Lingottiera

Per evitare che lo strato di pelle solida si incolli alla lingottiera di rame si utilizzano due principi fondamentali:

tramite oscillazione: La lingottiera oscilla con moto non armonico per un'ampiezza dai 3 ai 10 mm e con una frequenza di 1-3 Hz, con velocità di discesa molto vicina a quella di estrazione della linea (ordine del metro\minuto) ma sufficiente a creare un moto relativo tra lingottiera e linea, mentre la velocità di risalita è maggiore.

tramite lubrificazione: Il sistema di lubrificazione è di notevole importanza nella determinazione del calore scambiato. Si usano due tipi di lubrificazione :

1- *lubrificazione ad olio*: (olio di colza oppure polvere sintetica a base di ceramica che galleggia nel bagno metallico) per piccole billette e tondi.

2- *lubrificazione con polveri*: La polvere a contatto con l'acciaio liquido fonde formando scorie che infiltrano nell'intercapedine tra acciaio e rame.



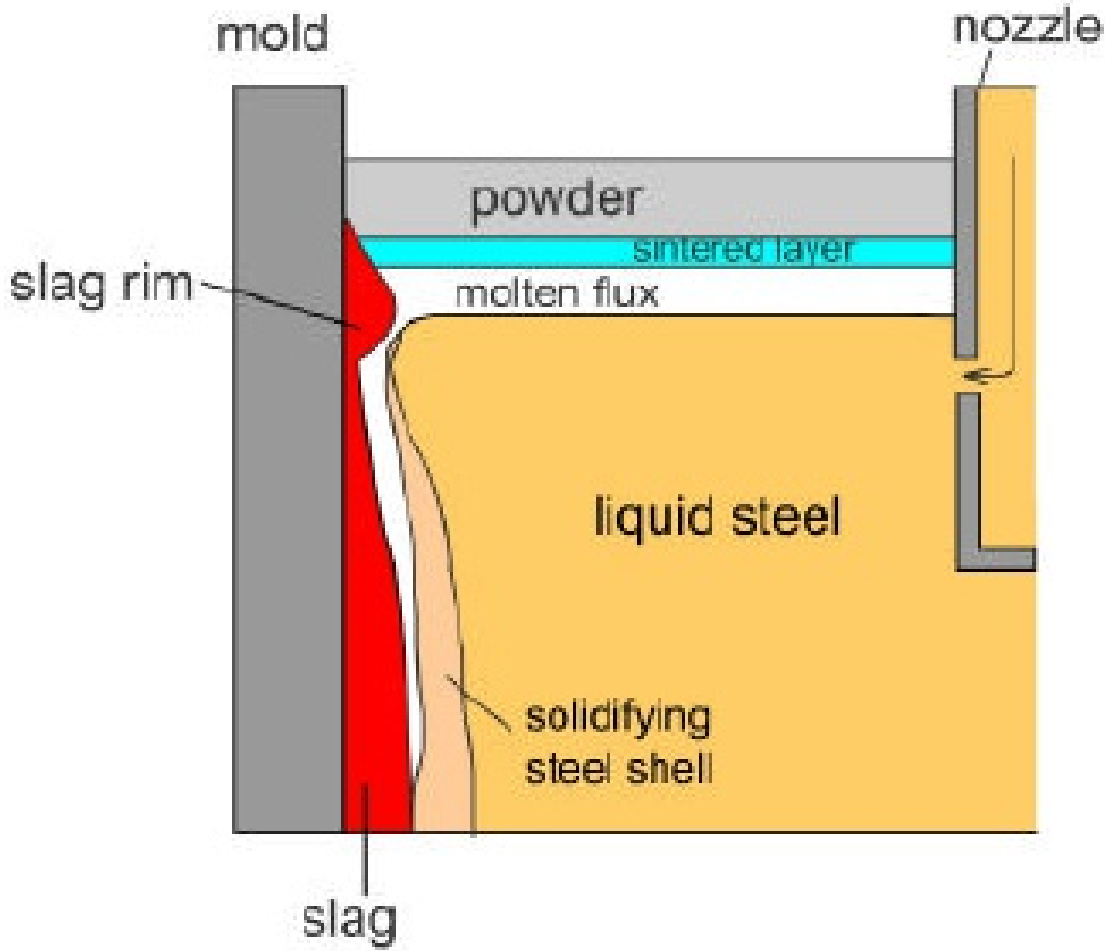
# Lingottiera

Le principali funzioni della polvere da lingottiera sono :

- proteggere la superficie liquida dell'acciaio dall'ossidazione
- isolamento termico della linea
- assorbimento di inclusioni non metalliche provenienti dall'acciaio
- controllo dello scambio termico tra la parete della lingottiera e guscio di acciaio
- formare un film lubrificante (0,5-2 mm) tra pelle della linea e lingottiera

Per quanto riguarda la composizione chimica, le polveri per lingottiera sono costituite da una miscela complessa di carbonio, ossidi vari (tra cui  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ) e altri materiali.

# Lingottiera



# Lingottiera

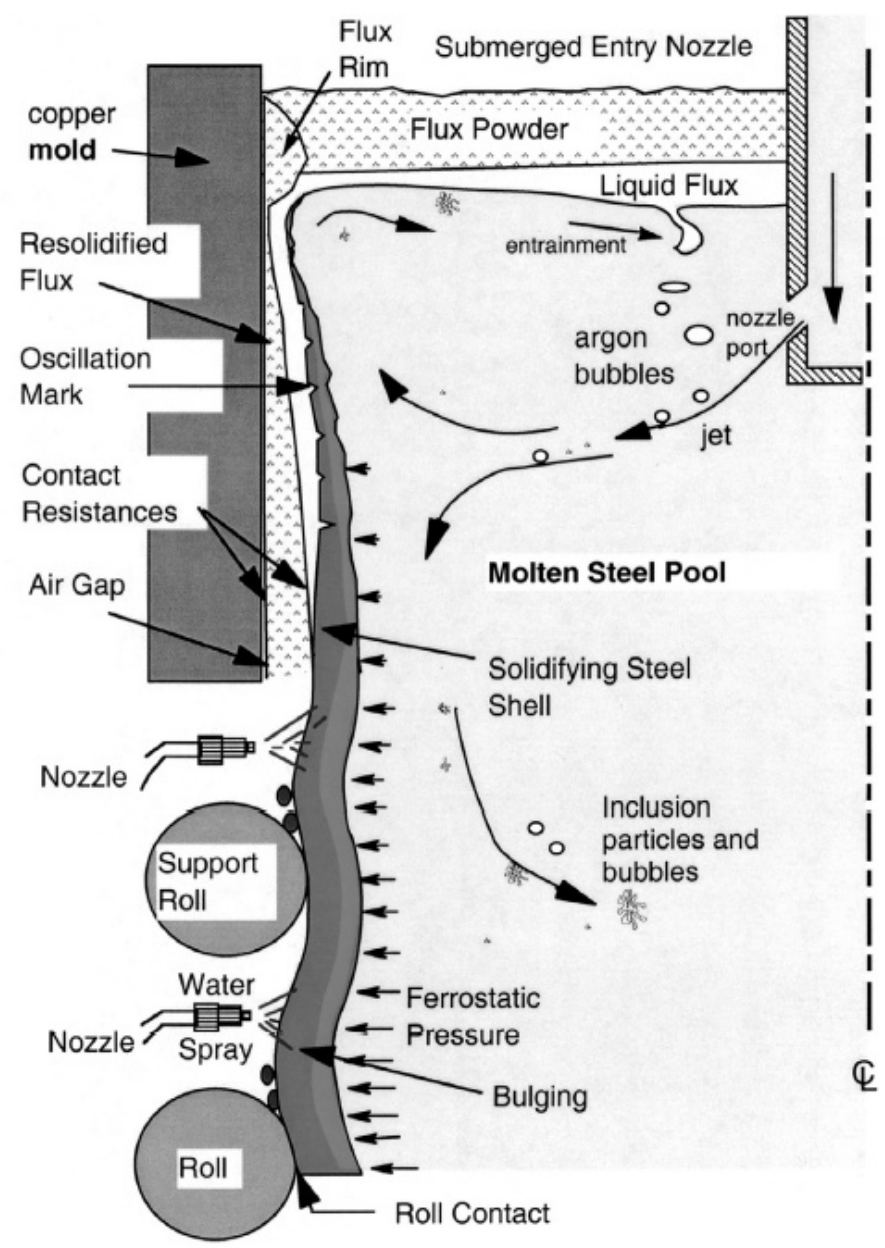
Le polveri, una volta versate in lingottiera, perdono parte del carbonio per ossidazione e si riscaldano a contatto con l'acciaio liquido, formando uno strato sinterizzato (*sintered layer*) e uno fuso (*molten flux*). Quest'ultimo si distribuisce su tutta la superficie libera dell'acciaio e, grazie alle oscillazioni della lingottiera (*mold*), si infiltra nell'intercapedine tra essa e il guscio più esterno di acciaio solidificato (*solidifying steel shell*). In questo modo, lo strato liquido agisce da lubrificante. Il flusso infiltrato solidifica parzialmente a sua volta a contatto con la lingottiera, la cui parete è raffreddata ad acqua, formando uno strato di scoria (*slag*) il cui spessore aumenta appena sopra la superficie dell'acciaio.

Il ruolo di questo strato è permettere un adeguato livello di trasferimento di calore tra il guscio di acciaio solidificato e la lingottiera.

# Lingottiera

Tuttavia verso la fine della lingottiera la pelle solida può staccarsi dalle piastre di rame a causa della contrazione subita dal metallo creando un gap che si riempie di gas e che riducendo il flusso termico rallenta il processo di solidificazione.

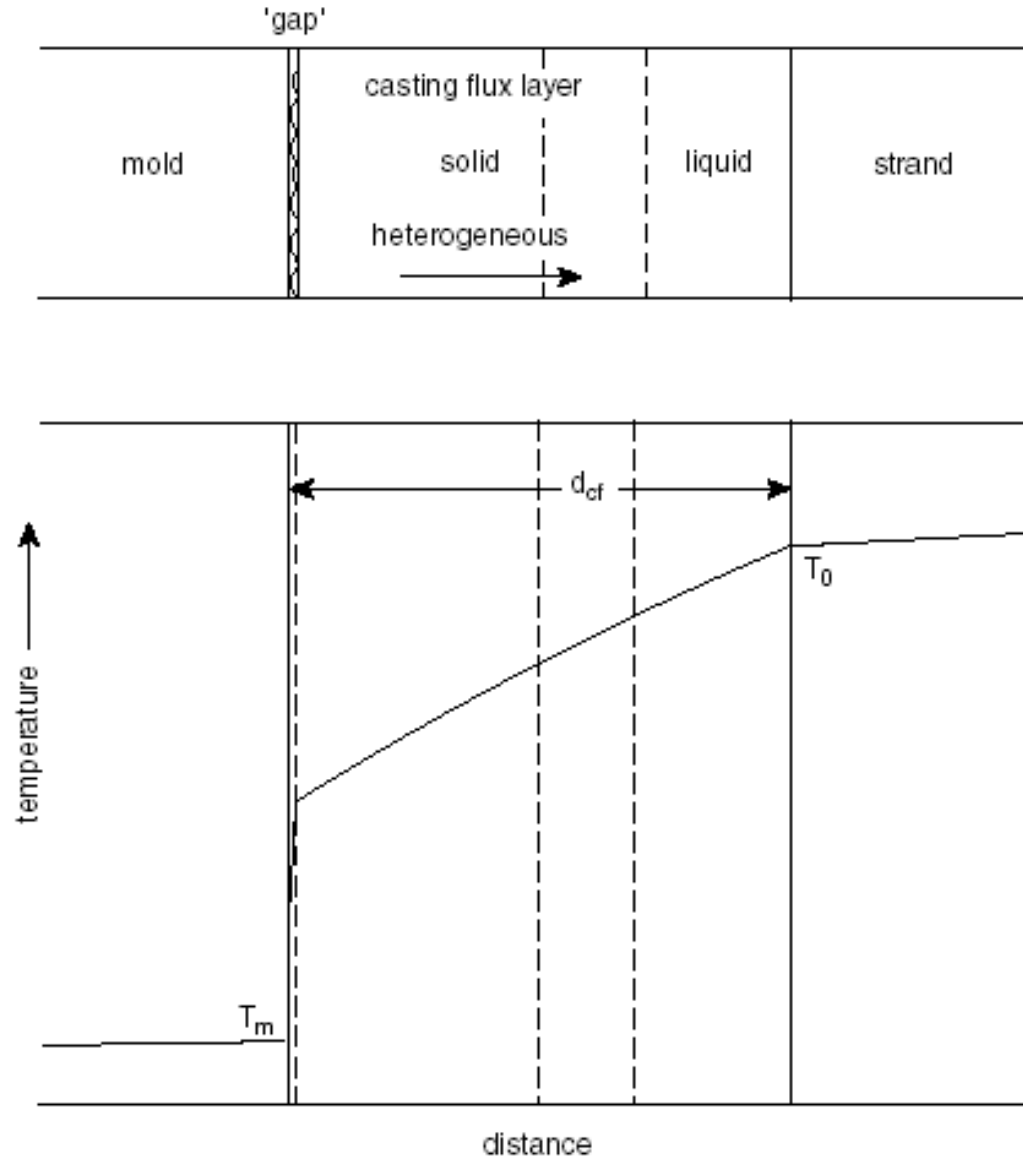
L'immagine riportata nella diapositiva successiva rappresenta schematicamente i diversi strati nella parte superiore della lingottiera quando non si è ancora creato un sufficiente gap di aria tra la pelle dell'acciaio e la parete della lingottiera.



# Lingottiera

La polvere lubrificante, che ha una temperatura di fusione di circa 1150 °C, è liquida in contatto con la linea calda e solida vicino le pareti della lingottiera. Ci può essere una zona eterogenea (*mushing zone*) tra le parti liquide e le parti solide composta da una miscela di liquido e cristalli. Mentre si assume che ci sia un contatto praticamente perfetto tra la superficie della pelle della linea e il liquido, ciò non si verifica tra la parte solida e la lingottiera; inoltre a seconda della composizione della polvere, la superficie solida può essere più o meno levigata. Così, anche nella parte più alta della lingottiera dove non esiste uno strato d'aria macroscopico, ci può essere un intervallo microscopico che causa una resistenza all'interfaccia con le pareti della lingottiera.

# Lingottiera



# Raffreddamento secondario

Nella parte più alta della zona di raffreddamento secondaria, la linea è solitamente raffreddata da spruzzi d'acqua proveniente da ugelli posizionati negli spazi tra i rulli.

Il raffreddamento tramite spruzzatori deve :

- Assicurare una solidificazione completa della linea
- Garantire temperature idonee alla raddrizzatura
- Fornire un raffreddamento uniforme e graduale

Tuttavia in questo tratto si può avere raffreddamento per semplice irraggiamento e/o contatto con gli stessi rulli.

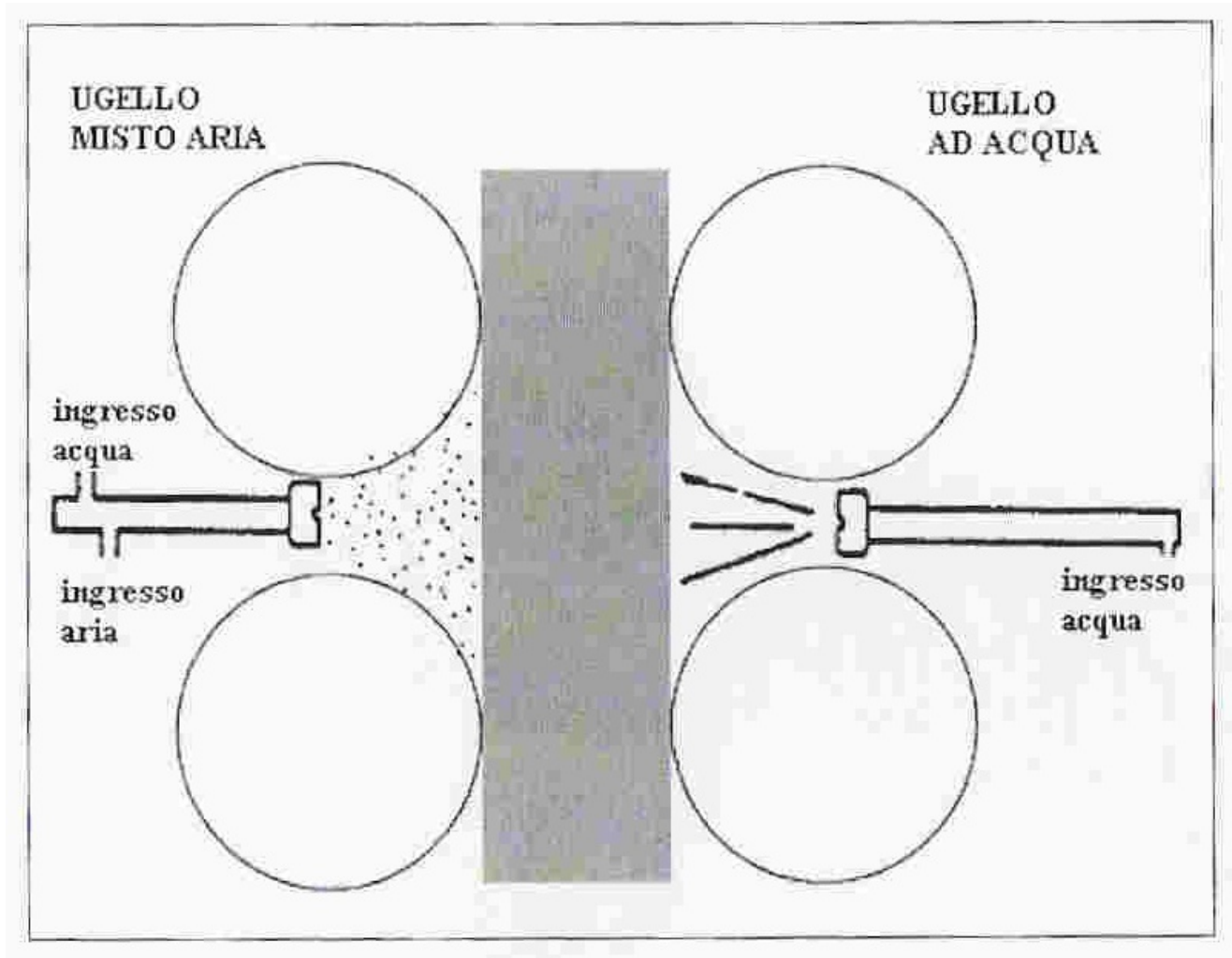


# Raffreddamento spray

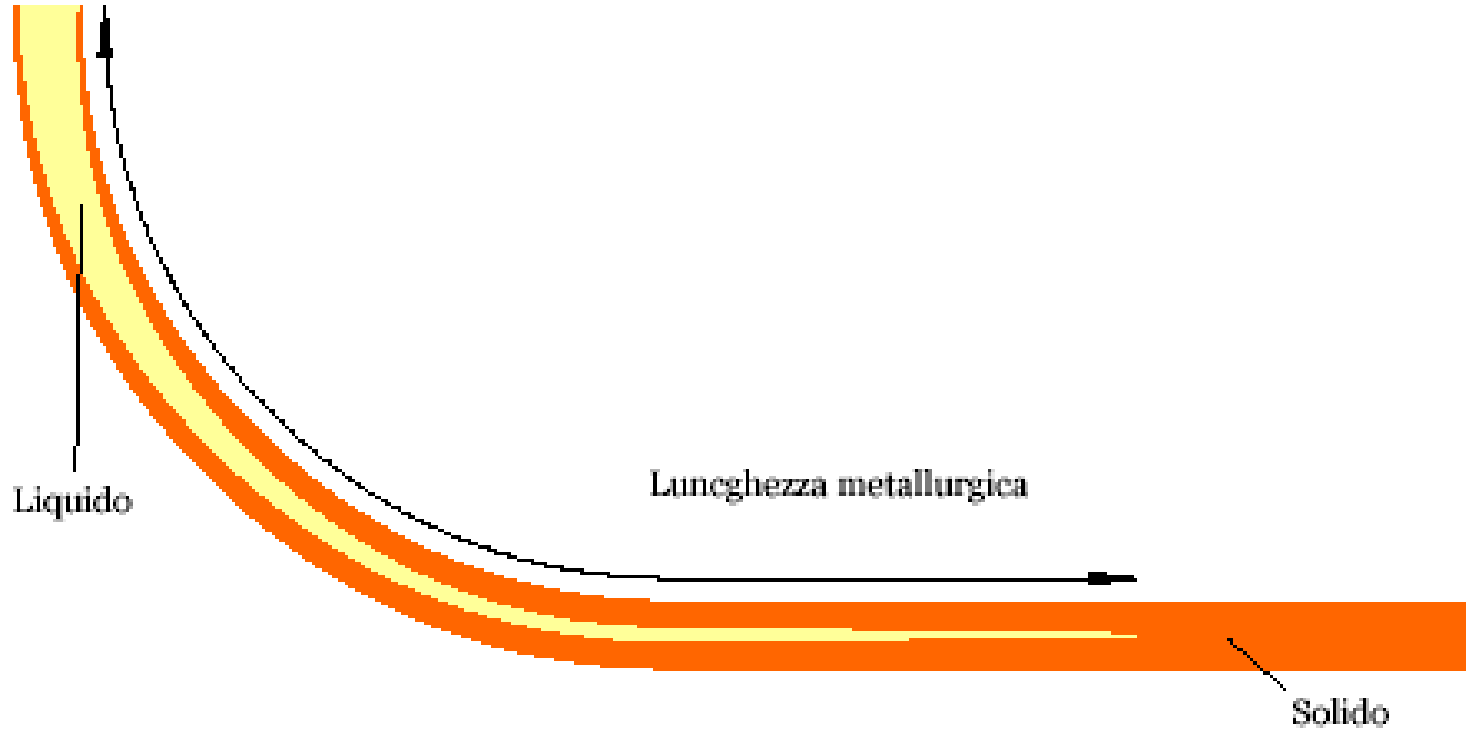
Ci sono due tipi principali di ugelli, secondo la forma dell'area bagnata: gli ugelli a getto piatto usati nella colata a piastra e gli ugelli a cono usati nella colata di billette e blumi. L'area bagnata nel primo caso è a forma di un rettangolo con spigoli arrotondati; nel secondo caso è a forma di cerchio (ugelli a coni pieni).

I primi sistemi di raffreddamento erano composti esclusivamente da ugelli ad acqua, mentre recentemente sono stati introdotti spray misti aria-acqua, chiamati nebulizzatori. Attraverso tali ugelli acqua e aria confluiscono contemporaneamente formando un getto di particelle vaporizzate ad elevata pressione. Questo permette un'ottimizzazione nell'uso dell'acqua e si aumentano i coefficienti di trasmissione del calore.

# Raffreddamento spray



# Crescita del guscio

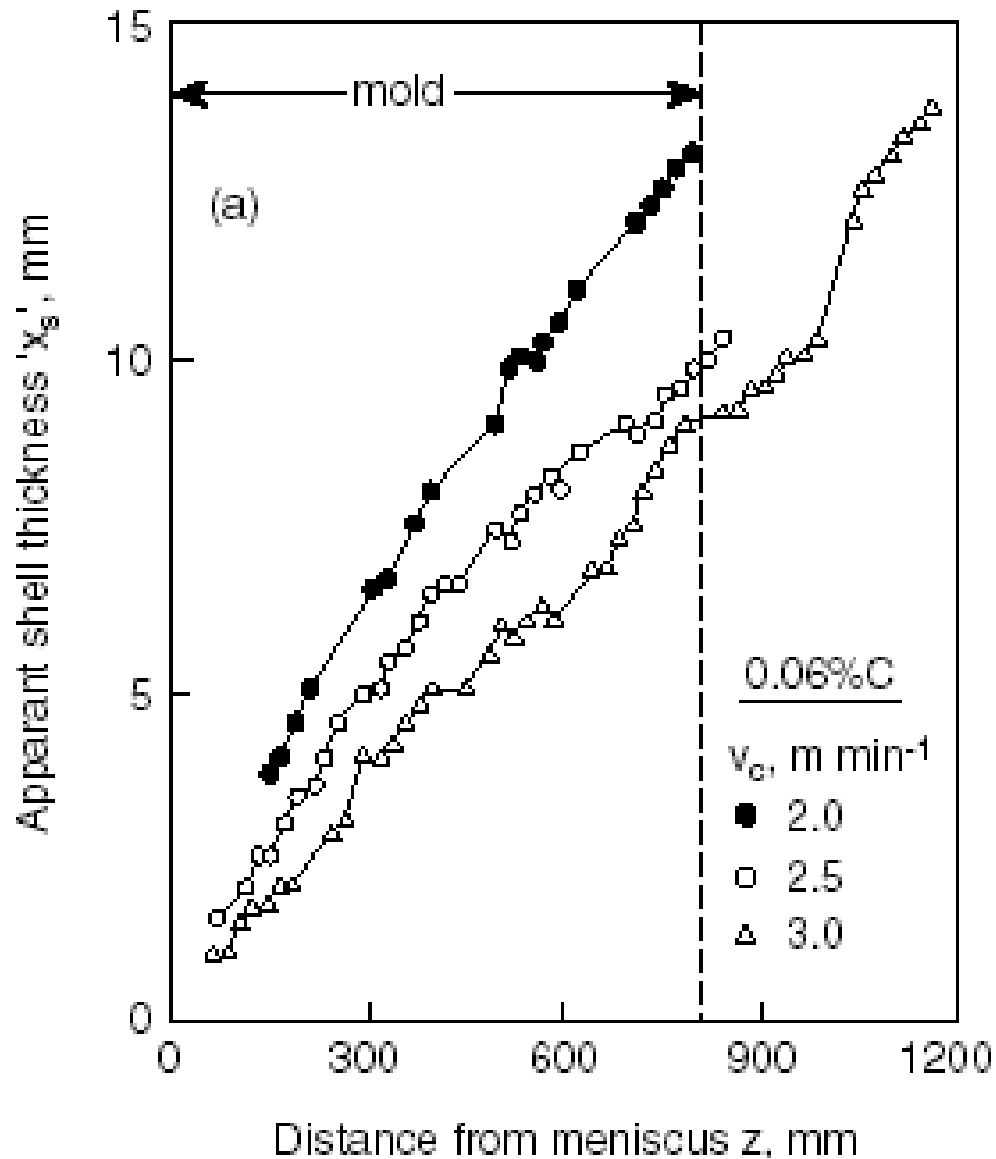


# Crescita del guscio

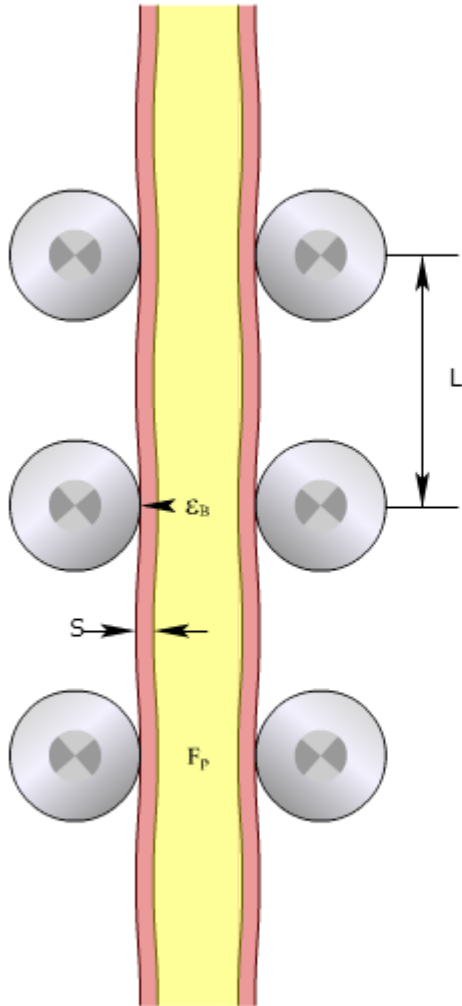
Un metodo per misurare lo spessore della pelle è l'utilizzo di un sensore meccanico immerso nella lingottiera dal menisco.

In alternativa si possono utilizzare i *breakouts*, i quali vengono fatti bucando la pelle della linea ma questa tecnica è molto costosa. I tracciatori radioattivi (per es.  $Au^{198}$ ) o tracciatori chimici (FeS) vengono aggiunti dal menisco e si distribuiscono nella parte interna liquida della linea segnando quindi il fronte di solidificazione la cui posizione viene determinata, dopo il raffreddamento a temperatura ambiente, sezionando la linea e identificando i tracciatori direttamente nella sezione. Un altro metodo è inserire una pesante punta di tungsteno con una sorgente interna radioattiva ( $Au^{198}$  o  $Co^{60}$ ) o un pezzo di piombo che scendendo ad una velocità relativamente alta, si stabilizzano sul fondo del cono liquido della linea.

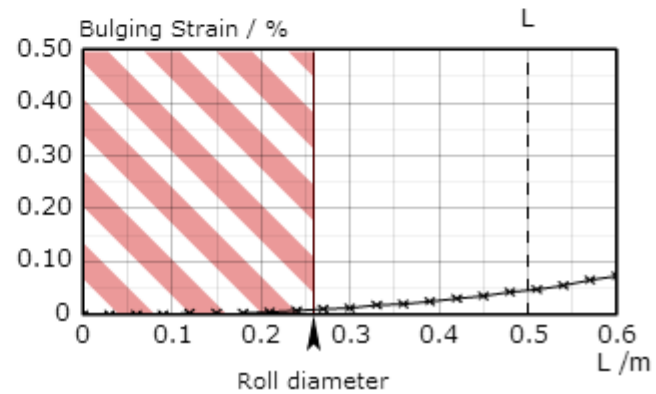
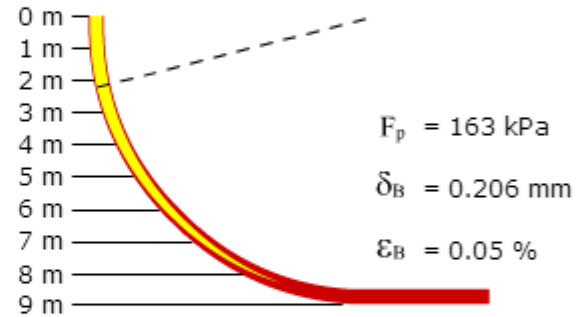
# Crescita del guscio



# Crescita del guscio



Variable	Values	Units
Casting speed, $V_c$	1	$\text{m min}^{-1}$
Roll pitch, $L$	500	mm
Height below meniscus, $h$	2.25	m
Shell thickness, $S$	35	mm



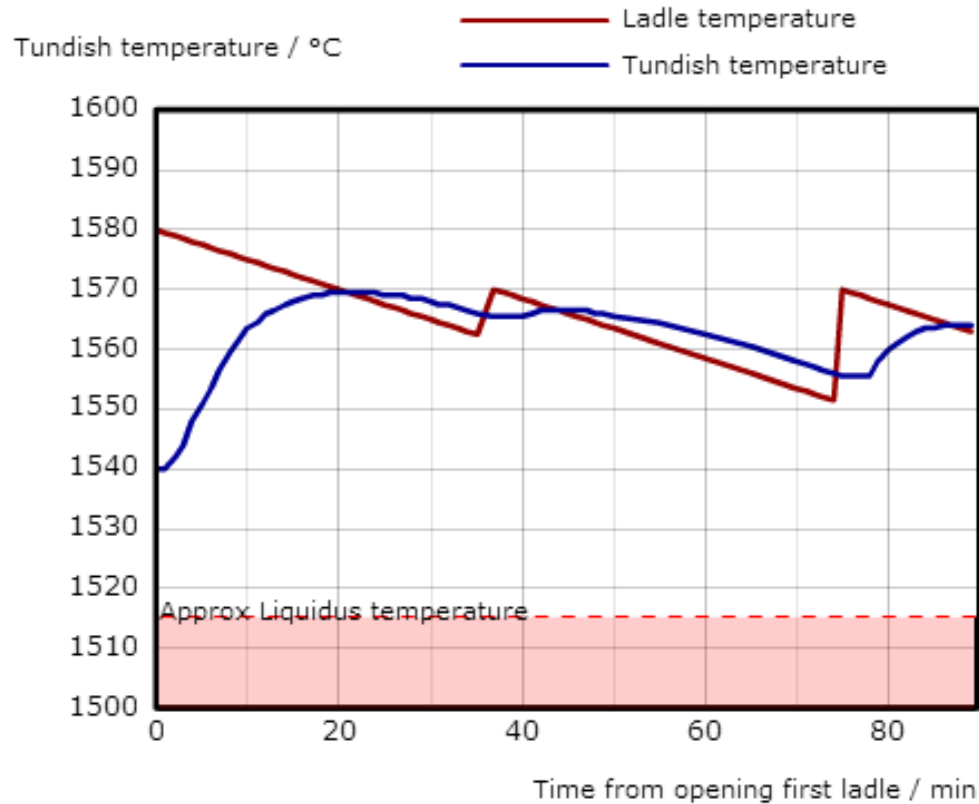
# Crescita del guscio

#1 Ladle temperature / °C

Ladle cooling rate

#2 Ladle temperature / °C

#3 Ladle temperature / °C



# Breakouts

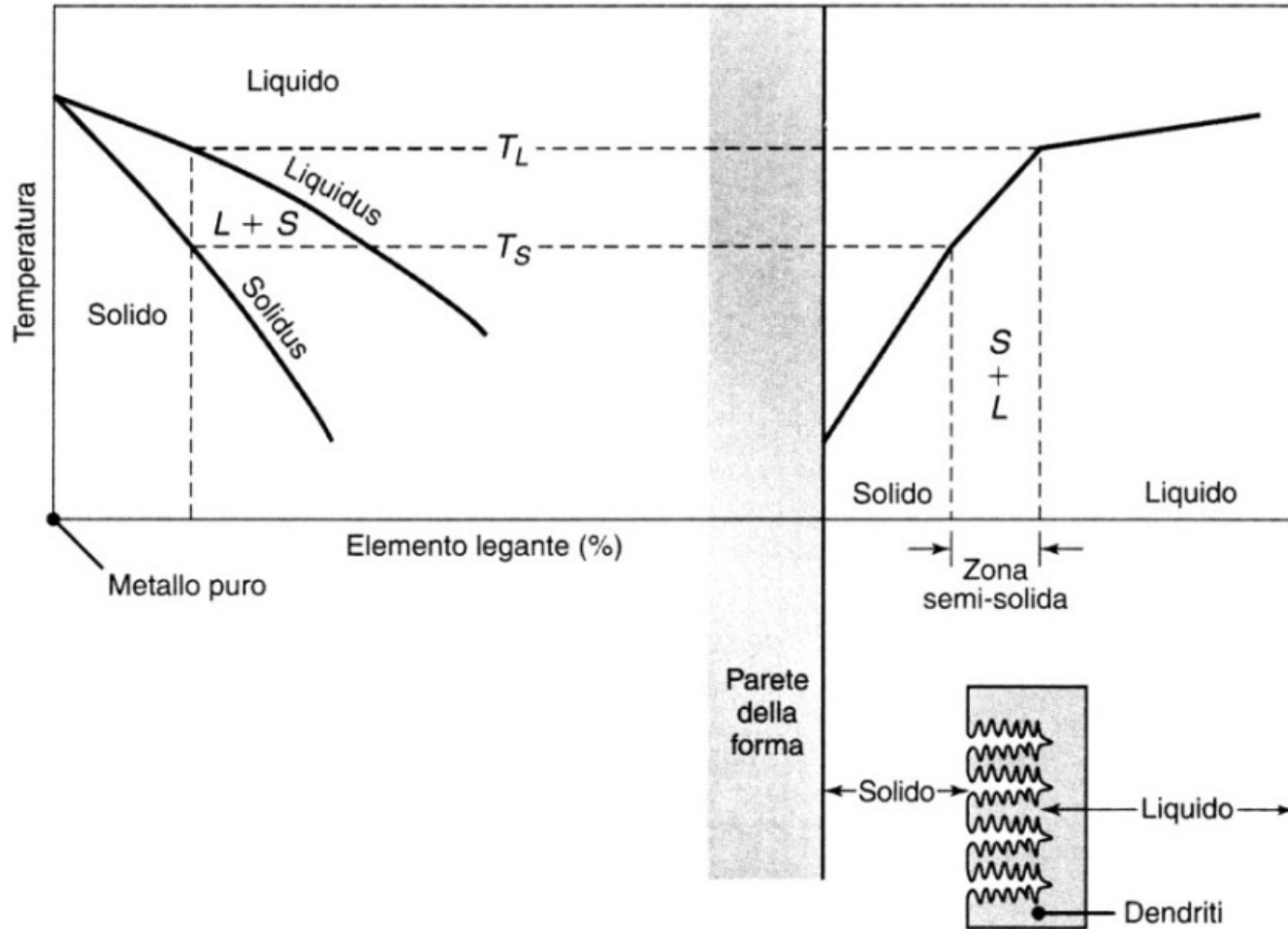
Il fenomeno di rottura della linea è chiamato *breakout* ed è un evento da evitare nella colata continua. Un *breakout* avviene se il battente ferrostatico (la pressione esercitata dall'acciaio sopra la linea) supera la capacità di tenuta del guscio solido.

Lo si evita quindi garantendo che lo spessore della linea in ogni punto sia sufficiente a sopportare il peso dell'acciaio liquido contenuto. Sapendo che la probabilità di *breakouts* è direttamente proporzionale allo spessore della linea, è fondamentale mantenere un adeguato livello di acciaio nella lingottiera, ossia più alto è il livello in lingottiera e più tempo ha l'acciaio per solidificare.

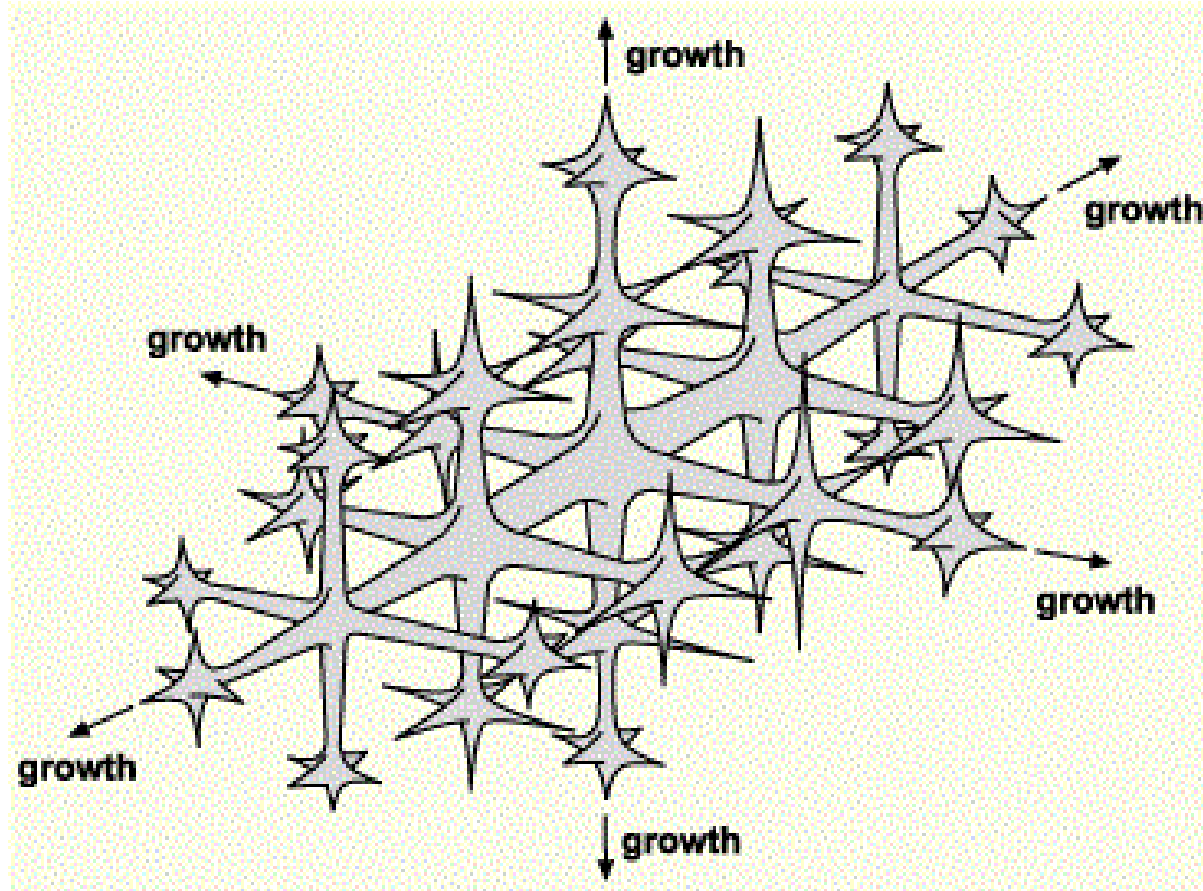
Un altro fattore che può influire sul rischio di *breakouts* è la profondità delle *oscillation marks*. Infatti in questi punti lo spessore del guscio ha una discontinuità che ne provoca la diminuzione dello spessore.



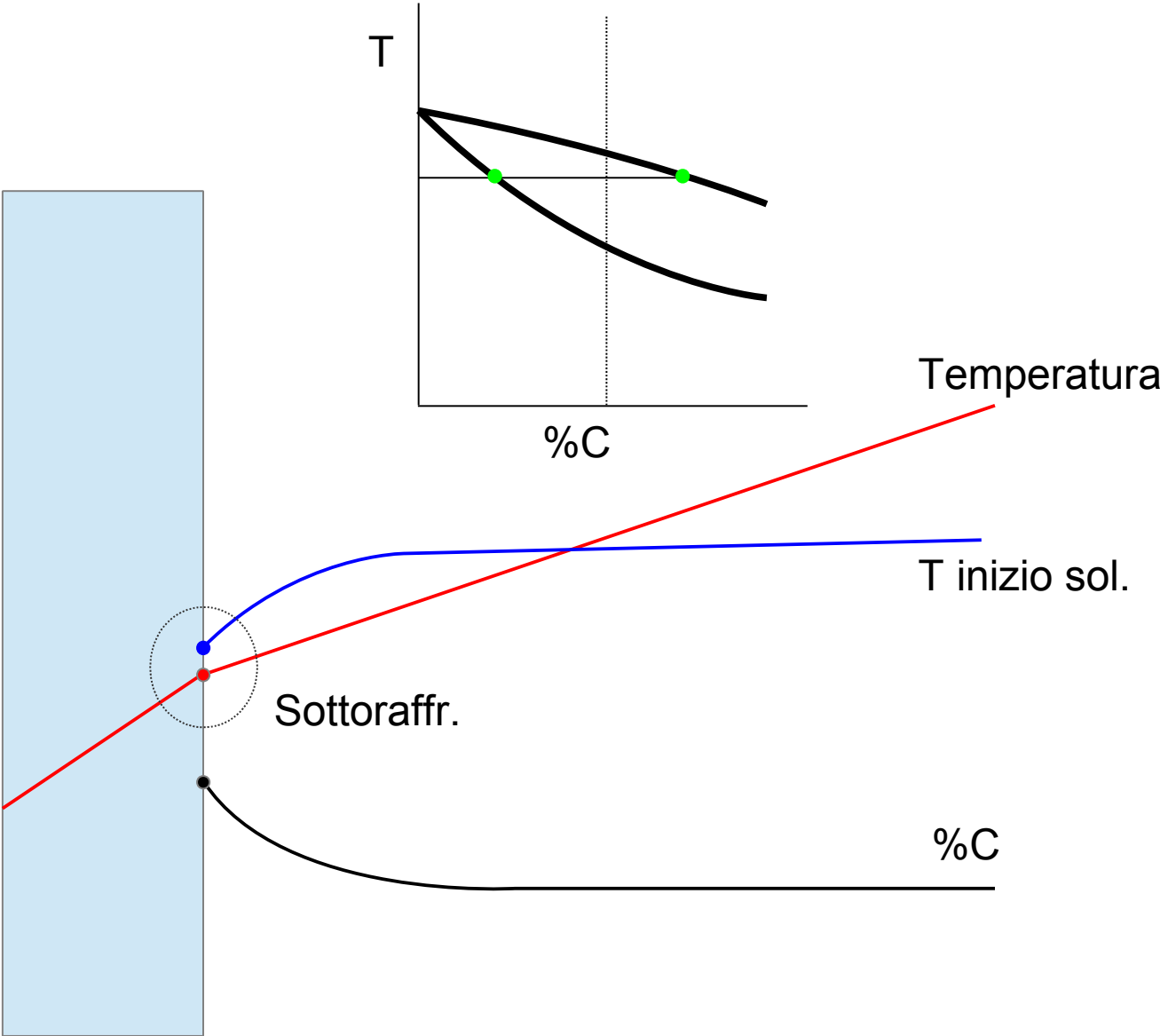
# Solidificazione dendritica



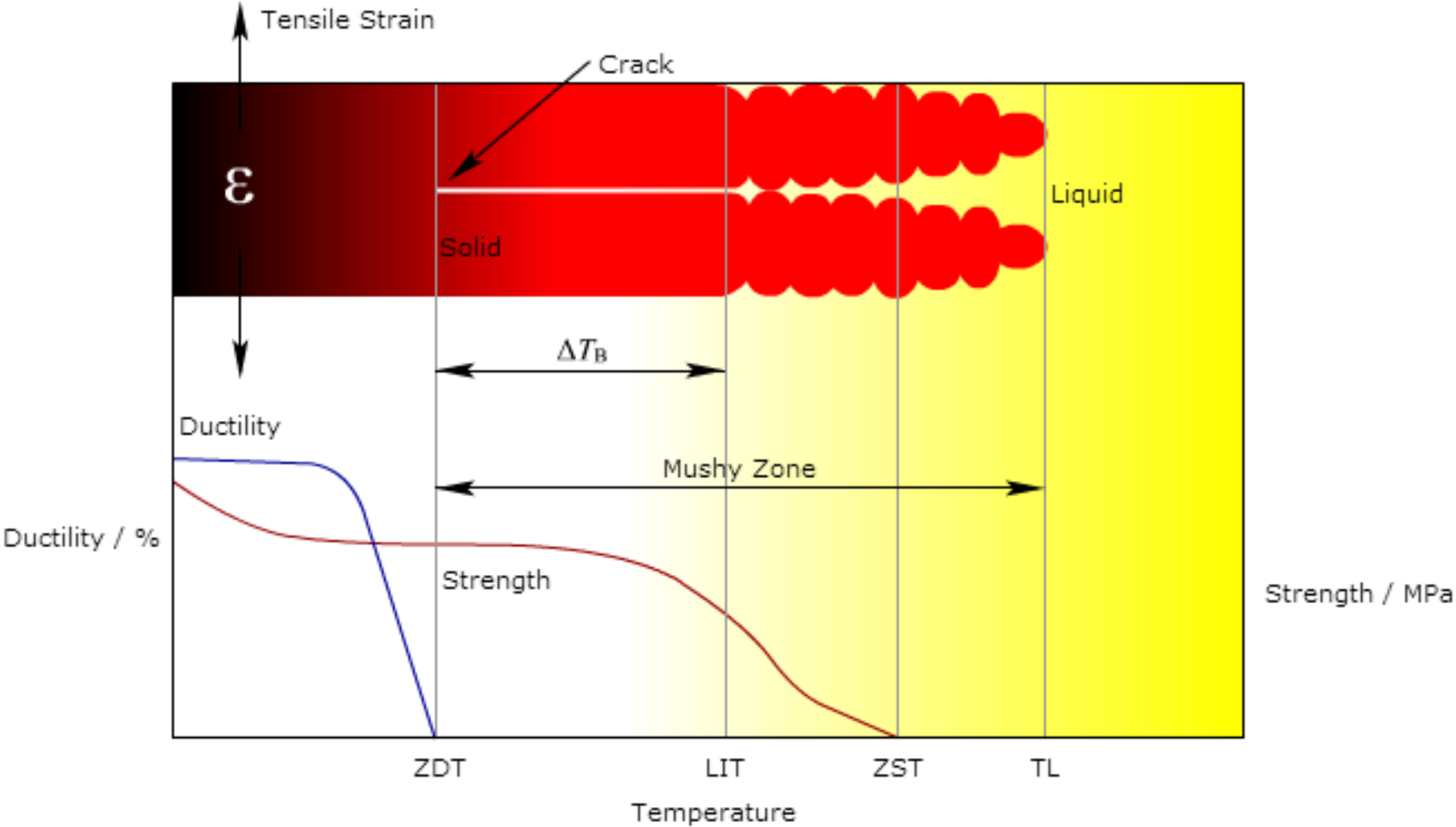
# Solidificazione dendritica



# Solidificazione dendritica



# Solidificazione dendritica



# Solidificazione dendritica

