

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**RISCALDAMENTO A FLUSSO TRASVERSO CON
MAGNETI PERMANENTI DI NASTRI IN
ALLUMINIO**

Relatore:
Dott. Ing. Michele Forzan

Correlatore:
Dott. Ing. Cristian Pozza

Laureando:
Nicola Sempredoni

Anno accademico 2013/2014

Sommario

Questa tesi presenta lo studio di fattibilità di una macchina innovativa che utilizza magneti permanenti per riscaldare nastri di alluminio. Questo metodo prevede di far muovere il nastro ad una certa velocità all'interno di un campo di induzione magnetico costante e trasversale al nastro. Il campo di induzione magnetica è prodotto da dei moduli costituiti da magneti permanenti e materiale ferromagnetico (per concentrare il flusso sul nastro). Per realizzare un impianto di tipo industriale, si prevede che la macchina finale sarà costituita da molti moduli in serie. Uno dei possibili utilizzi è la ricottura continua di nastri in alluminio.

Questo nuovo sistema di riscaldamento a induzione permette di ottenere un rendimento molto elevato ed un controllo della distribuzione della potenza indotta non realizzabile con i sistemi di riscaldamento a flusso trasversale tradizionali.

Tramite il codice FEM sono state fatte delle simulazioni per trovare le geometrie ottimali dei moduli e per analizzare la distribuzione della potenza indotta nel nastro al variare della sua velocità, dello spessore e della larghezza. Partendo dai valori della potenza indotta nel nastro sono state fatte delle simulazioni del transitorio termico di riscaldamento. È stato progettato un prototipo per verificare i risultati ottenuti dalle simulazioni, attualmente in fase di realizzazione.

Indice

1. Introduzione	1
2. Teoria	3
2.1. Riscaldamento a induzione	3
2.1.1. Distribuzione delle correnti e delle potenze indotte	4
2.1.2. Riscaldamento a flusso trasverso di nastri	12
2.2. Metodo agli elementi finiti FEM	15
2.2.1. Formulazioni del problema magnetostatico	15
2.2.2. Formulazioni del problema termico	17
2.2.3. Gestione delle traslazioni	18
2.2.4. Metodi di risoluzione	19
2.3. Magneti permanenti	20
2.3.1. Scelta dei magneti permanenti	22
3. Geometria	23
3.1. Configurazione a magneti superficiali SPM	24
3.2. Configurazione a magnete interno IPM	25
3.3. Configurazione a magneti incassati	26
4. Analisi magnetostatica	27
4.1. Calcolo magnetostatico per la configurazione SPM	28
4.2. Calcolo magnetostatico per la configurazione IPM	33
5. Simulazione 2D	35
5.1. Calcolo dello spessore di penetrazione	35
5.2. Distribuzione delle correnti indotte	38
5.3. Funzionamento a vuoto e a carico del modulo SPM	39
5.4. Funzionamento a vuoto e a carico del modulo IPM	43
5.5. Variazione dello spessore del nastro	46
5.6. Potenza indotta	47
5.7. Conclusioni	49
6. Simulazione 3D	51
6.1. Distribuzione della densità di corrente	52

6.2. Distribuzione della potenza indotta	54
6.3. Variazione della potenza indotta al variare della velocità	56
6.4. Variazione della potenza indotta al variare del traferro	58
6.5. Potenza indotta con nastri stretti	61
7. Distribuzione della temperatura	67
7.1. Simulazione transitorio termico 2D	68
7.2. Transitorio termico per la configurazione SPM	69
7.3. Transitorio termico per la configurazione IPM	73
7.4. Transitorio termico per la configurazione IPM con nastro stretto	77
7.5. Conclusioni	79
8. Miglioramento della distribuzione di temperatura	81
8.1. Distribuzione della densità di corrente	82
8.2. Distribuzione della potenza indotta	83
8.3. Distribuzione della temperatura	85
8.4. Distribuzione della temperatura con nastro stretto	90
8.5. conclusioni	94
9. Prototipo	95
9.1. Geometria dei moduli	95
9.2. Struttura prototipo	97
10. Conclusioni	101
Ringraziamenti	103
Bibliografia	105

Capitolo 1

Introduzione

Nella produzione di nastri di alluminio dopo la fase di laminazione avviene la fase di ricottura (annealing) che ha lo scopo di ridurre gli stress interni migliorando così le caratteristiche meccaniche. Attualmente questo processo si realizza in forni a gas (Fig.1.1) o a resistenze elettriche che hanno rendimenti bassi, circa 50%. Un forno per l'annealing continuo deve essere in grado di adattarsi a nastri di diverse caratteristiche. Gli spessori possono variare tra 0,25mm e 3mm e larghezza tra 30 e 1500mm, inoltre può variare anche la lega del laminato.



Fig.1.1 Linea per il processo di annealing in continuo

Per migliorare il rendimento del processo si è ipotizzato di utilizzare il riscaldamento a induzione a flusso trasverso. Il riscaldamento nei sistemi a induzione a flusso trasverso di metalli non magnetici e a bassa resistività elettrica come l'alluminio raggiunge rendimenti elevati. I sistemi a flusso trasverso presentano però molte limitazioni e sono di difficile realizzazione. Ad esempio, la possibilità di riscaldare nastri di larghezza diversa è un problema che, nonostante siano state proposte diverse soluzioni nel seguito elencate, rimane un fattore limitante l'utilizzo di detta tecnologia.

Nei sistemi di riscaldamento a induzione tradizionali, gli induttori percorsi da corrente alternata, producono un campo d'induzione magnetica variabile che induce a sua volta delle correnti nel carico, che si riscalda per effetto joule.

Introduzione

È stato analizzato un sistema innovativo per il riscaldamento di nastri di alluminio, nel quale si utilizza il campo magnetico prodotto da magneti permanenti. Durante il processo di riscaldamento il nastro si muove a velocità costante attraverso il campo magnetico statico prodotto dai magneti permanenti. In questo modo il nastro è sottoposto ad una variazione del campo magnetico, che induce le correnti interne e quindi il riscaldamento per effetto joule. Il campo magnetico prodotto dai magneti è principalmente trasversale all'asse del nastro.

Le correnti indotte interagendo con il campo di induzione magnetico provocano delle forze dirette nel verso opposto alla velocità che tendono a rallentare il nastro. Per compensare questa forza vengono utilizzati dei motori che trascinano il nastro, in modo tale da mantenerne costante la velocità. In questo modo si trasforma l'energia meccanica erogata dal motore in calore all'interno del nastro.

Struttura della tesi

Capitolo 2: descrizione dei sistemi di riscaldamento a flusso longitudinale e a flusso trasverso, inoltre vengono descritti: il metodo agli elementi finiti e le principali caratteristiche dei magneti permanenti in commercio.

Capitolo 3: descrizione della geometria dei moduli e delle configurazioni analizzate.

Capitolo 4: studio analitico del problema magnetostatico, necessario per ottenere le dimensioni iniziali dei magneti.

Capitolo 5: soluzione numerica 2D tramite codice FEM per ottenere le dimensioni finali dei magneti. È stata analizzata la variazione della potenza indotta al variare dello spessore del nastro e la variazione del punto di lavoro dei magneti da vuoto a carico.

Capitolo 6: soluzione numerica 3D tramite codice FEM. È stata analizzata la variazione della distribuzione della potenza indotta nella larghezza del nastro al variare della velocità, dell'ampiezza del traferro e della larghezza del nastro.

Capitolo 7: soluzione numerica 2D del transitorio termico di riscaldamento, si è ottenuto il profilo della temperatura nella larghezza del nastro durante e a fine riscaldamento.

Capitolo 8: la distribuzione di temperatura a fine riscaldamento, per la configurazione a magneti superficiali (SPM), non è accettabile. Si è ipotizzato di inserire in serie ad ogni modulo SPM un modulo SPM modificato per migliorare la distribuzione di temperatura a fine riscaldamento.

Capitolo 9: descrizione del prototipo che è stato progettato per verificare i risultati ottenuti sperimentalmente.

Capitolo 2

Teoria

2.1 Riscaldamento a Induzione

Attualmente diversi processi di riscaldamento di materiali metallici (materiali elettricamente conduttori) utilizzano il riscaldamento a induzione, soprattutto quando è richiesto un accurato controllo delle distribuzioni di temperatura. Tramite degli induttori percorsi da corrente si genera un campo d'induzione variabile che induce delle correnti nel metallo. Le correnti indotte producono calore nel pezzo da scaldare grazie all'effetto joule. I vantaggi rispetto ad altre tipologie di riscaldamento, come i bruciatori a gas, sono:

- Produzione di calore interna al corpo da riscaldare, invece della trasmissione di calore attraverso la superficie. Questo permette di avere minori tempi di riscaldamento.
- Elevate densità di potenza specifica.
- Variando la geometria dell'induttore e la frequenza di alimentazione è possibile concentrare le sorgenti di calore in zone specifiche o nella totalità del corpo da riscaldare, a seconda del processo termico.
- Elevata efficienza energetica del processo, almeno per metalli con elevata resistività elettrica o quelli ferromagnetici.
- Costanza delle caratteristiche del prodotto finito, dovuto alla facile ripetibilità del processo.
- Eliminazione di emissioni inquinanti nel luogo dove avviene il processo termico.
- Possibilità di utilizzare fonti di energia pulite e rinnovabili.

Gli elementi principali di un impianto di riscaldamento a induzione sono: il convertitore di frequenza per avere una frequenza di alimentazione diversa da quella industriale, la batteria di condensatori per compensare la potenza reattiva impegnata, la bobina induttrice e il carico.

Teoria

2.1.1 Distribuzione delle correnti e delle potenze indotte

Il campo magnetico di eccitazione è prodotto da una bobina, di solito realizzata in tubo di rame al cui interno circola acqua per il raffreddamento e percorsa da corrente di intensità e frequenza opportune.

Si consideri una bobina induttrice, percorsa da corrente sinusoidale, attorno ad un cilindro massiccio di resistività e permeabilità costanti (Fig.2.1). Con l'ipotesi che il sistema di lunghezza l faccia parte di una porzione di una configurazione infinita.

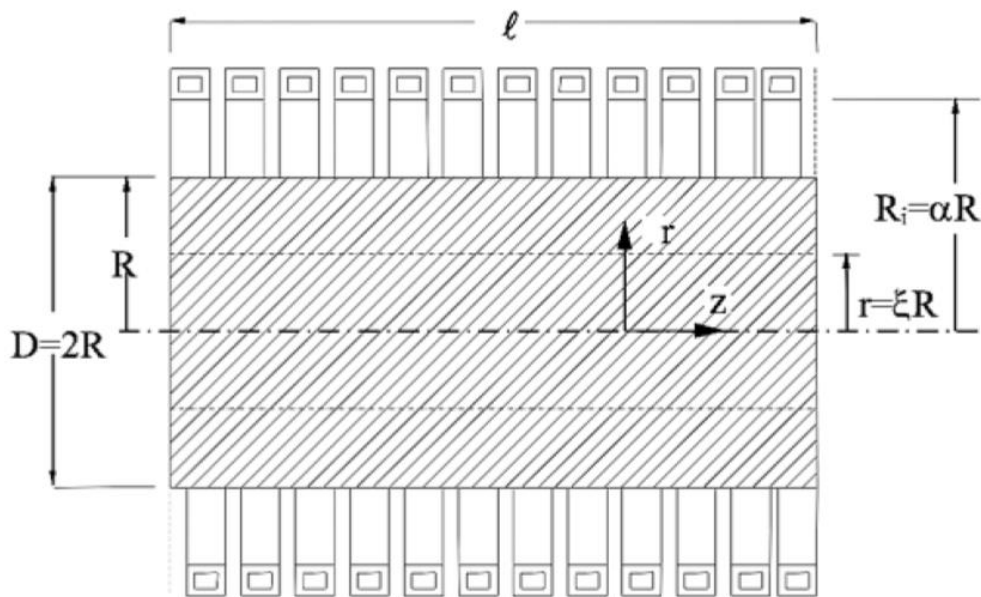


Fig.2.1 Sistema costituito da induttore e carico cilindrico

Dove:

- R, R_i sono rispettivamente il raggio esterno del cilindro e raggio interno della bobina induttrice [m]
- l è la lunghezza assiale della bobina e del cilindro
- N è il numero di spire della bobina
- I è il valore efficace della corrente che circola nella bobina [A]
- $\omega=2\pi f$ è la pulsazione della corrente
- f è la frequenza [Hz]
- ρ è la resistività del cilindro [Ωm]
- μ permeabilità magnetica relativa del cilindro
- μ_0 permeabilità magnetica del vuoto [H/m]

Teoria

Con le ipotesi fatte l'intensità del campo magnetico nello spazio compreso tra l'induttore e il cilindro ha direzione lungo l'asse z e intensità uguale a quella della bobina senza carico:

$$\dot{H}_0 = \frac{NI}{l}$$

Alimentando la bobina con una corrente sinusoidale e ipotizzando di poter trascurare le non linearità del sistema, i campi elettrici e magnetici possono essere espressi con fasori. Trascurando le correnti di spostamento le equazioni di Maxwell diventano:

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{H} = \frac{\dot{E}}{\rho} \\ \nabla \times \dot{E} = -j\omega\mu\mu_0\dot{H} \end{cases}$$

Utilizzando le coordinate cilindriche (r, φ, z) tenuto conto della geometria sono diverse da zero solo le componenti H_z di \vec{H} ed E_z di \vec{E} , perciò le equazioni diventano:

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi = -\rho \frac{d\dot{H}_z}{dr} & (2.1) \\ \frac{d^2\dot{H}_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{H}_z}{dr} - j \frac{\omega\mu\mu_0}{\rho} \dot{H}_z = 0 & (2.2) \end{cases}$$

La relazione (2.2) può essere scritta nella forma:

$$\frac{d^2\dot{H}_z}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{d\dot{H}_z}{d\xi} - jm^2\dot{H}_z = 0 \quad (2.3)$$

Con:

- $m = \frac{\sqrt{2}R}{\delta}$
- $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}}$ spessore di penetrazione [m]

La soluzione dell'equazione (2.3), introducendo le equazioni di Bessel, è:

$$\dot{H}_z = \dot{H}_0 \frac{ber(m\xi) + jbei(m\xi)}{ber(m) + jbei(m)}$$

Teoria

In figura 2.2 è riportato l'andamento del modulo del campo magnetico in funzione del raggio normalizzato per diversi valori di m . Il grafico mostra che le linee di campo si addensano sulla superficie del cilindro. Questo comportamento è dovuto alle correnti indotte nel cilindro che tendono ad "espellere" il campo ed è tanto più marcato quanto maggiore è m .

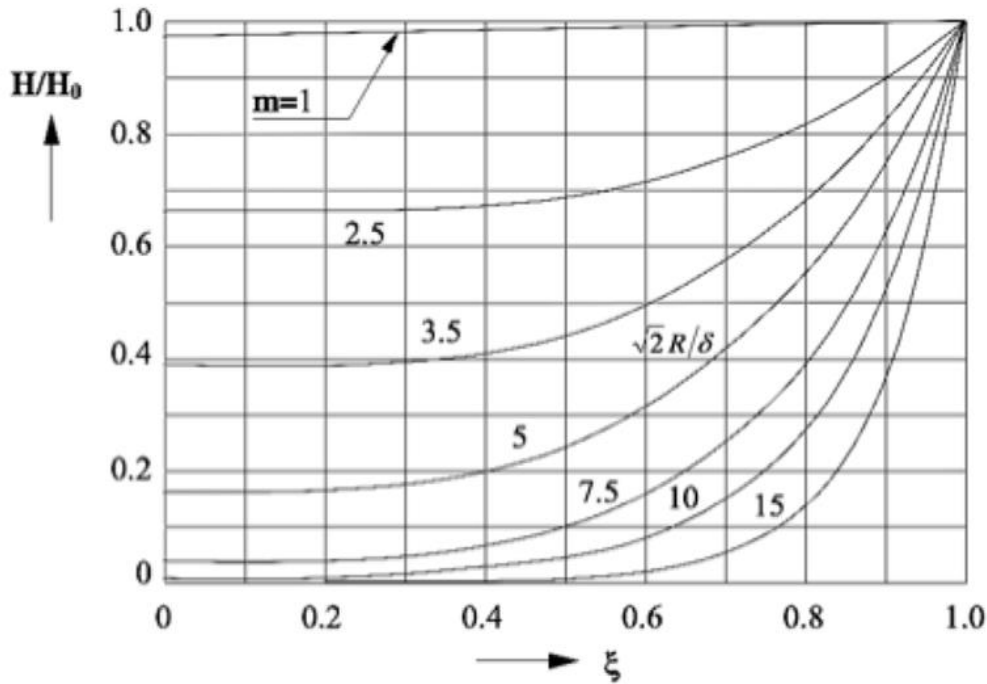


Fig.2.2 distribuzione lungo il raggio dell'intensità del campo magnetico

Si riscrive la relazione (2.2) nella forma:

$$\dot{E}_\varphi = -\rho \frac{d\dot{H}_z}{dr} = -\frac{\rho}{R} \frac{d\dot{H}_z}{d\xi}$$

La densità di corrente \dot{G} può essere calcolata come:

$$\dot{G} = \frac{\dot{E}_\varphi}{\rho} = -\frac{\dot{H}_0}{R} m \frac{ber'(m\xi) + jbei'(m\xi)}{ber(m) + jbei(m)}$$

Introducendo i parametri \mathcal{P} e \mathcal{Q} , riportati in figura 2.4, la densità di corrente sulla superficie del cilindro può essere scritta nella forma:

$$\dot{G}_0 = -\frac{\dot{H}_0}{R} m(\mathcal{P} + j\mathcal{Q})$$

Teoria

In figura 2.3 è riportato l'andamento del modulo del campo magnetico in funzione del raggio normalizzato per diversi valori di m .

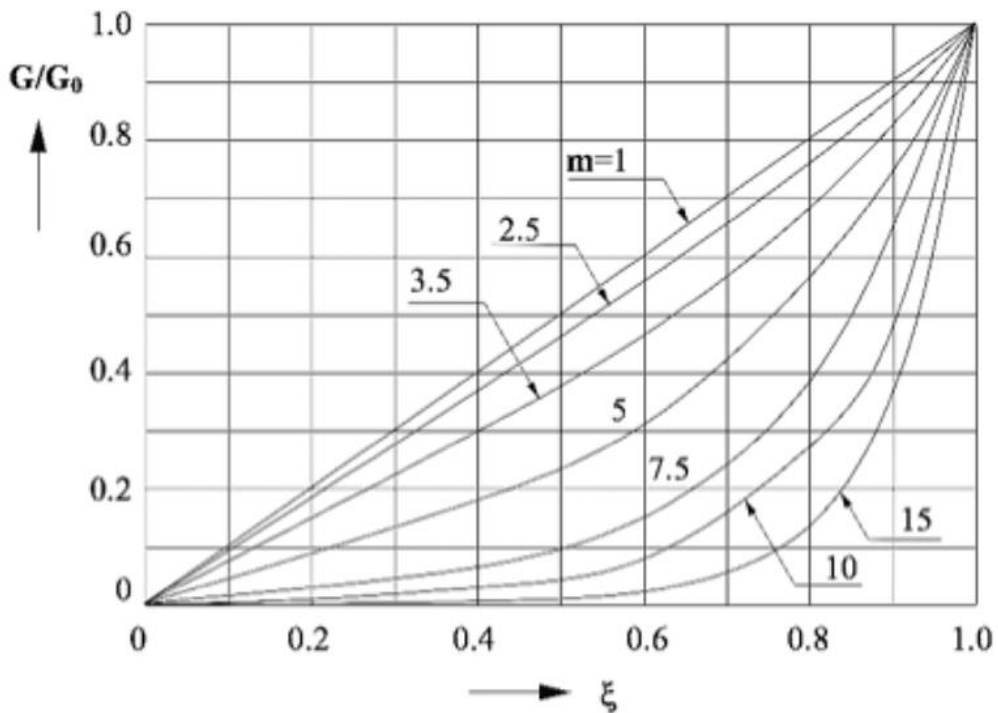


Fig.2.3 Distribuzione lungo il raggio dell'intensità del campo magnetico, riferiti al valore superficiale G_0 , per diversi valori di m

Osservazioni:

- La densità di corrente indotta si annulla in corrispondenza dell'asse del cilindro.
- Al crescere di m (al crescere della frequenza) la densità di corrente tende a concentrarsi sempre di più negli strati superficiali del cilindro.
- A parità di R e H_0 all'aumentare di m cresce il modulo di G_0 .
- Per frequenze "basse" (corrispondenti a $m \leq 1$) si ha un andamento lineare di G , per frequenze "elevate" (corrispondenti a $m \geq 12$) si ha un andamento che tende ad un esponentiale.
- Per modificare i valori e le distribuzioni delle correnti indotte si può agire sull'intensità del campo magnetico H_0 e sulla frequenza di alimentazione f

Teoria

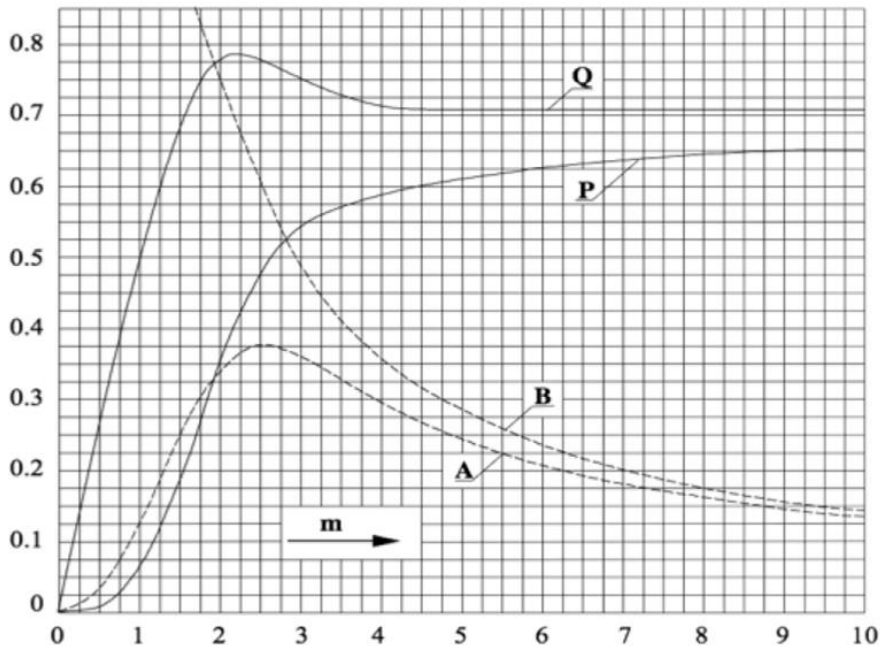


Fig.2.4 Andamento dei parametri $\mathcal{P}, \mathcal{Q}, A$ e B in funzione di m

Si possono ricavare, partendo dalla conoscenza delle distribuzioni delle densità di corrente, le potenze specifiche indotte per unità di volume w :

$$w = \rho G^2$$

$$w_0 = \rho G_0^2$$

Con:

- w potenza specifica indotta per unità di volume [W/m^3] in corrispondenza al raggio r
- w_0 valore di w in corrispondenza alla superficie del cilindro

risulta:

$$\frac{w}{w_0} = \frac{\text{ber}'^2(m\xi) + \text{bei}'^2(m\xi)}{\text{ber}'^2(m) + \text{bei}'^2(m)}$$

Con:

$$w_0 = -\rho \frac{\dot{H}_0^2}{R^2} m^2 (\mathcal{P}^2 + \mathcal{Q}^2)$$

In figura 2.5 è riportata la distribuzione della potenza specifica in funzione del raggio per diversi valori di m . Si nota che la potenza specifica non è uniforme all'interno del cilindro. Il riscaldamento a induzione a flusso longitudinale da luogo ad un riscaldamento differenziato e per valori di m elevati diventa quasi esclusivamente superficiale.

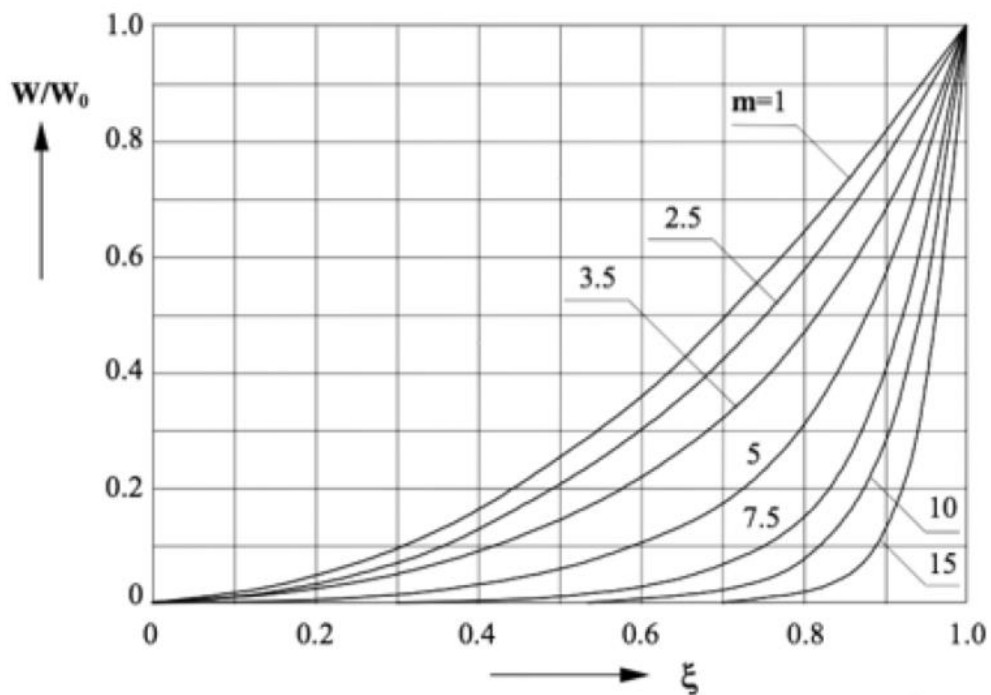


Fig. 2.5 Distribuzioni lungo il raggio della potenza specifica per unità di volume w riferiti al valore superficiale w_0 , per diversi valori di m

La potenza complessa trasmessa al cilindro mediante il campo elettromagnetico può essere calcolata come flusso attraverso la superficie esterna del cilindro del vettore di Poynting complesso, che è dato dal prodotto vettoriale del campo elettrico e del campo magnetico, tenuto conto della loro ortogonalità si ha:

$$P_c + jQ_c = -\dot{E}_0 \dot{H}_0 2\pi R l$$

Dalla quale si ricava:

$$P_c + jQ_c = H_0^2 \frac{\rho}{\delta} \sqrt{2} (\mathcal{P} + j\mathcal{Q}) 2\pi R l$$

Introducendo:

- $(A + jB) = \frac{2}{m} (\mathcal{P} + j\mathcal{Q})$ parametri riportati in fig. 2.4
- $x_{i0} = \omega N^2 \frac{\mu_0 \pi R^2 \alpha^2}{l}$ reattanza $[\Omega]$ della bobina induttrice in assenza del carico

Teoria

Si ha:

$$P_c + jQ_c = \frac{x_{i0}}{\alpha^2} \mu(A + jB)I^2$$

La resistenza del carico riportata ai morsetti dell'induttore è:

$$r'_c = \frac{x_{i0}}{\alpha^2} \mu A = N^2 \rho \frac{2\pi R}{l\delta} \sqrt{2\mathcal{P}}$$

Utilizzando un approccio simile la potenza messa in gioco nel volume occupato dall'induttore è:

$$P_i + jQ_i = H_0^2 \frac{\rho_i}{\delta_i} \sqrt{2}(A_i + jB_i) 2\pi R_i l_i$$

Dove i valori con pedice i sono grandezze riferite all'induttore.

La resistenza propria della bobina induttrice in corrente alternata è:

$$r_i = N^2 \rho_i \frac{2\pi R_i}{l_i \delta_i} A_i K_i$$

Con K_i coefficiente maggiore di uno che tiene conto del distanziamento assiale tra spira e spira.

Ora è possibile calcolare il rendimento elettrico del sistema induttore-carico che è il rapporto tra la potenza trasformata in calore nel corpo da riscaldare e la potenza assorbita dall'induttore. Risulta:

$$\eta_e = \frac{r'_c}{r_i + r'_c} = \frac{1}{1 + \frac{R_i l \delta A_i K_i}{R l_i \delta_i \sqrt{2\mathcal{P}}}} = \frac{1}{1 + \alpha \frac{l}{l_i} \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho \mu}} \frac{A_i K_i}{\sqrt{2\mathcal{P}}}}$$

Il rendimento dipende dalla frequenza di alimentazione e dalla geometria e dal materiale con cui sono costruiti l'induttore e il carico, attraverso i parametri:

- rapporto α tra il raggio della bobina e quello del carico e rapporto tra le rispettive lunghezze
- dalla resistività ρ_i della bobina induttrice
- dalla resistività ρ e dalla permeabilità relativa μ del carico
- dal prodotto $A_i K_i$ caratteristico della bobina induttrice
- dal coefficiente \mathcal{P} funzione di m

Teoria

Con induttori correttamente dimensionati e con valori di m sufficientemente elevati il rendimento può raggiungere il valore massimo:

$$\eta_{emax} = \frac{1}{1 + \alpha \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho\mu}}}$$

In fig. 2.6 è riportato il rendimento elettrico del sistema induttore-carico in funzione di m per diversi materiali. Si nota che il rendimento del sistema induttore-carico nel riscaldamento a flusso longitudinale dell'alluminio ha valori molto bassi, inferiori al 50%.

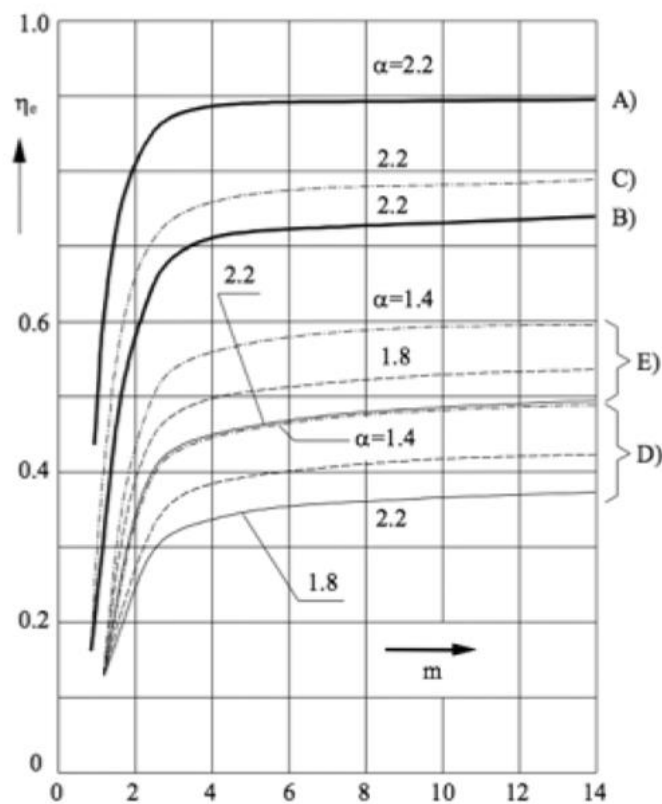


Fig. 2.6 Rendimento elettrico del sistema induttore-carico in funzione di m per: A acciaio fino a 800°C; B acciaio da 800 a 1200°C; C acciaio da 0 a 1200°C; D alluminio e sue leghe fino a 500°C e rame fino a 800°C; E ottone fino a 800°C

Per $m > 2,5$ il rendimento si stabilizza e non dipende più dalla frequenza, per valori di $m < 2,5$ il rendimento è molto basso.

2.1.2 Riscaldamento a flusso trasverso di nastri

Il riscaldamento con flusso longitudinale è utilizzato nel riscaldamento di nastri soprattutto in acciaio magnetico e la temperatura finale del processo è inferiore alla temperatura di Curie. Per nastri in acciaio con uno spessore di 0,2-1,2mm è possibile ottenere un rendimento del sistema induttore-carico molto elevato, circa 90%, utilizzando frequenze di 2-40kHz.

Con il riscaldamento a flusso longitudinale per avere un rendimento accettabile il rapporto tra lo spessore del nastro h e lo spessore di penetrazione δ deve essere maggiore di 3,5.

$$h > 3,5\delta$$

Lo spessore di penetrazione è dato da $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}}$. L'alluminio ha una permeabilità magnetica relativa unitaria, perciò per ottenere rendimenti del sistema induttore-carico accettabili, ma comunque bassi, si deve utilizzare una frequenza di alimentazione molto elevata (per nastri sottili anche dell'ordine dei MHz). L'alimentazione a frequenze elevate porta a delle perdite negli induttori per effetto pelle e nel sistema di alimentazione (inverter).

Per riscaldamento di nastri in materiale non magnetico si utilizzano sistemi di riscaldamento a flusso trasverso fig.2.7. Sono costituiti da due induttori affacciati, uno sopra e l'altro sotto il nastro. Il campo magnetico prodotto dagli induttori attraversa il nastro ed è trasversale al piano dove giace il nastro.

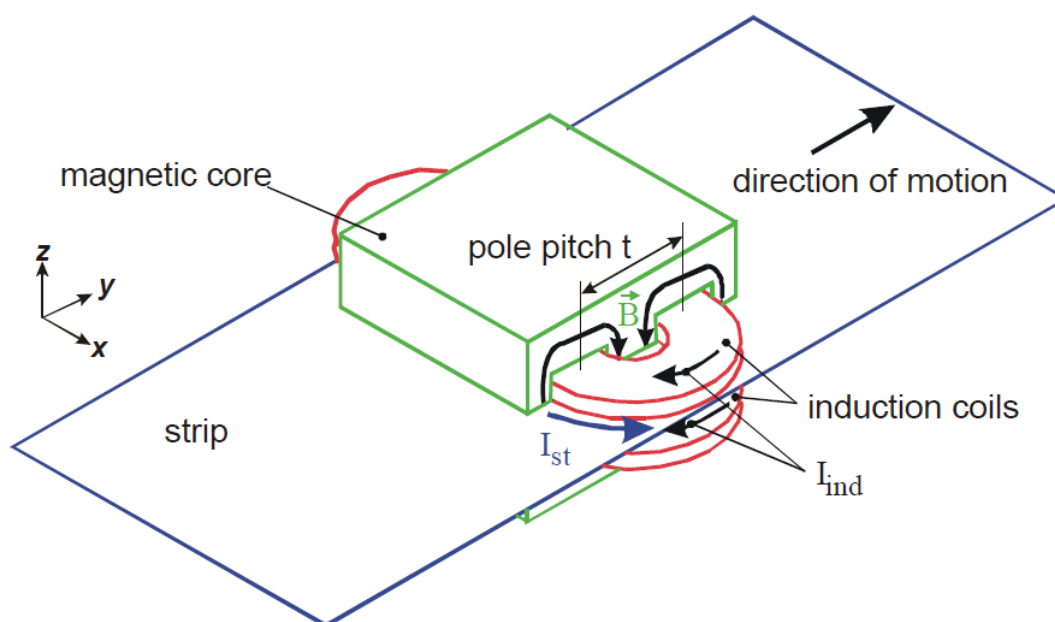


Fig. 2.7 Sistema di riscaldamento a flusso trasverso

Teoria

Il riscaldamento a flusso trasverso permette di ottenere elevati rendimenti utilizzando una frequenza inferiore rispetto ai sistemi a flusso longitudinale, questo vantaggio si accentua al diminuire dello spessore del nastro. L'utilizzo del riscaldamento a flusso trasverso è particolarmente efficace nel riscaldamento di nastri di altezza comparabile con lo spessore di penetrazione.

Il percorso delle correnti indotte nel nastro rispecchia la forma degli induttori. Se la larghezza degli induttori è maggiore della larghezza del nastro le correnti si concentrano in prossimità del nastro (dovendosi richiudere nel metallo), questo causa un surriscaldamento dei bordi. Se la larghezza degli induttori è inferiore alla larghezza del nastro le correnti indotte non raggiungono il bordo che rimane ad una temperatura inferiore rispetto alla zona interna. La distribuzione delle correnti indotte dipende anche dalla frequenza di alimentazione degli induttori, all'aumentare della frequenza la corrente indotta tende a concentrarsi maggiormente in prossimità degli induttori.

Gli svantaggi del riscaldamento a flusso trasverso sono:

- bassa flessibilità per un dato induttore di riscaldare nastri di diversa larghezza.
- progettazione degli induttori molto complessa, si devono utilizzare simulazioni 3D con molte variabili.

Si è cercato di risolvere il problema di ottenere un profilo di temperatura uniforme nella sezione del nastro a fine riscaldamento quando le dimensioni del carico variano. Le principali soluzioni sono:

- un metodo chiamato zone controlled induction heating (ZCIH) (fig.2.8) che consiste in diversi induttori concentrici percorsi da correnti di diversa ampiezza e frequenza. In questo modo, per ottenere una temperatura uniforme, al variare delle dimensioni del nastro variano le correnti di alimentazione.

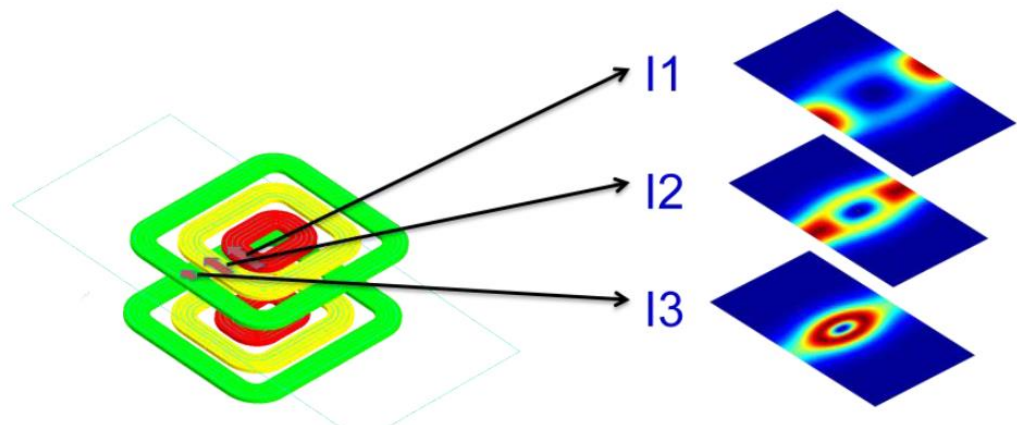


Fig. 2.8 Zone Controlled Induction Heating

2.2 Metodo agli elementi finiti FEM

Il metodo agli elementi finiti è il metodo più flessibile per la risoluzione di problemi con derivate parziali, utilizza interpolazioni spaziali valide in 1D, 2D e 3D che permettono di conoscere la soluzione approssimata non solo nei nodi, ma anche come varia in tutto il dominio. Il nome deriva dal fatto che il dominio viene discretizzato in elementi che occupano regioni finite dello spazio, il problema viene risolto in ogni elemento e la soluzione totale viene ricostruita rispettando la geometria.

L'elemento finito è una qualunque entità geometrica chiusa in grado di coprire una porzione di spazio opportuna per la dimensionalità del problema che si sta esaminando. In 1D l'elemento finito è un segmento, in 2D sono delle aree (triangoli o quadrilateri), in 3D sono dei volumi. Il dominio del problema viene discretizzato in elementi (il reticolo di elementi viene chiamato mesh) che devono soddisfare alcune regole:

- Gli elementi non possono attraversare le interfacce.
- L'intero dominio deve essere ricoperto di elementi
- Gli elementi non si possono intersecare
- Due elementi finiti possono avere in comune: niente o un nodo o un intero lato o un'intera faccia ma non possono avere in comune un pezzo di lato o parte di una faccia

A seconda del problema da risolvere il software che si basano su FEM utilizzano diverse formulazioni.

2.2.1 Formulazioni del problema magnetostatico

Considerando il problema magnetico quasi statico le equazioni di maxwell sono:

$$\begin{cases} \nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \bar{H} = \bar{J} \\ \nabla \cdot \bar{B} = 0 \\ \nabla \cdot \bar{J} = 0 \end{cases}$$

Dove con $\nabla \cdot$ si è indicato l'operatore divergenza e con $\nabla \times$ l'operatore rotore. Siccome $\nabla \cdot \bar{B} = 0$ se il dominio Ω è semplicemente connesso per superfici l'induzione magnetica può essere scritta come:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$$

Teoria

Sostituendo nell'equazione del campo elettrico si ottiene:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \nabla \times \bar{A}}{\partial t} = -\nabla \times \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}$$

Ottenendo così:

$$\nabla \times \left(\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) = 0$$

$\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}$ è irrotazionale, perciò se il dominio Ω è semplicemente connesso per le linee è conservativo e si può introdurre il potenziale scalare.

$$\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = -\nabla V$$

Può essere riscritto nella forma:

$$\bar{E} = -\nabla V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}$$

Il campo elettrico è costituito da due parti: una dovuta al gradiente del potenziale scalare e l'altra dovuta alla variazione del vettore potenziale magnetico.

Sostituendo nell'equazione $\nabla \times \bar{H} = \bar{J}$ la relazione costitutiva $\bar{H} = \nu \bar{B}$ e $\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$ si ottiene:

$$\nabla \times \nu \nabla \times \bar{A} = \bar{J}$$

Si deve introdurre un'altra relazione costitutiva $\bar{J} = \sigma \bar{E}$. La densità di corrente \bar{J} è costituita da due parti: una dovuta alle sorgenti \bar{J}_{source} e l'altra indotta \bar{J}_{eddy} , sostituendo si ricava:

$$\nabla \times \nu \nabla \times \bar{A} = \bar{J}_{source} + \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right)$$

L'equazione $\nabla \cdot \bar{J} = 0$ può essere scritta nella forma:

$$\nabla \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) = 0$$

Teoria

In conclusione si hanno quattro incognite A_x, A_y, A_z e V un'equazione vettoriale e un'equazione scalare:

$$\begin{cases} \nabla \times \nu \nabla \times \bar{A} + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = \bar{J}_{source} \\ \nabla \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) = 0 \end{cases}$$

2.2.2 Formulazioni del problema termico

L'equazione termica esprime che:

variazione di energia interna = produzione di potenza – flusso di potenza uscente dalla superficie

analiticamente si ha:

$$\frac{d}{dt} \int_V \bar{w}_{th} dV = \int_V \bar{p}_{th} dV - \int_S \bar{q} d\bar{s}$$

Dove:

- $\bar{w}_{th} = \rho c_p T$ è l'energia interna per unità di volume
- $q = -K \nabla T$ è il flusso di potenza uscente per unità di superficie

Con:

- $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ è la densità
- $c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ è il calore specifico
- $T [K]$ è la temperatura
- $K \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ coefficiente di scambio termico globale

$$\int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_V \bar{p}_{th} dV - \int_S K \nabla T d\bar{s}$$

Applicando il teorema della divergenza

$$\int_V \left(\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \bar{p}_{th} - \nabla \cdot K \nabla T \right) dV = 0$$

Ottenendo:

$$-\nabla \cdot K \nabla T + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{p}_{th}$$

2.2.3 Gestione delle traslazioni

In Flux per definire le parti in movimento da quelle fisse si devono definire i mechanical set per le varie regioni. Alle regioni fisse si associa il mechanical set Fixed, per le parti in movimento il mechanical set mobile e per le regioni comprese tra le parti fisse e quelle in movimento si assegna il mechanical set compressible. Nelle simulazioni è stata imposta la velocità costante. Ad ogni step della simulazione la parte in movimento si sposta di una quantità $\Delta x = v \cdot \Delta t$ (con: v [m/s] è la velocità, Δt [s] è lo step size della simulazione) e viene rifatta la mesh solo nella zona compressible, mentre rimane inalterata nella zona fissa in quella mobile. Nel problema 2D la zona compressible è divisa in due parti: una composta da due strisce laterali alla parte in movimento e l'altra sopra e sotto la parte in movimento come riportato in fig. 2.10.

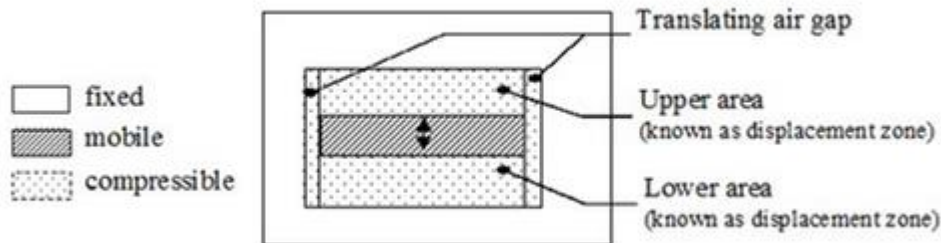


Fig. 2.11 Zona fissa, mobile e compressibile per la gestione delle parti in movimento.

Melle due zone la mesh è diversa, nelle strisce laterali la mesh deve essere costituita da elementi triangolari (possibilmente triangoli equilateri) e nella zona sopra e sotto la parte in movimento la mesh deve essere costituita da elementi rettangolari.

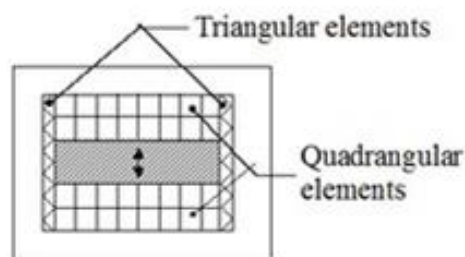


Fig. 2.12 Mesh nella zona compressibile

2.2.4 Metodi di risoluzione

La risoluzione può avvenire tramite due approcci equivalenti: approccio variazionale e approccio ai residui pesati. Si rinuncia a trovare la soluzione esatta, ma si trova una funzione data dalla sommatoria delle varie funzioni interpolanti che più si avvicina alla soluzione reale.

Per poter scrivere l'approccio variazionale si deve avere un funzionale da minimizzare, di solito un funzionale energia. Ad esempio in un caso elettrostatico tra tutti i campi elettrici che ci possono essere si instaura quello che rende minimo il funzionale energia.

Con l'approccio ai residui pesati è sufficiente conoscere l'equazione differenziale che descrive il problema. Si ha una generica equazione a derivate parziali indicata con $f=0$ se il dominio è semplicemente connesso per le superfici, si risolve il problema equivalente che è più semplice da risolvere $\int w f dv = 0 \quad \forall w$ dove w è la funzione peso

Questi due approcci, se applicati allo stesso problema, permettono di ottenere lo stesso sistema di equazioni algebriche lineari. Per la risoluzione dei sistemi algebrici sparsi di grandi dimensioni si utilizzano metodi iterativi come il metodo del gradiente coniugato.

2.3 Magneti permanenti

I magneti permanenti lavorano nel II quadrante del piano B-H. In Fig.2.13 è riportato il ciclo d'isteresi.

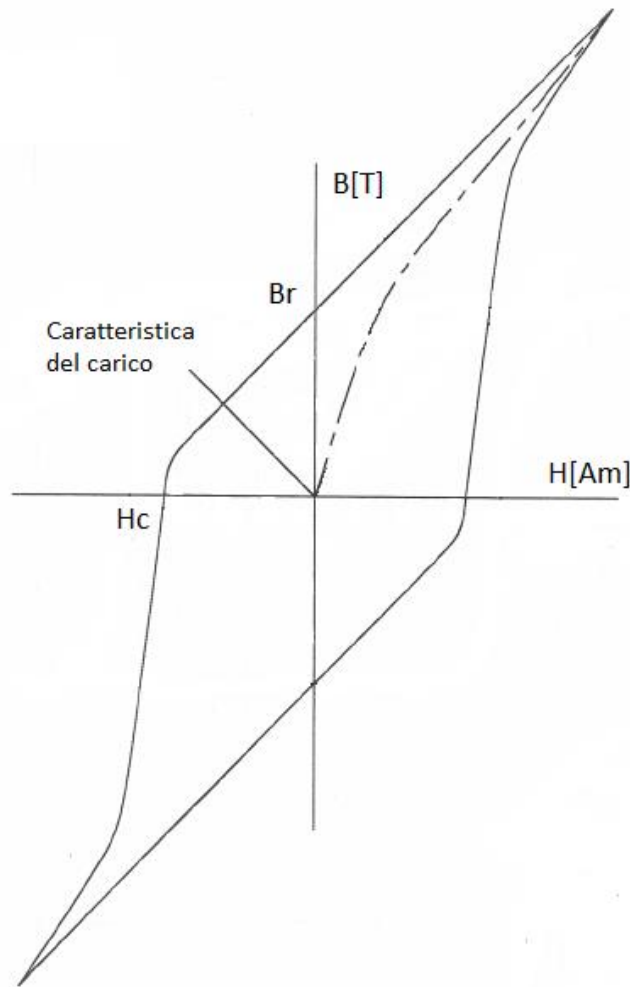


Fig. 2.13 Ciclo d'isteresi

I parametri principali sono:

- Induzione residua B_r : è il valore del campo d'induzione B che il materiale conserva quando, dopo aver raggiunto la saturazione, si riporta a zero l'intensità del campo magnetico H.
- Campo coercitivo H_c : rappresenta l'intensità del campo magnetico necessaria ad annullare l'induzione.

I magneti permanenti sono realizzati in materiali magneticamente duri che sono caratterizzati da un ciclo d'isteresi molto più largo rispetto ai materiali magneticamente dolci. I materiali magneticamente duri presentano campi coercitivi di alcune centinaia di kA/m e un'induzione residua poco inferiore a quella raggiunta nella zona di saturazione.

Teoria

Le tipologie di materiali maggiormente utilizzate per i magneti permanenti sono:

- Ferriti dure: conosciuti anche con il nome ceramici, sono i più economici e sono costituiti da ossidi di ferro con l'aggiunta di Ba o Sr. Hanno un elevato campo coercitivo e un basso valore di induzione residua
- AlNiCo: sono costituiti principalmente da Al, Ni, Co e Fe. Hanno un'induzione residua elevata, stabilità nel tempo elevata, bassa sensibilità alla variazione di temperatura, però hanno un campo coercitivo basso.
- SmCo: le composizioni più comuni sono SmCo_5 e $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Sono resistenti alla corrosione, hanno elevati valori di campo coercitivo e di induzione residua, hanno un buon comportamento al variare della temperatura però sono molto costosi.
- NdFeBo: sono i magneti con le prestazioni più elevate, però hanno una bassa resistenza alla temperatura e alla corrosione

Il campo coercitivo, l'induzione residua e il massimo prodotto BH per i magneti maggiormente utilizzati sono riportati in Tabella 2.1

Tabella 2.1 Caratteristiche principali dei magneti

Materiale	Hc [kA/m]	Br [T]	Prodotto BH Massimo [kJ/m ³]
Alnico 220	80	0,62	15
Alnico 500	50	1,2	36
Ferrite Ba ($\text{BaO-6Fe}_2\text{O}_3$)	190	0,39	28
Ferrite Sr ($\text{SrO-6Fe}_2\text{O}_3$)	260	0,34	23
Samario Cobalto (SmCo_5)	650-700	0,9	160
Samario Cobalto ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$)	720	1,1	190-220
Neodimio ferro boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)	800	1,3	290

I magneti permanenti subiscono delle variazioni reversibili al variare della temperatura, si ha una variazione di Br e Hc che però ritornano ai valori iniziali ritornando al valore iniziale di temperatura. Le variazioni reversibili sono descritte dal coefficiente di temperatura Tc. Il Tc per Br rappresenta la variazione percentuale di Br all'aumentare di un grado centigrado della temperatura %Br/°C. Il Tc per Hc rappresenta la variazione percentuale di Hc all'aumentare di un grado centigrado della temperatura %Hc/°C. Nella Tabella 2.2 sono riportati i coefficienti di temperatura per le varie tipologie di magneti permanenti.

Teoria

Tabella 2.2 Coefficiente di temperatura per Br e per Hc

Materiale	Tc di Br [%/°C]	Tc di Hc [%/°C]
NdFeBo	-0,11	-0,60
Samario Cobalto	-0,03	-0,30
Alnico	-0,02	+0,01
Ferrite	-0,018	+0,30

Ad elevate temperature i domini magnetici perdono la loro orientazione e si dispongono casualmente, in queste condizioni i magneti si smagnetizzano e le proprietà magnetiche non sono recuperabili ritornando alla temperatura iniziale. Tcurie è la temperatura oltre la quale si ha la completa smagnetizzazione. Tmax è la massima temperatura di lavoro. Nella Tab.2.3 sono riportate la temperatura di curie e quella massima di lavoro per le varie tipologie di magneti permanenti.

Tabella 2.3 Temperatura di Curie e massima di lavoro

Materiale	Tcurie [°C]	Tmax [°C]
NdFeBo	310	150
Samario Cobalto	750	300
Alnico	860	540
Ferrite	460	300

2.3.1 Scelta dei magneti permanenti

Per il riscaldamento di nastri d'alluminio con magneti permanenti si è deciso di utilizzare magneti in Samario-Cobalto. È stata fatta questa scelta perché il SmCo ha un elevato campo coercitivo, un'elevata induzione residua e un'elevata energia massima per unità di volume. Inoltre il SmCo ha una temperatura massima di lavoro elevata e un coefficiente di temperatura piccolo, questi due parametri sono molto importanti perché i magneti si troveranno nelle vicinanze del nastro che è ad una elevata temperatura. Il NdFeB è stato scartato perché ha temperature di lavoro troppo basse.

Capitolo 3

Geometria

Il campo di induzione magnetico costante, nel quale scorrerà il nastro, è generato da moduli costituiti da magneti permanenti e da materiale ferromagnetico. Sono state considerate tre soluzioni che possono essere inserite in tre categorie:

1. Magneti superficiali
2. Magneti interni
3. Magneti incassati

Partendo dalle configurazioni iniziali tramite un processo di ottimizzazione si sono ottenute le configurazioni finali. Il processo di ottimizzazione è stato fatto tramite una successione di prove numeriche con flux 2D nello scenario di riferimento (riportato nella tabella 3.1). Le prove sono state fatte a parità di quantità di magneti, si è osservato come varia la potenza indotta sul nastro al variare dei vari parametri della geometria. Gli obiettivi del processo di ottimizzazione sono i seguenti:

- Massimizzare la potenza indotta nel nastro (utilizzando la stessa quantità di magneti permanenti).
- Minimizzare gli ingombri, per il fatto che la macchina finale sarà costituita da molti moduli montati in serie e per ridurre le dimensioni finali della macchina è necessario ridurre le dimensioni dei singoli moduli.

Tabella 3.1 Dati dello scenario base

Parametro	Quantità	Unità di misura
Velocità nastro	10	m/s
Spessore nastro	1e-3	m
Traferro	0,01	m
SmCo campo magnetico coercitivo Hc	7e5	A/m
SmCo induzione residua Br	1,01	T
Resistività alluminio	3e-8	Ω m
Permeabilità magnetica relativa ferro	1000	-

3.1 Configurazione a magneti superficiali SPM

In questa configurazione (Fig. 3.1) (simile a quella dei motori a magneti permanenti superficiali SPM) i magneti sono montati sulla superficie del concentratore di flusso e dall'altro lato del nastro d'alluminio è posto il back-iron che ha il compito di diminuire la riluttanza del circuito magnetico e di concentrare il flusso sotto le espansioni polari. Il concentratore di flusso superiore e il back-iron possono essere costruiti in materiale ferromagnetico massiccio, perché a regime è sottoposto ad un campo magnetico continuo che non crea perdite per isteresi o per correnti indotte. Migliorando la geometria si ha un aumento della potenza indotta del 5%

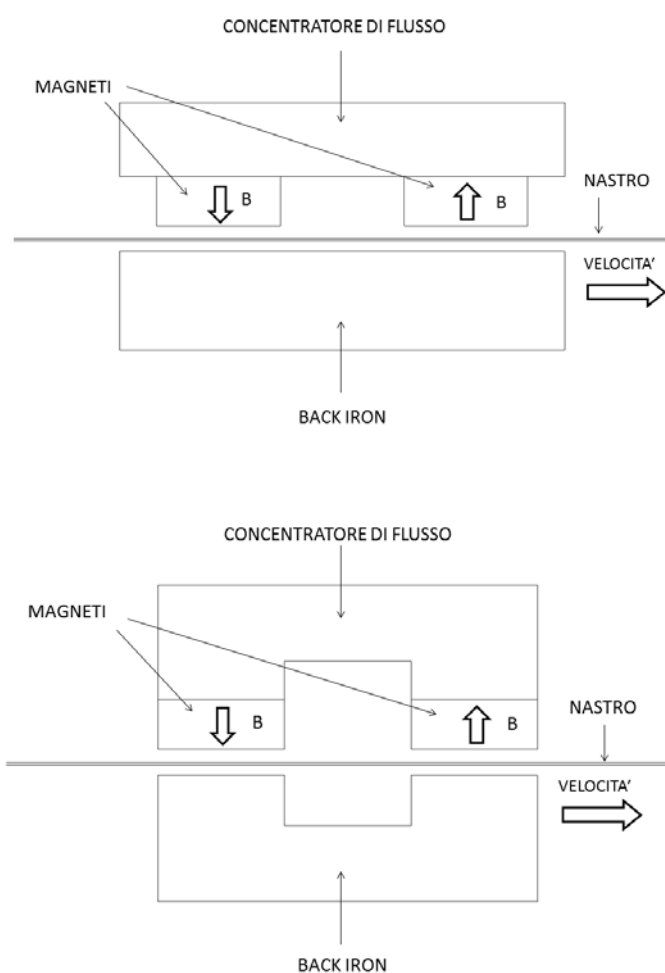


Fig. 3.1 Configurazione SPM iniziale sopra e ottimizzata sotto.

3.2 Configurazione a magnete interno IPM

In questa configurazione (Fig. 3.2) (simile a quella dei motori a magneti permanenti interni IPM) il magnete è montato all'interno del concentratore di flusso e dall'altro lato del nastro d'alluminio è posto il back-iron che ha il compito di diminuire la riluttanza del circuito magnetico e di concentrare il flusso sotto le espansioni polari. Anche per questa configurazione le parti in ferro sono in materiale ferromagnetico massiccio. Migliorando la geometria si ha un aumento della potenza indotta del 5%.

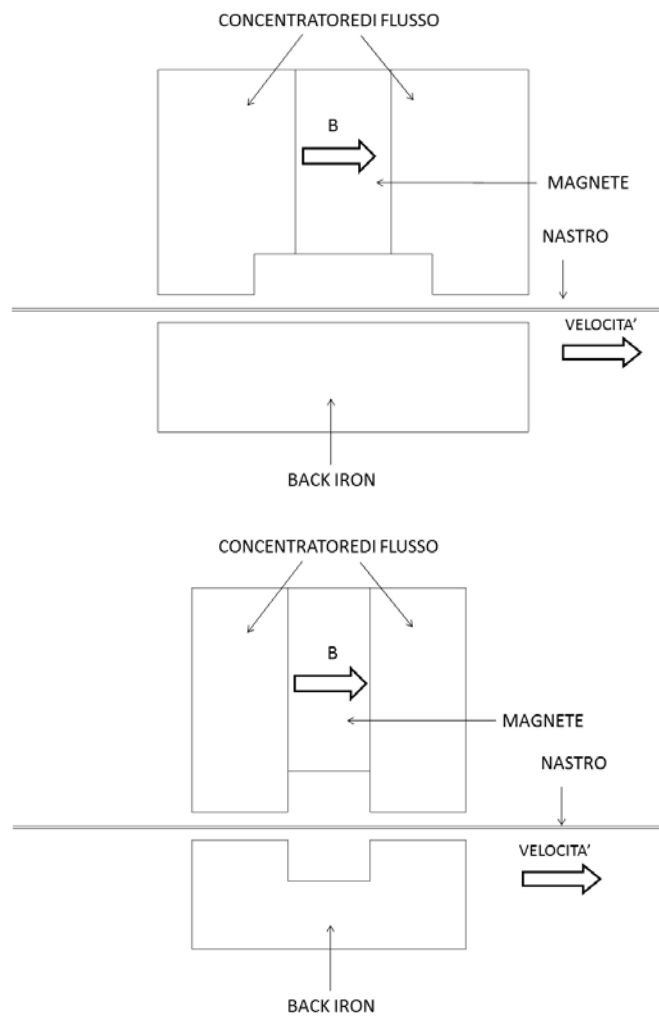


Fig. 3.2 Configurazione IPM iniziale a sopra e ottimizzata sotto

3.3 Configurazione a magneti incassati

In questa configurazione (Fig. 3.3) i magneti sono incassati nel concentratore di flusso superiore, dall'altro lato del nastro d'alluminio è presente il back-iron con il compito di diminuire la riluttanza del circuito magnetico. Anche per questa configurazione le parti in ferro sono in materiale ferromagnetico massiccio.

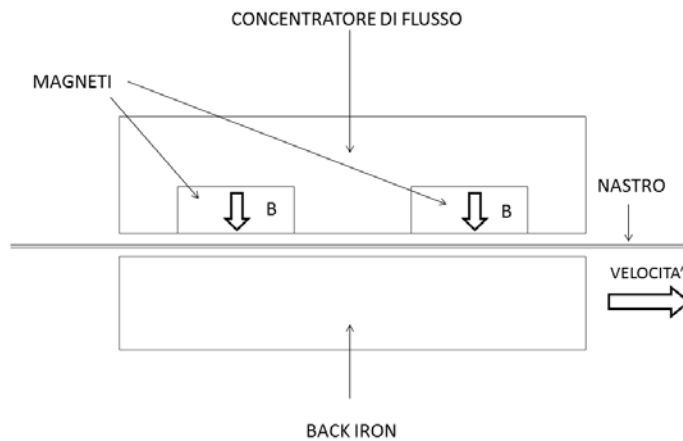


Fig.3.3 Configurazione con magneti incassati

Questa configurazione è stata abbandonata perché a parità della quantità di magneti la potenza indotta nel nastro di alluminio è molto inferiore rispetto alla configurazione a magneti superficiali. Dalle simulazioni risulta una diminuzione della potenza indotta del 34% a parità di magneti passando dalla configurazione SPM a quella con magneti incassati. La configurazione a magneti incassati è meno efficace perché si hanno troppi flussi dispersi, vale a dire flussi che si richiudono nel ferro senza passare dal traferro (Fig. 3.4).

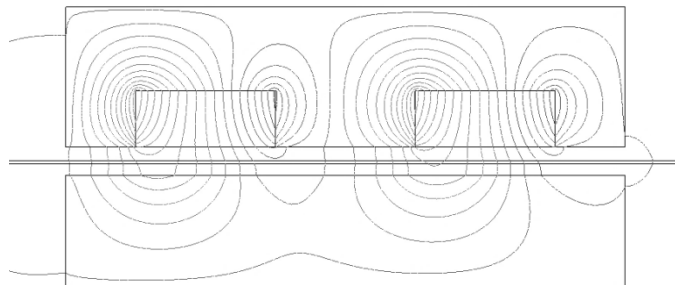


Fig. 3.4 Linee di flusso del campo magnetico per la configurazione a magneti incassati nel funzionamento a carico.

Capitolo 4

Analisi Magnetostatica

L'analisi magnetostatica ha lo scopo di fornire la geometria di partenza dei magneti, nella fase successiva (analisi numerica 2D) si potrà variare la geometria per ottimizzare il funzionamento a carico. La geometria del magnete deve variare in modo tale da farlo lavorare nel suo punto di lavoro ottimo (fig. 4.1) cioè il punto in cui si ha il prodotto $B \cdot H$ massimo che permette di sfruttare al massimo il magnete.

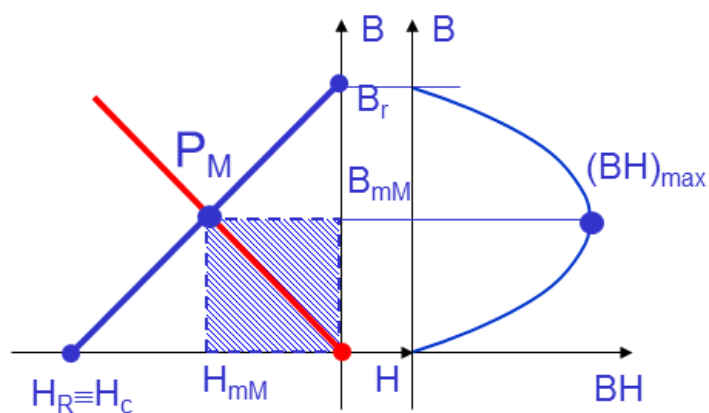


Fig. 4.1 punto di lavoro ottimo

Come mostrato in fig. 4.2 il punto di lavoro varia al variare dello spessore del magnete, diminuendo lo spessore si passa dal punto P al punto P' .

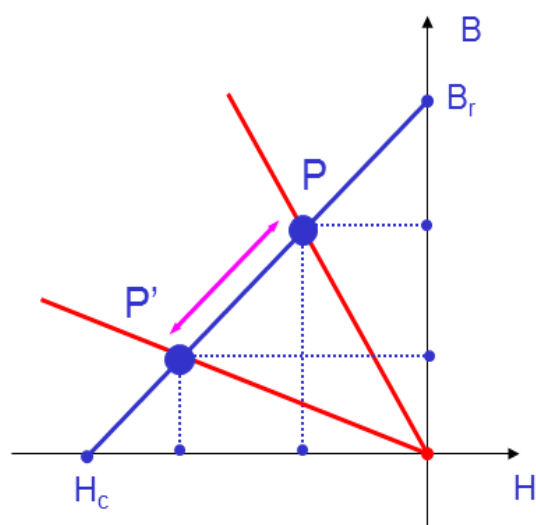


Fig. 4.2 Variazione punto di lavoro con traferro costante variando lo spessore del magnete

Analisi Magnetostatica

Per entrambe le configurazioni, magneti interni e magneti superficiali, è stato fatto il calcolo magnetostatico.

4.1 Calcolo magnetostatico per configurazione SPM

Nella figura 4.3 è riportata la geometria della configurazione a magneti superficiali.

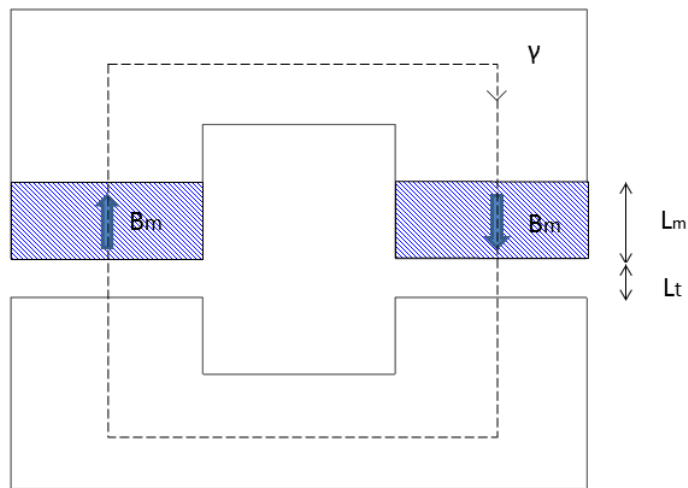


Fig. 4.3 Configurazione con magneti superficiali

Si considera l'intero circuito magnetico come un tubo di flusso per B .

Il flusso attraverso una generica sezione del magnete, del ferro e del traferro è costante. Si considera la linea chiusa γ che costituisce l'asse del circuito magnetico.

Si indica rispettivamente con B_m , B_f , B_t i valori medi nel magnete, nel ferro e nel traferro della componente del campo di induzione lungo γ e con S_m , S_f , S_t la sezione del magnete, del ferro e del traferro.

Si ha dunque:

$$B_m \cdot S_m = B_f \cdot S_f = B_t \cdot S_t$$

Analisi Magnetostatica

Il percorso γ non concatena nessuna corrente perciò la circuitazione di H lungo la linea γ è nulla

$$\oint_{\gamma} H \cdot t \, dl = \int_{\gamma_m} H \cdot t \, dl + \int_{\gamma_{fe}} H \cdot t \, dl + \int_{\gamma_t} H \cdot t \, dl$$
$$0 = H_m \cdot 2L_m + H_f L_f + H_t \cdot 2L_t$$

Dove si è indicato con H_m, H_f, H_t i valori medi del campo magnetico H lungo γ e con L_m, L_f, L_t la lunghezza dei tratti del percorso γ che sono nel magnete, nel ferro e nel traferro.

Dato che il ferro ha una permeabilità magnetica relativa molto alta (non raggiunge la zona di saturazione) la caduta di tensione magnetica nel ferro $H_f L_f$ è trascurabile rispetto a quella nel traferro.

Si ottiene il sistema:

$$\begin{cases} H_m \cdot 2L_m + H_t \cdot 2L_t = 0 \\ B_m \cdot S_m = B_f \cdot S_f = B_t \cdot S_t \end{cases} \quad (4.1)$$

A cui vanno aggiunte le equazioni dei materiali

$$\begin{cases} B_m = B_r + \mu_0 \cdot \mu_r H_m \\ B_t = \mu_0 H_t \end{cases}$$

Dalla relazioni appena scritte si può notare che modificando la lunghezza del magnete si varia il suo punto di lavoro, come evidenziato in Fig. 4.2.

Si deve scegliere, per un valore di L_t fissato, la lunghezza L_m in modo tale che il magnete lavori nel punto per il quale si ha il prodotto $B \cdot H$ massimo. I valori di B_m e H_m di tale punto solitamente vengono forniti dal costruttore e li indico rispettivamente con B_{mM} e H_{mM} .

Se i valori di B_{mM} e H_{mM} non sono noti ma è stato fornito il valore del prodotto $B \cdot H$ massimo essi possono essere calcolati risolvendo il sistema in due equazioni e due incognite:

$$\begin{cases} B_{mM} \cdot H_{mM} = \text{Valore} \\ B_{mM} = B_r + \mu_0 \cdot \mu_r H_{mM} \end{cases}$$

Risolvendo il sistema (4.1) con $B_m = B_{mM}$ e $H_m = H_{mM}$ si ottiene:

$$L_m = -\frac{B_{mM}}{H_{mM}} \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{S_m}{S_t} \cdot L_t \quad (4.2)$$

Analisi Magnetostatica

Si possono calcolare le grandezze a traferro:

$$\begin{cases} H_t = -\frac{H_{mM} \cdot L_m}{L_t} \\ B_t = \mu_0 \cdot H_t \end{cases} \quad (4.3)$$

Se come magnete permanente si utilizza SmCo le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 4.1.

Tabella 4.1 Caratteristiche del magnete

Grandezza	Quantità
Induzione residua	1 T
Permeabilità magnetica relativa	1,06
Campo coercitivo	700 kA/m
Campo magnetico del punto di lavoro ottimo	350 kA/m
Campo di induzione nel punto di lavoro ottimo	0,53 T

Con un traferro di 10mm utilizzando la relazione (4.2) ed il sistema (4.3) si ottiene la lunghezza del magnete, il campo magnetico a traferro e il campo di induzione a traferro che sono riportati nella tabella 4.2.

Tabella 4.2 Risultati dell'analisi magnetostatica

Grandezza	Quantità
Lunghezza del magnete	12mm
Campo magnetico a traferro	420 kA/m
Campo di induzione a traferro	0,53 T

Si è riportato il valore del campo di indizione e del campo magnetico nel magnete Fig. 4.4 e nel traferro Fig4.5, in condizioni magnetostatiche.

Analisi Magnetostatica

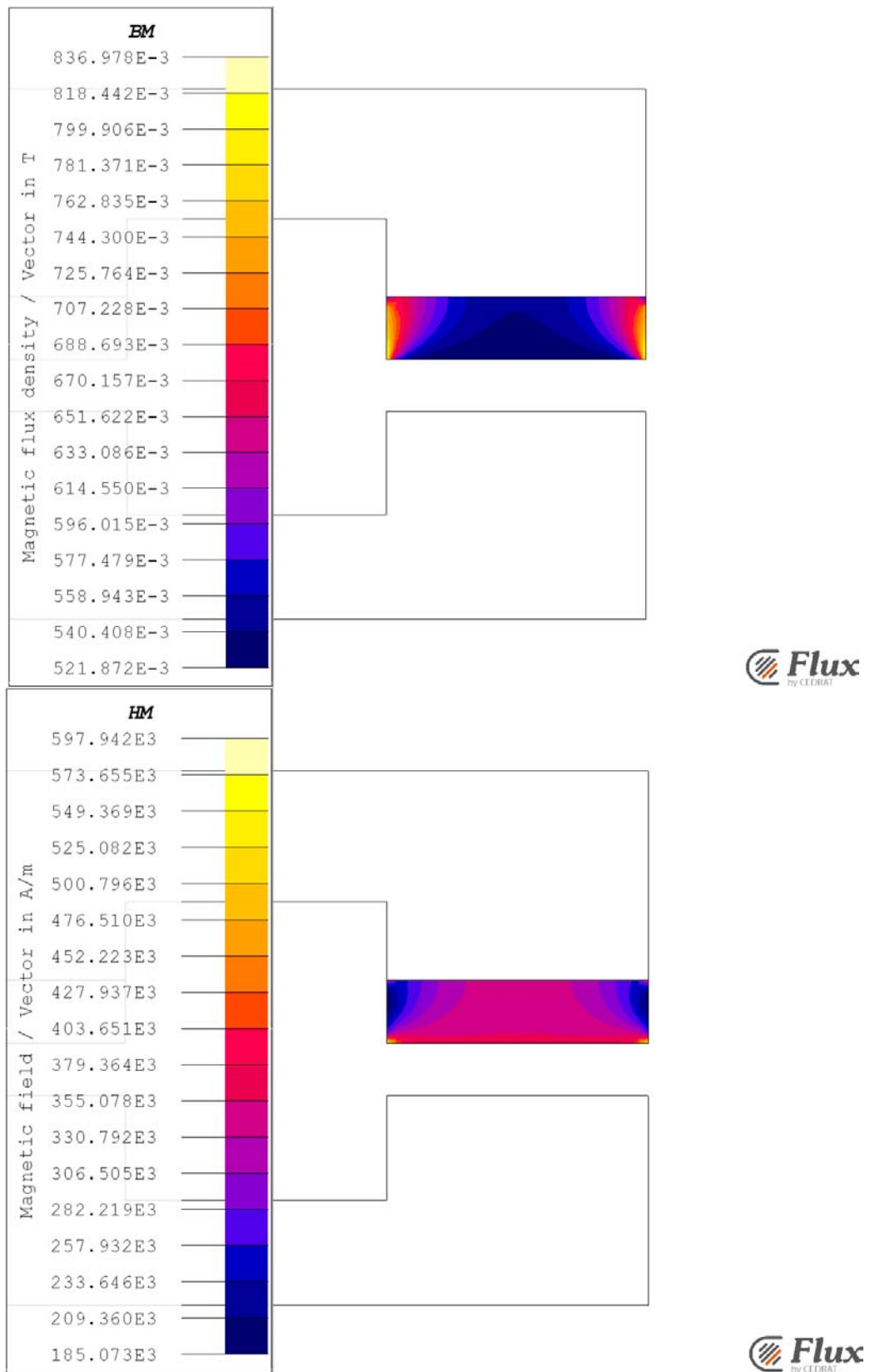


Fig. 4.4 Campo di induzione nel magnete sopra e campo magnetico nel magnete sotto, in condizioni magnetostatiche.

Analisi Magnetostatica

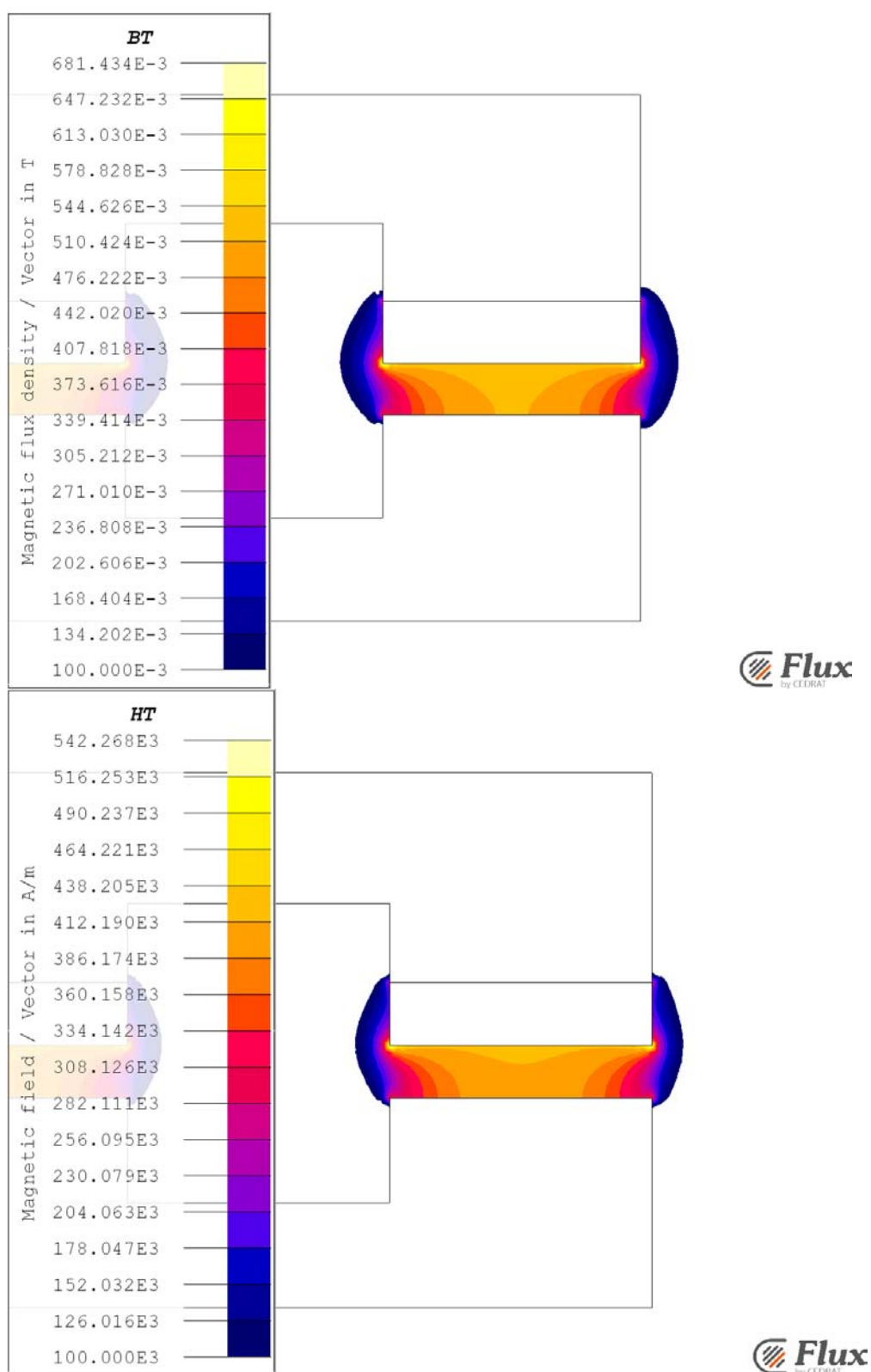


Fig. 4.5 Campo di induzione a traferro sopra e campo magnetico a traferro sotto, in condizioni magnetostatiche.

4.2 Calcolo magnetostatico per la configurazione IPM

Nella figura 4.3 è riportata la geometria della configurazione a magnete interno.

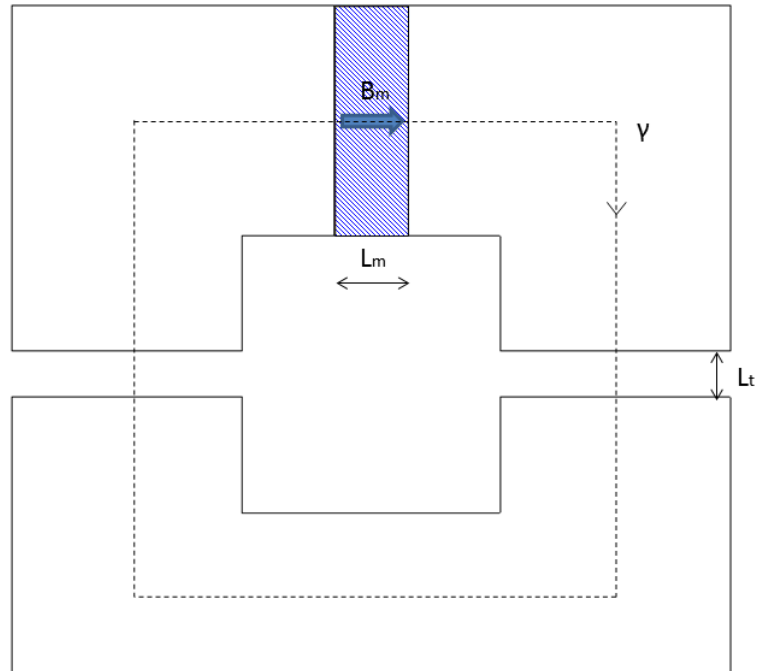


Fig. 4.6 Configurazione con magnete interno

Se per la configurazione a magneti interni si fanno le stesse considerazioni fatte per la configurazione a magneti superficiali si ottiene:

$$\begin{cases} H_m \cdot L_m + H_t \cdot 2L_t = 0 \\ B_m \cdot S_m = B_f \cdot S_f = B_t \cdot S_t \end{cases}$$

Da cui si ricava:

$$L_m = -\frac{B_{mM}}{H_{mM}} \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{S_m}{S_t} \cdot 2L_t$$

Però l'ipotesi di considerare l'intero circuito magnetico come un tubo di flusso per B non si può ritenere vera per questa configurazione perché i flussi dispersi che si richiudono in aria senza passare dal traferro sono troppo elevati. Si possono notare i flussi dispersi nelle vicinanze del magnete nella Fig. 4.7.

Analisi Magnetostatica

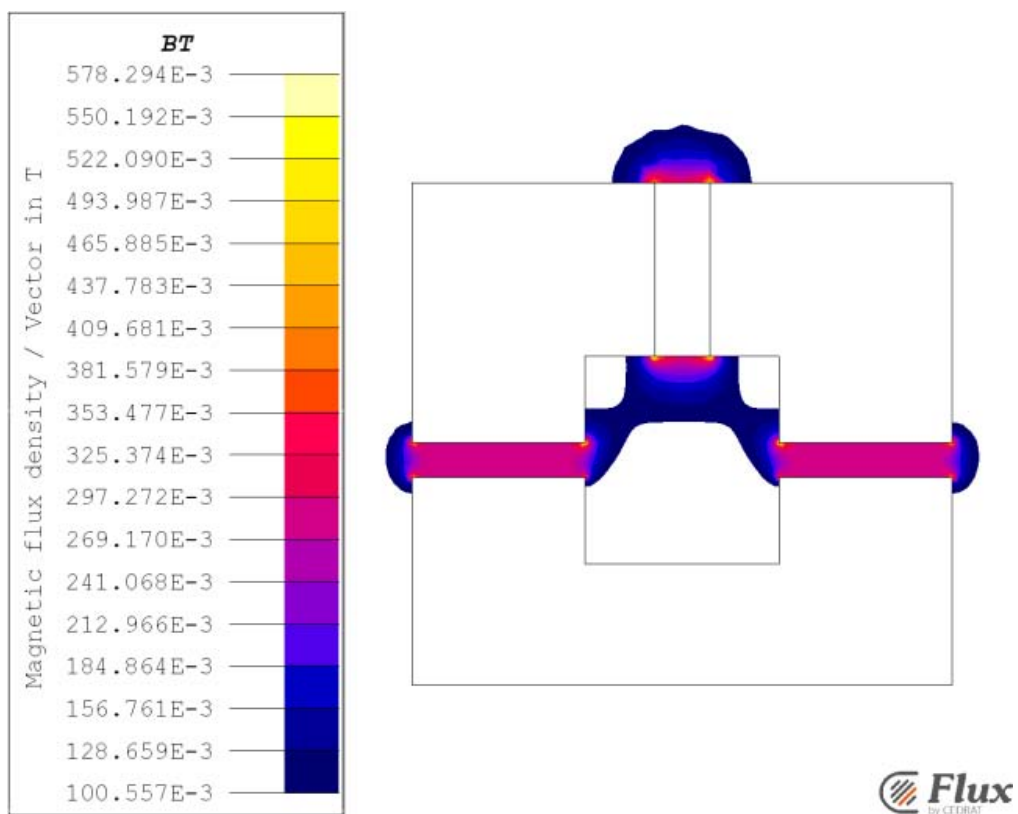


Fig. 4.7 Campo di induzione magnetico nell'aria

Capitolo 5

Simulazione 2D

Come si è visto nei capitoli precedenti si è arrivati a due configurazioni per i moduli, una con i magneti superficiali SPM e l'altra con i magneti interni IPM, come mostrato nella figura 5.1. Si è deciso di confrontare queste due soluzioni, per capire i vantaggi e svantaggi di entrambe, tramite delle simulazioni numeriche dello scenario di riferimento (riportato nella tabella 3.1). Per poter confrontare le due configurazioni le simulazioni sono state fatte utilizzando la stessa quantità di magneti permanente e facendo lavorare il magnete nello stesso punto di lavoro, cioè con lo stesso B e H.

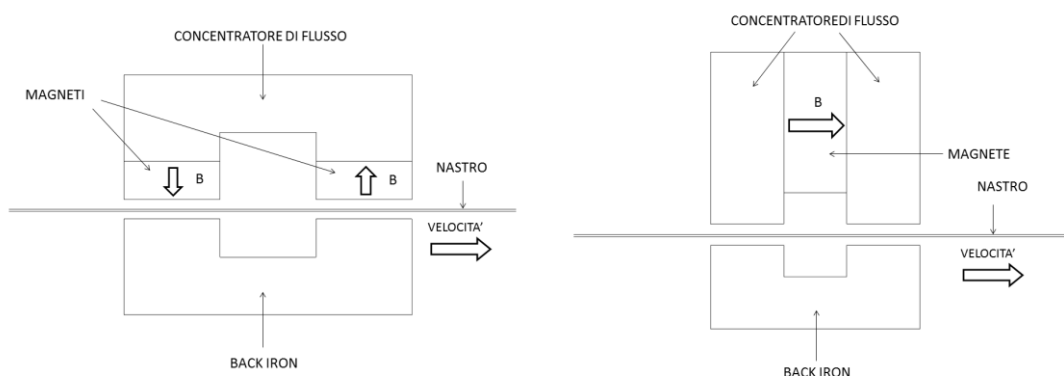


Fig. 5.1 Configurazione SPM a sinistra e IPM a destra

5.1 Calcolo dello spessore di penetrazione

Nelle figure 5.2 e 5.3 sono riportati rispettivamente per l'SPM e per l'IPM l'andamento della componente y (trasversale al nastro) del campo di induzione magnetica a traferro in funzione della coordinata x che ha origine 50mm prima dell'espansione polare di sinistra.

Tabella 3.1 Dati dello scenario di riferimento

Parametro	Quantità	Unità di misura
Velocità nastro	10	m/s
Spessore nastro	1e-3	m
Traferro	0,01	m
SmCo campo magnetico coercitivo Hc	7e5	A/m
SmCo induzione residua Br	1,01	T
Resistività alluminio	3e-8	Ω m
Permeabilità magnetica relativa ferro	1000	-

Simulazione 2D

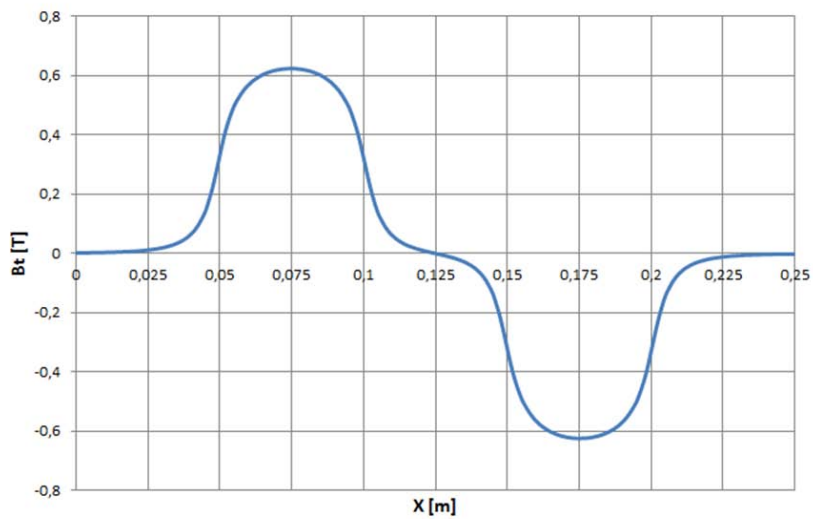


Fig. 5.2 Componente trasversale al nastro del campo di induzione magnetica al traferro per la configurazione SPM

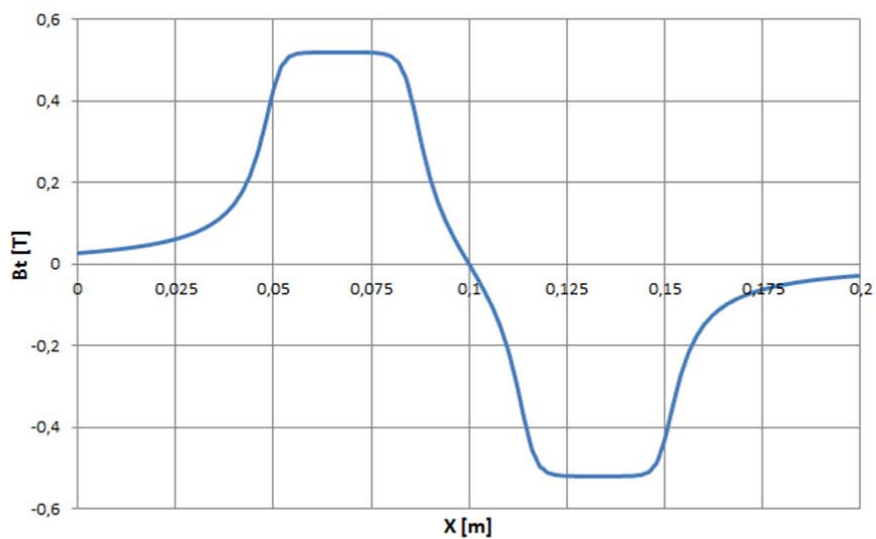


Fig. 5.3 Componente trasversale al nastro del campo di induzione magnetica al traferro per la configurazione IPM

Simulazione 2D

Il nastro spostandosi da sinistra verso destra incontra un campo di induzione magnetico con quell'andamento. Il nastro "vede" una variazione del campo di induzione con una certa frequenza che dipende dalla velocità di avanzamento del nastro.

Nel caso SPM tra il picco massimo e il picco minimo di campo di induzione c'è un intervallo di 0,1m siccome il nastro ha una velocità di 10 m/s tra il picco massimo e il minimo di B trascorrono 0,01s. Perciò la variazione del campo di induzione ha una frequenza:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot 0,01} = 50 \text{ Hz}$$

È possibile calcolare lo spessore di penetrazione

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = 0,08 \text{ m}$$

Dove

- ω è la pulsazione e vale $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314,16$
- σ è la conduttività elettrica che per l'alluminio vale $36,3 \times 10^6 \text{ S/m}$

Nel caso IPM tra il centro del picco massimo e il centro picco minimo del campo di induzione c'è un intervallo di 0,065m siccome il nastro ha una velocità di 10 m/s tra il picco massimo e il minimo di B trascorrono 0,0065s. Perciò la variazione del campo di induzione ha una frequenza:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot 0,0065} = 77 \text{ Hz}$$

È possibile calcolare lo spessore di penetrazione

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = 0,07 \text{ m}$$

Per entrambe le configurazioni lo spessore di penetrazione è maggiore dello spessore del nastro che è 1mm perciò le correnti e di conseguenza le potenze indotte saranno circa costanti nello spessore del nastro.

5.2 Distribuzione delle correnti indotte

È stato risolto lo scenario di riferimento, la distribuzione delle correnti indotte è riportata nelle figure 5.4 e 5.5.

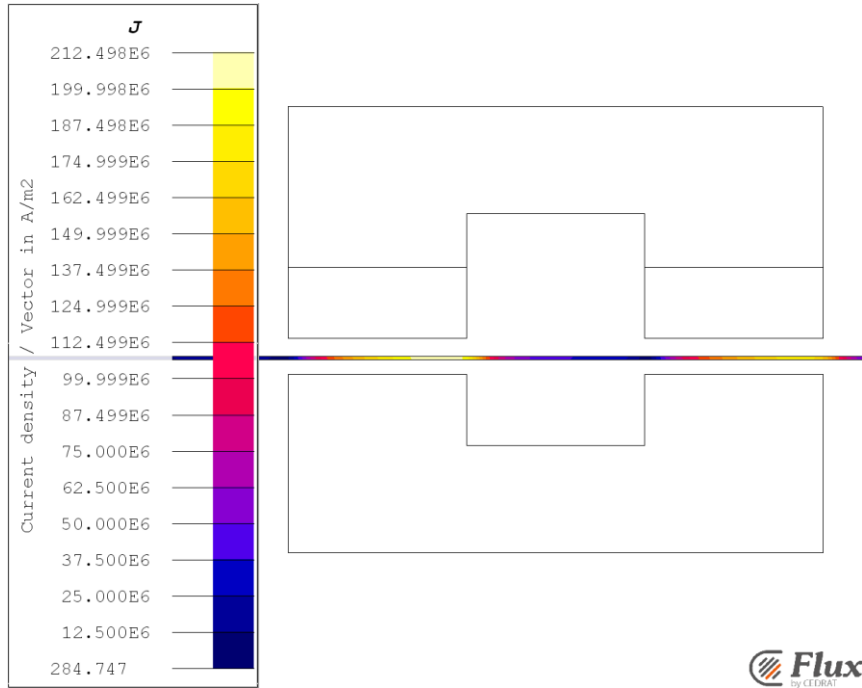


Fig. 5.4 Distribuzione delle correnti indotte nel nastro per la configurazione SPM nello scenario di riferimento

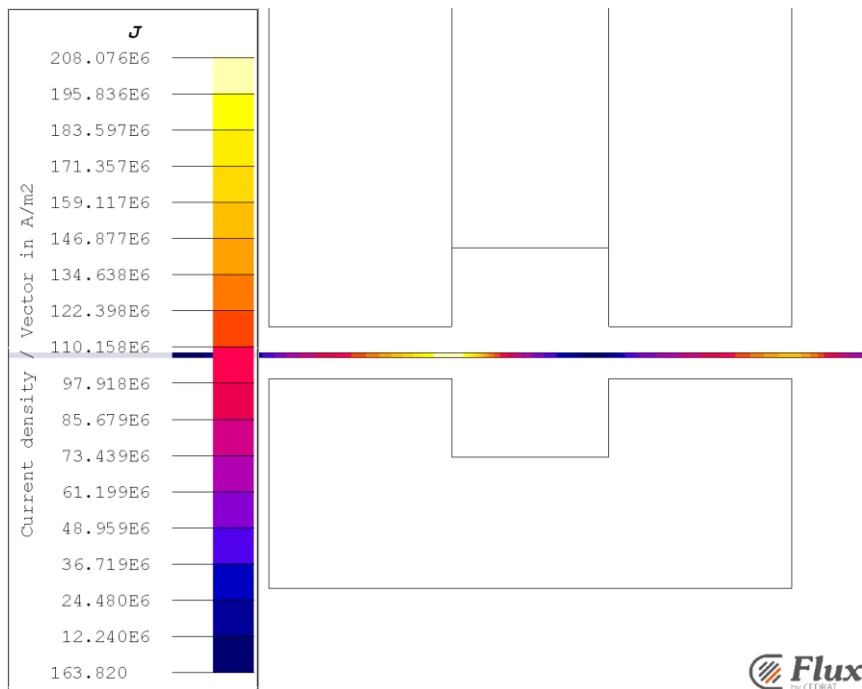


Fig. 5.5 Distribuzione delle correnti indotte nel nastro per la configurazione IPM nello scenario di riferimento

Simulazione 2D

Come era stato previsto la corrente è costante nello spessore del nastro d'alluminio, questo permette di avere un riscaldamento uniforme nello spessore del nastro. Nelle simulazioni riportate il nastro procede da sinistra verso destra, i picchi di corrente indotta nel nastro sono in ritardo rispetto all'asse delle espansioni polari, dove il campo di induzione è massimo.

5.3 Funzionamento a vuoto e a carico del modulo SPM

Le figure 5.7 e 5.8 riportano il valore del campo di induzione magnetico e del campo magnetico nel magnete durante il funzionamento a vuoto (senza nastro o con nastro fermo) e nel funzionamento a carico (nello scenario di riferimento Tab. 3.1), della configurazione SPM. Nel passaggio da vuoto a carico il magnete varia il suo punto di lavoro come riportato nella figura 5.6, dove P è il punto di lavoro a vuoto e P' il punto di lavoro a carico.

Nella figura 5.9 è stato riportato anche il valore del campo di induzione magnetico nel traferro durante il funzionamento a vuoto e quello a carico.

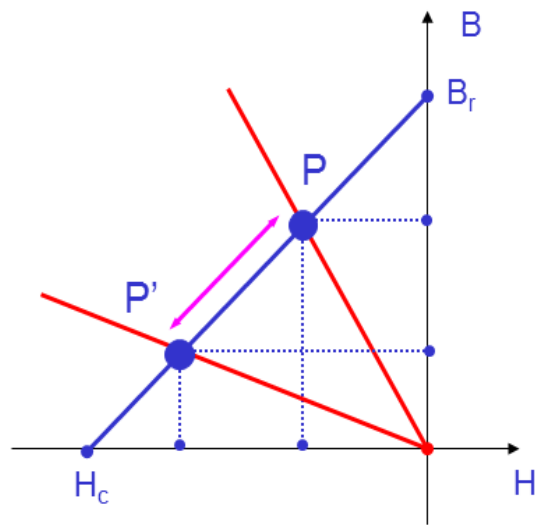


Fig. 5.6 Variazione del punto di lavoro del magnete nel passaggio da vuoto P a carico P'

Simulazione 2D

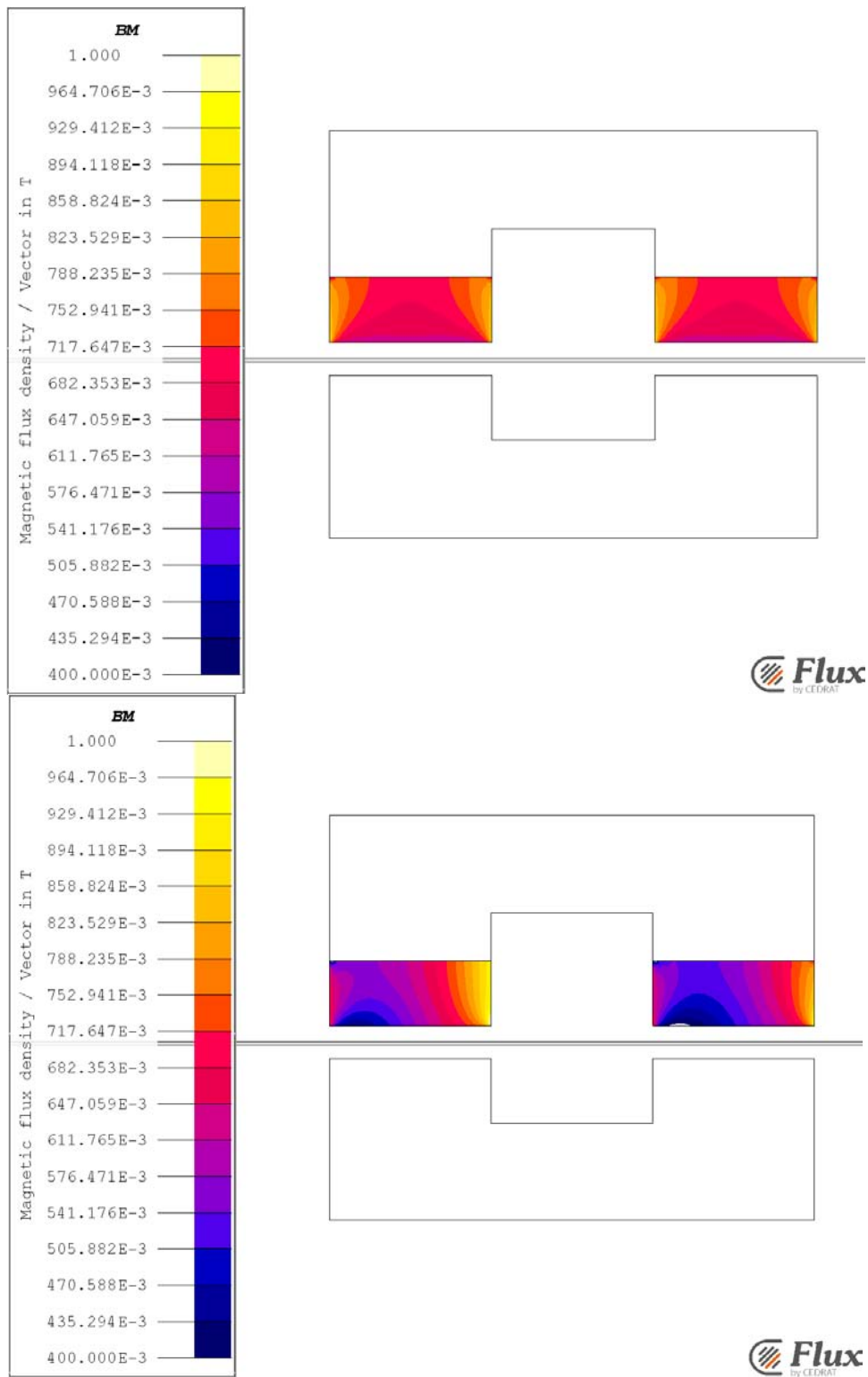


Fig. 5.7 Campo di induzione nei magneti a vuoto sopra e a carico sotto.

Simulazione 2D

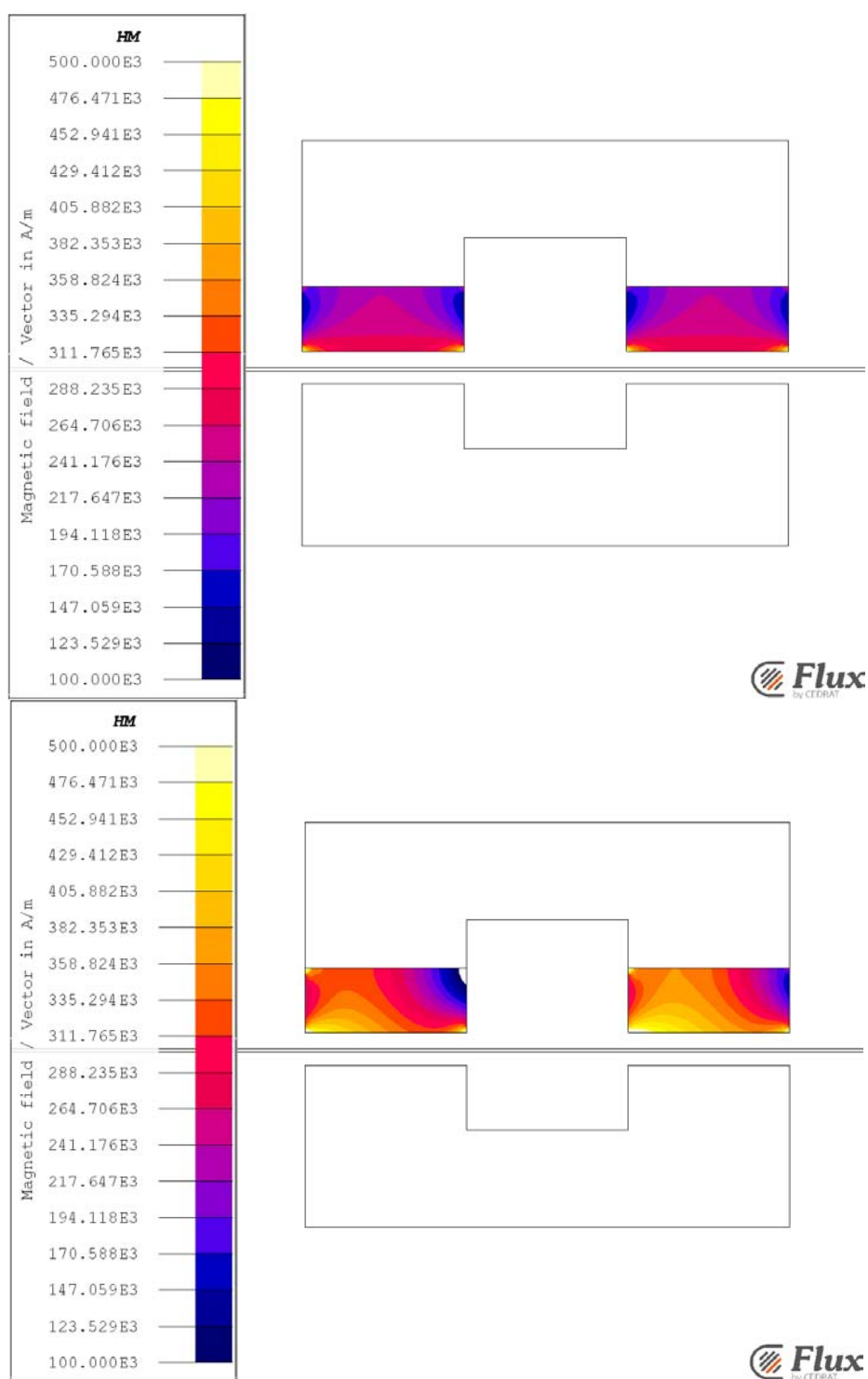


Fig. 5.8 Campo magnetico nei magneti a vuoto sopra e a carico sotto

Nel passaggio da vuoto a carico il campo di induzione all'interno dei magneti diminuisce e aumenta il campo magnetico.

Simulazione 2D

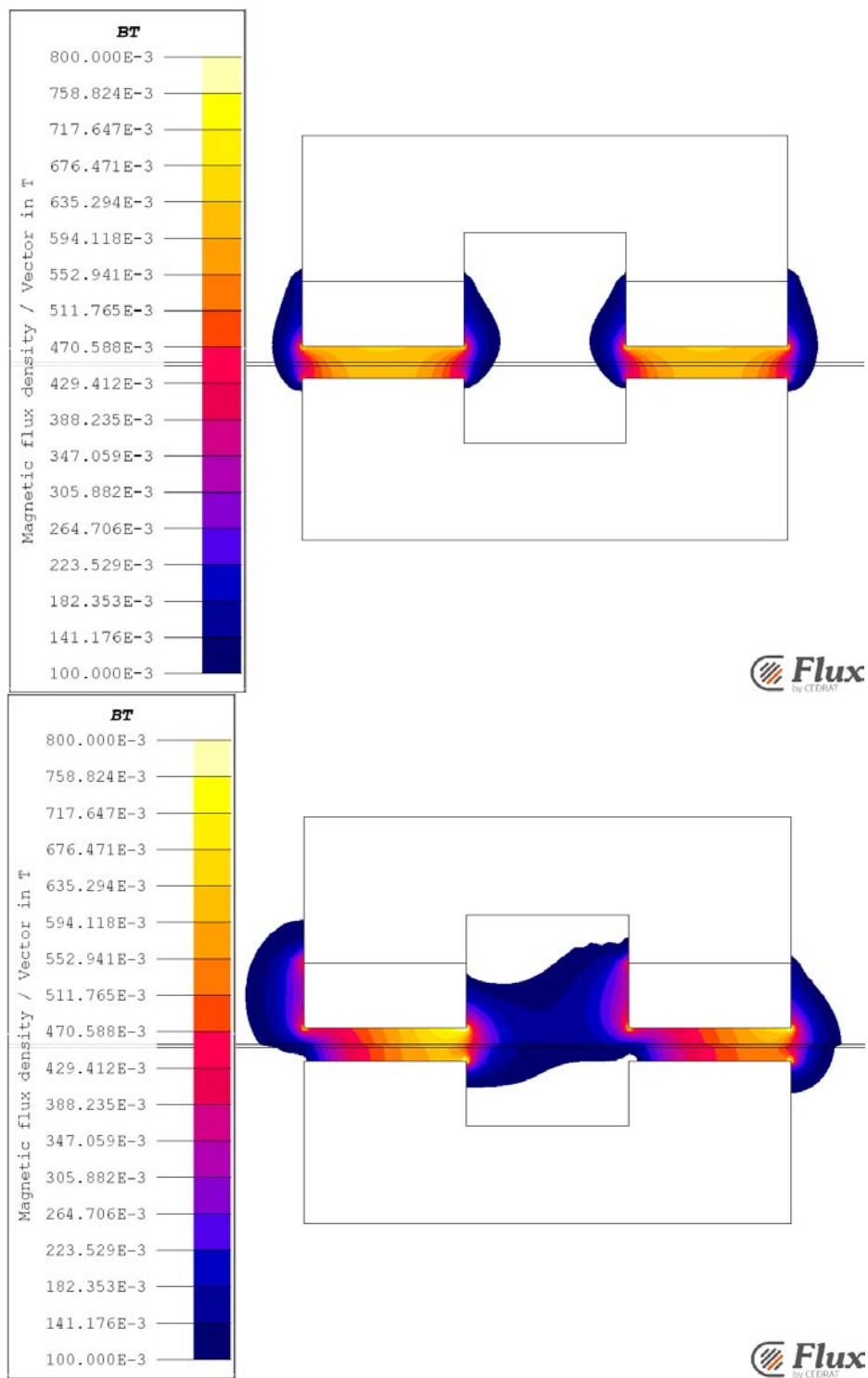


Fig. 5.9 Campo di induzione nel traferro a vuoto e a carico

Le correnti indotte nel nastro tendono ad annullare il campo di induzione a traferro.

5.4 Funzionamento a vuoto e a carico del modulo IPM

Le figure 5.10 e 5.11 riportano il valore del campo di induzione magnetico e del campo magnetico nel magnete durante il funzionamento a vuoto (senza nastro o con nastro fermo) e nel funzionamento a carico (nello scenario di riferimento), della configurazione IPM.

Nella figura 5.12 è stato riportato anche il valore del campo di induzione magnetico nel traferro durante il funzionamento a vuoto e quello a carico.

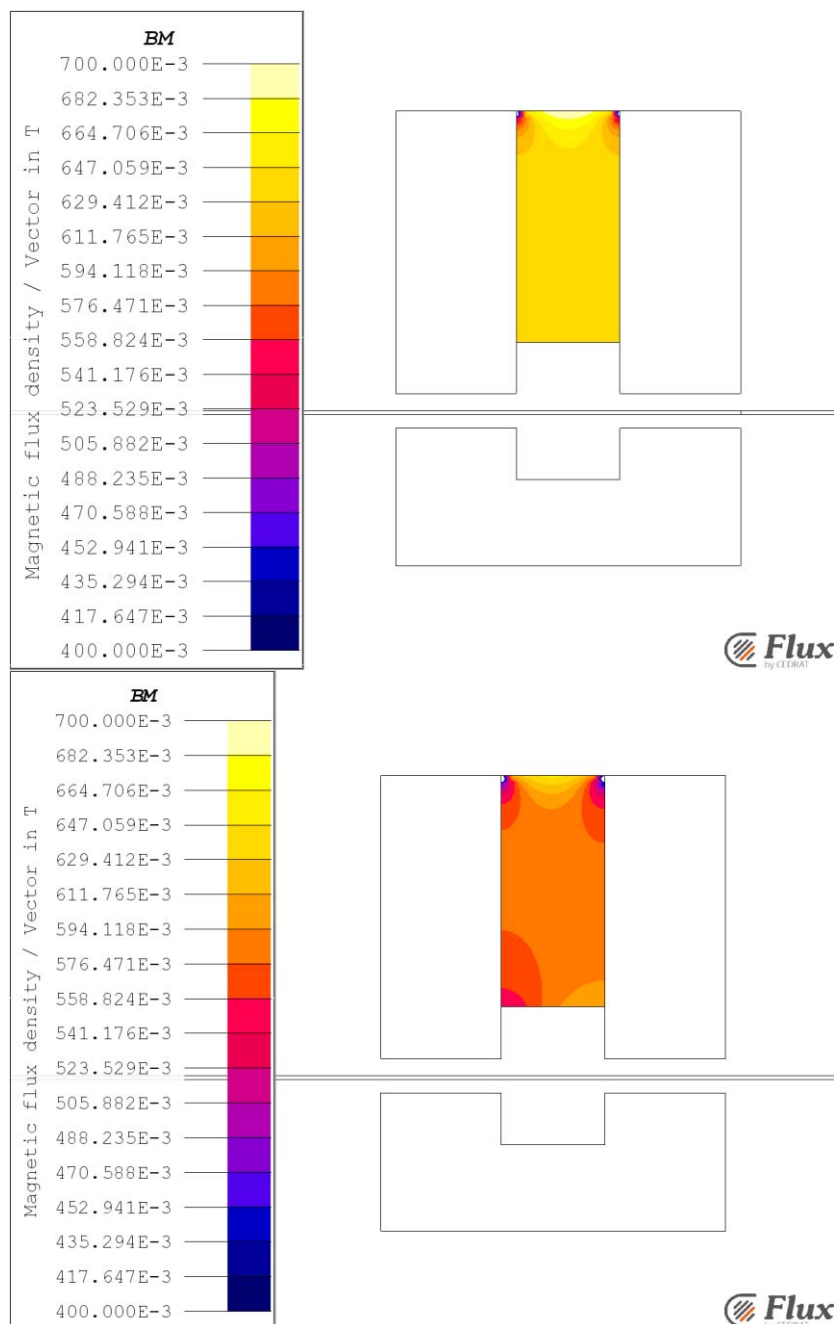


Fig. 5.10 Campo di induzione nei magneti a vuoto sopra e a carico sotto.

Simulazione 2D

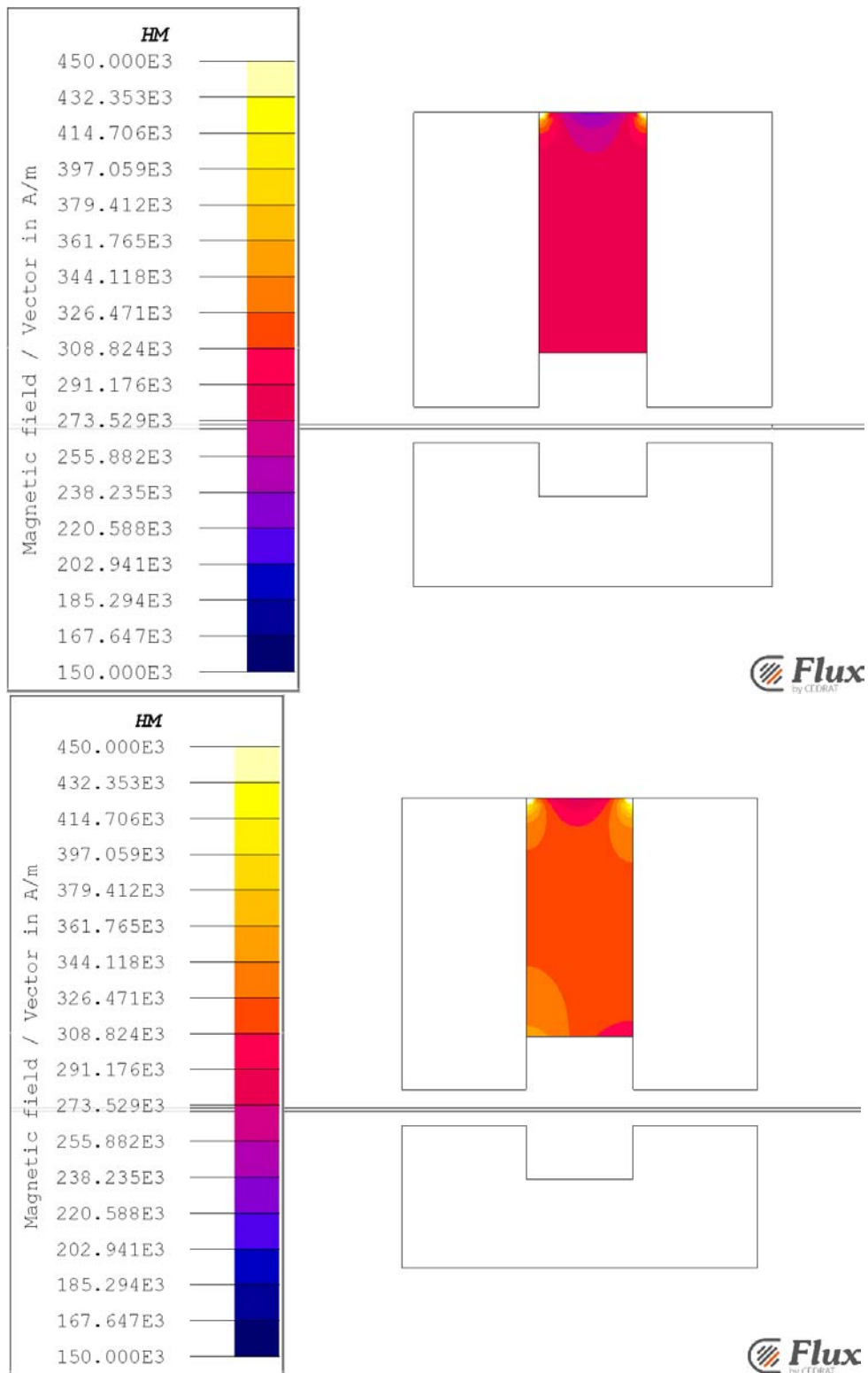


Fig. 5.11 Campo magnetico nei magneti a vuoto sopra e a carico sotto

Nel passaggio da vuoto a carico il campo di induzione all'interno dei magneti diminuisce e aumenta il campo magnetico.

Simulazione 2D

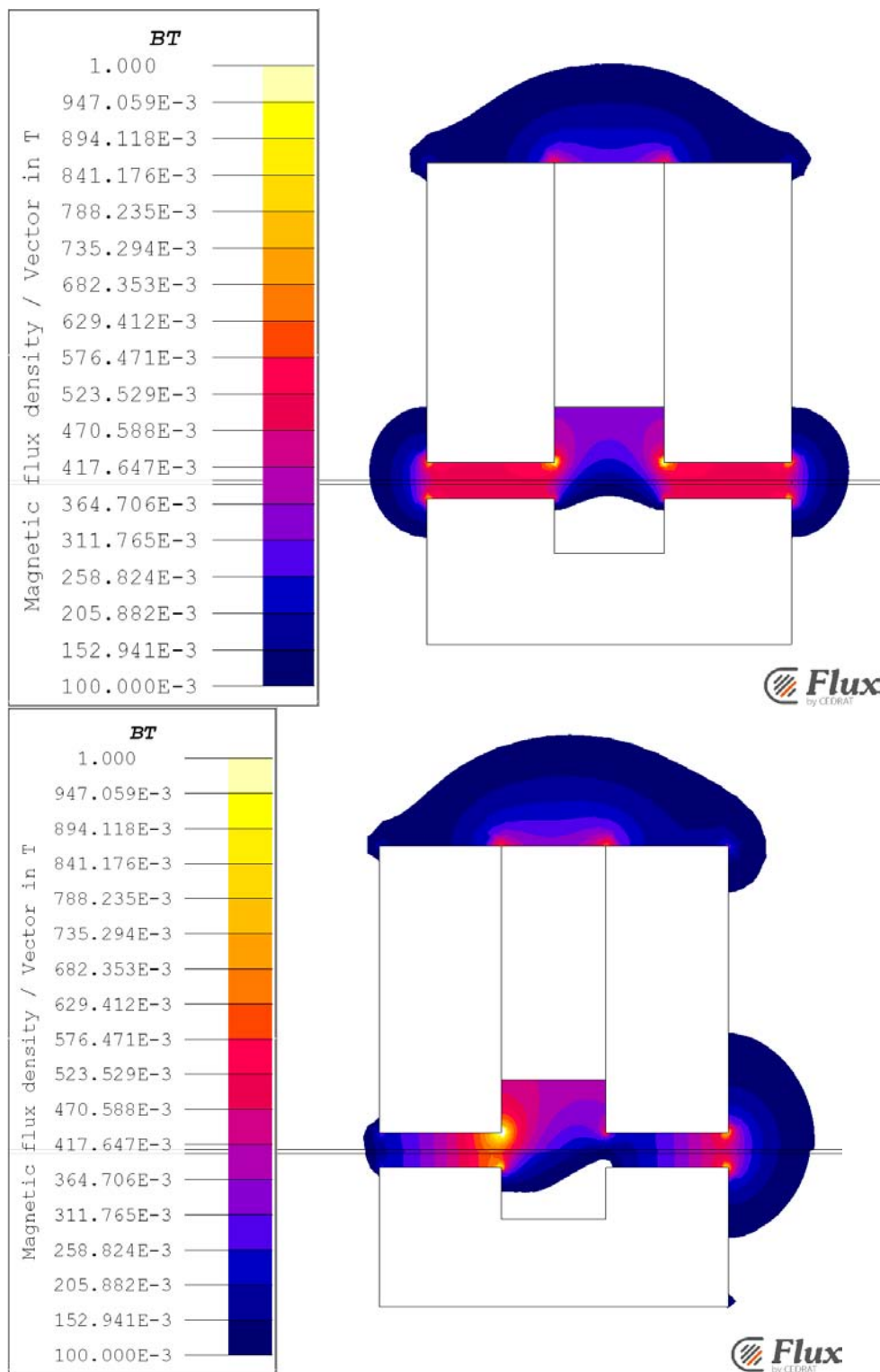


Fig. 5.12 Campo di induzione nel traferro a vuoto e a carico

Le correnti indotte nel nastro tendono ad annullare il campo di induzione a traferro.

5.5 Variazione dello spessore del nastro

Dato che l'obiettivo è riuscire a costruire una macchina versatile che si possa adattare alle diverse tipologie di nastri di alluminio si è studiato come varia la potenza indotta al variare dello spessore del nastro. Questo è stato fatto perché le applicazioni industriali richiedono macchine che si adattino facilmente e velocemente al variare delle caratteristiche geometriche del nastro da scaldare. Sono state fatte delle simulazioni nello scenario di riferimento per la configurazione a magneti superficiali e quella a magneti interni al variare dello spessore del nastro. I risultati sono riportati in Fig. 5.13, il grafico riporta l'andamento della potenza specifica volumetrica media nel volume del nastro $[w/m^3]$ riferita alla potenza specifica volumetrica media nel volume del nastro con il nastro dello spessore di 1mm, in funzione dello spessore del nastro.

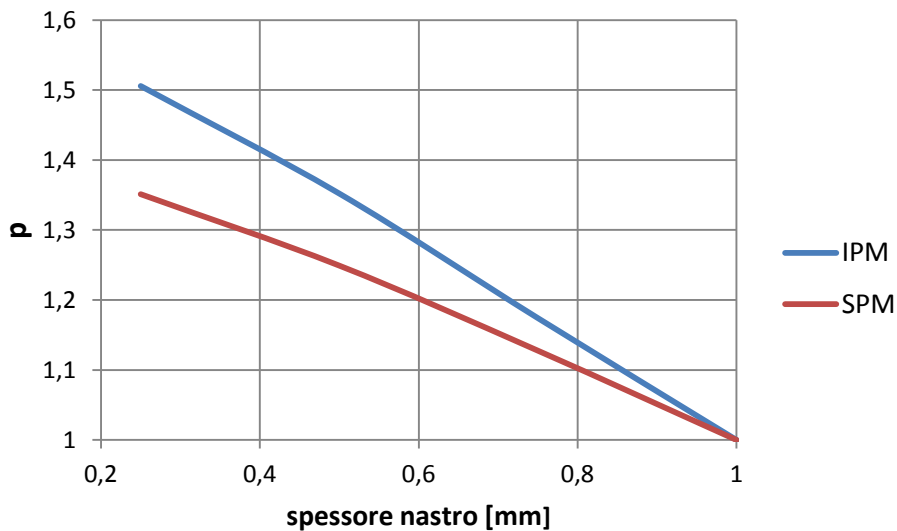


Fig. 5.13 Variazione della potenza specifica indotta al variare dello spessore del nastro

Il sistema di riscaldamento riesce a scaldare più velocemente nastri sottili.

5.6 Potenza indotta

La potenza indotta nello scenario di riferimento da un modulo SPM delle dimensioni riportate in tabella 5.2 è 76,7KW. Il significato delle grandezze riportate nella tabella 5.2 è spiegato nella figura 5.14

Tab. 5.2 Dimensioni modulo SPM

Grandezza	Valore [mm]
Lmag	50
Hmag	20
A	15
H	30
C	20
Hfe	30
Passo mag	50

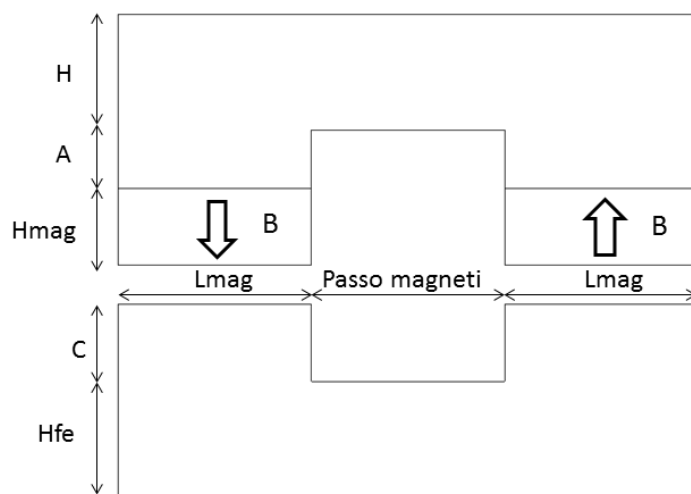


Fig. 5.14 Modulo SPM

Simulazione 2D

La potenza indotta nello scenario di riferimento da un modulo IPM delle dimensioni riportate in tabella 5.3 è 43,8kW. Il significato delle grandezze riportate nella tabella 5.3 è spiegato nella figura 5.15

Tab. 5.3 Dimensioni modulo IPM

Grandezza	Valore [mm]
Lmag	30
Hmag	67
A	15
Lt	35
C	15
Hfe	25

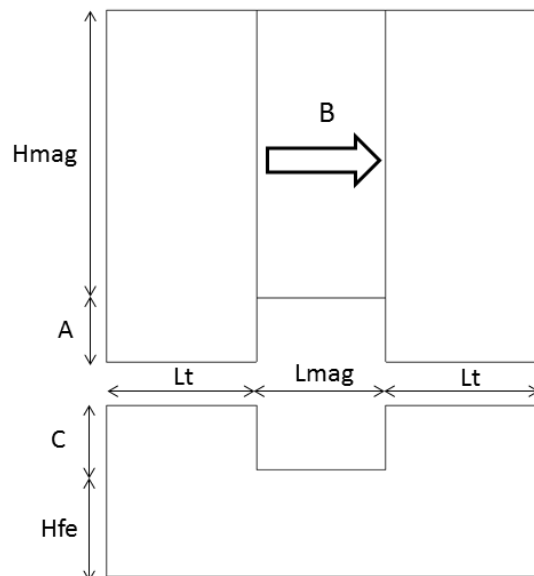


Fig. 5.15 Modulo IPM

5.7 Conclusioni

Vantaggi della configurazione SPM:

- Maggior sfruttamento del magnete (a parità di magnete la potenza indotta con la configurazione SPM è maggiore a quella IPM)

Vantaggi della configurazione IPM:

- Il magnete essendo interno è più protetto, nell'IPM in caso di incidente il nastro potrebbe colpire il magnete e scheggiarlo siccome è un materiale fragile.
- Nell'IPM i magneti sono affacciati sul nastro che è ad una elevata temperatura e potrebbe scaldare i magneti. Se i magneti si scaldano varia la loro caratteristica nel piano (B;H)
- Il campo magnetico è costante nel magnete. Nell'IPM invece i magneti sono vicini al nastro, dove avviene la reazione di indotto, perciò il campo magnetico nei magneti è molto variabile da zona a zona, questo può portare a raggiungere il campo coercitivo in alcune parti del magnete e smagnetizzarlo.

Capitolo 6

Simulazione 3D

Per poter vedere come si richiudono le correnti indotte nel nastro in prossimità del bordo sono necessarie delle simulazioni 3D. Per limitare il costo computazionale le simulazioni 3D sono state fatte per un nastro di larghezza 0,5m. Siccome il problema è simmetrico rispetto al piano passante per l'asse del nastro e normale ad esso, nel modello in flux 3D si è imposto la simmetria su quel piano con i vincoli: campo magnetico tangente e campo elettrico normale. In questo modo le soluzioni sono state calcolate solo su metà nastro e nell'altra metà i risultati saranno speculari.

Le simulazioni 3D sono state fatte per la configurazione a magneti superficiali e quella a magnete interno (fig. 6.1 e fig. 6.2), dove le parti in blu rappresentano il magnete, le parti in giallo il ferro e in celeste il nastro. Per tutte le simulazioni 3D le dimensioni dei moduli sono uguali a quelle utilizzate nelle simulazioni 2D, riportate in Tabella 5.2 e 5.3. Per entrambe le configurazioni si ha la stessa quantità di magneti e il magnete ha lo stesso punto di lavoro.

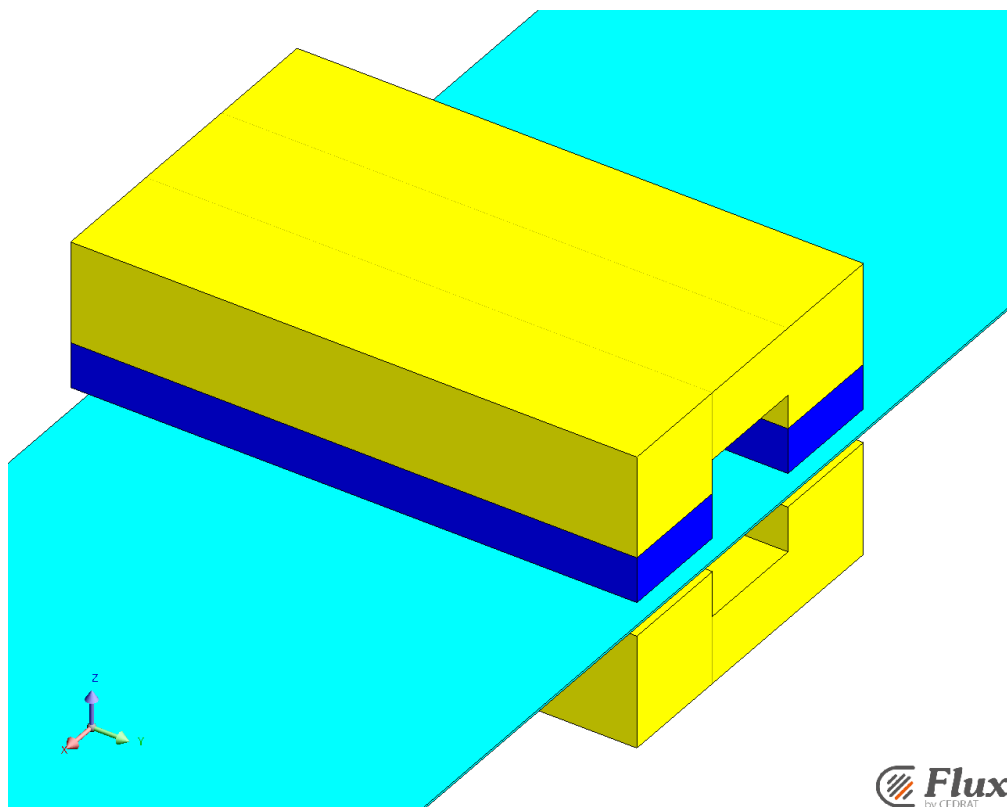


Fig. 6.1 Modulo a magneti superficiali

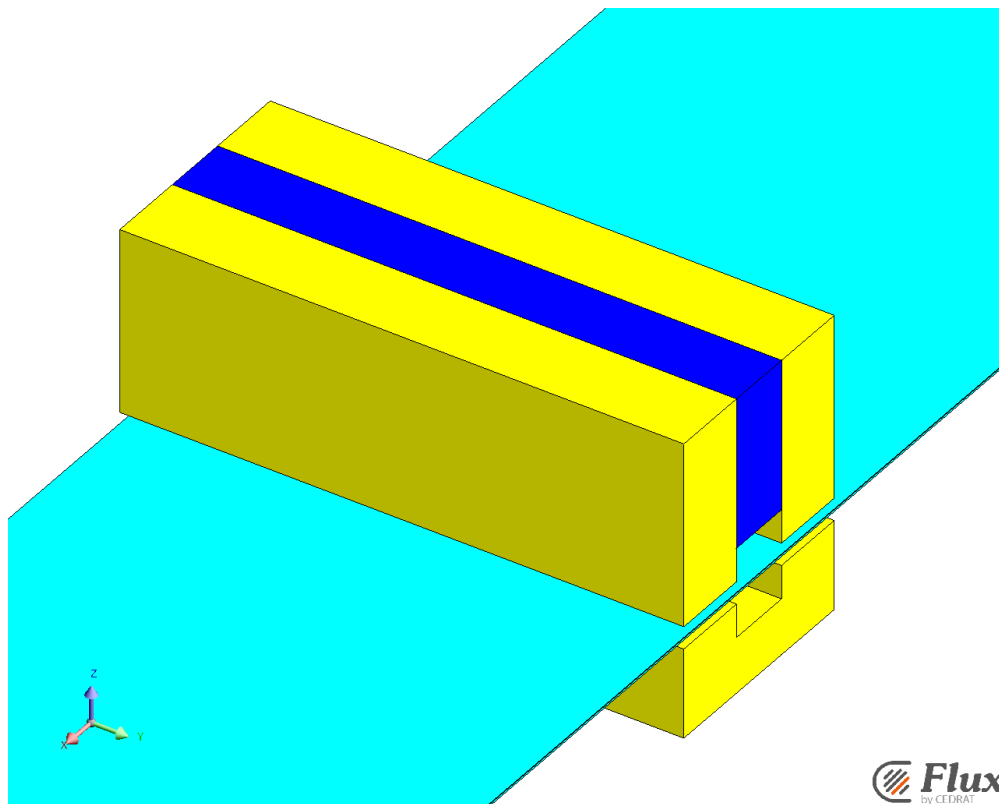


Fig. 6.2 Modulo a magnete interno

6.1 Distribuzione della densità di corrente

È stato risolto lo scenario di riferimento (riportato in tabella 6.1) con la larghezza del nastro uguale alla larghezza dei moduli per entrambe le configurazioni.

Tab. 6.1 Dati dello scenario di riferimento

Parametro	Quantità	Unità di misura
Velocità nastro	10	m/s
Spessore nastro	1e-3	m
Traferro	0,01	m
SmCo campo magnetico coercitivo Hc	7e5	A/m
SmCo induzione residua Br	1,01	T
Resistività alluminio	3e-8	Ω m
Permeabilità magnetica relativa ferro	1000	-

La distribuzione della corrente su metà nastro (nella vista dall'alto) è riportata in fig. 6.3, il nastro si muove da sinistra verso destra, i risultati sono speculari rispetto al lato in basso e le 4 linee nere verticali rappresentano le espansioni polari del modulo.

Simulazione 3D

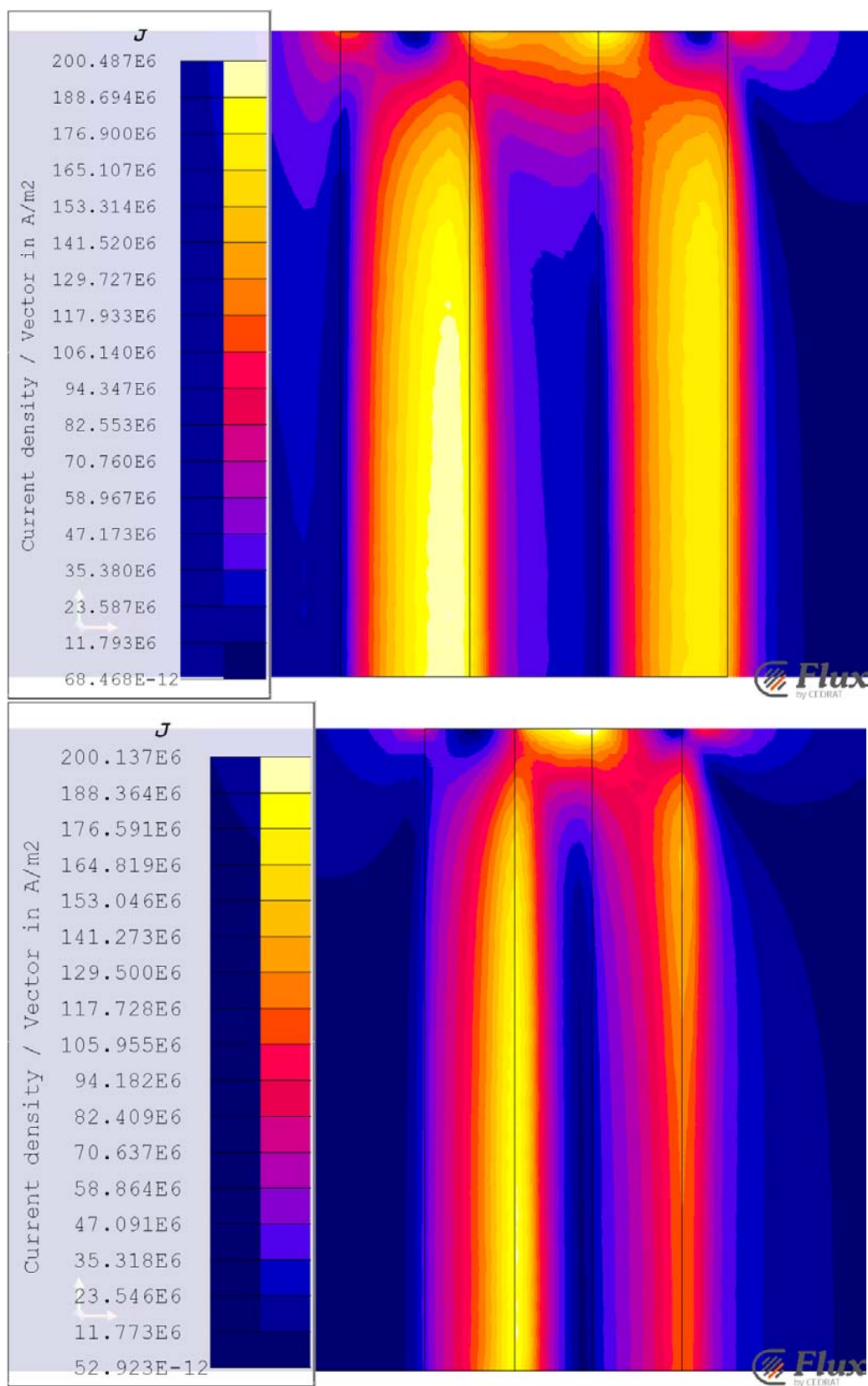


Fig. 6.3 Distribuzione della densità di corrente nello scenario di riferimento per la configurazione SPM sopra e IPM sotto.

6.2 Distribuzione della potenza indotta

La distribuzione della potenza su metà nastro (nella vista dall'alto), sempre nello scenario di riferimento, è riportata in fig. 6.4.

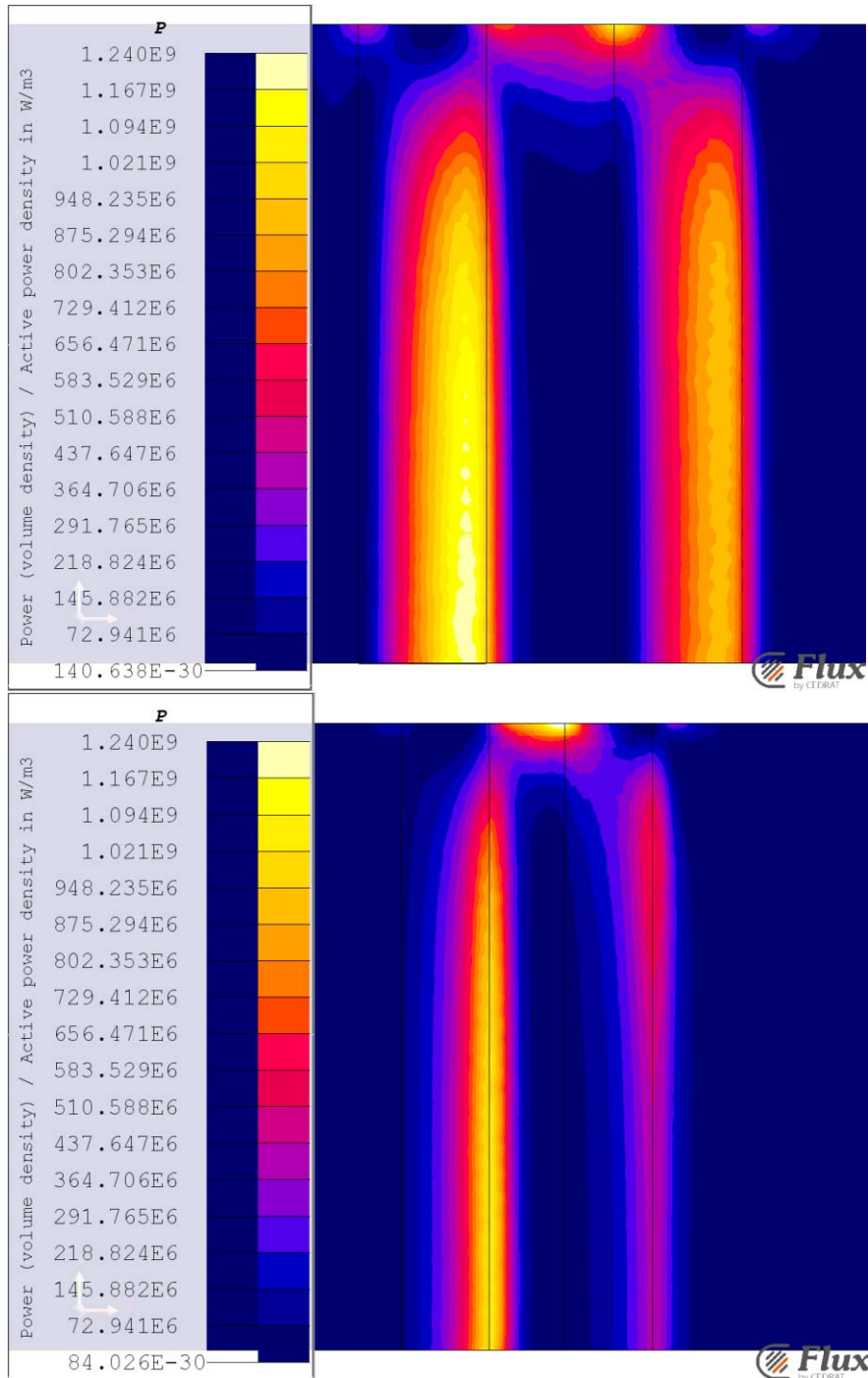


Fig. 6.4 Distribuzione della potenza indotta nello scenario di riferimento per la configurazione SPM sopra e IPM sotto.

Simulazione 3D

La conoscenza della distribuzione della potenza indotta nella larghezza del nastro è utile per poter calcolare la variazione della temperatura nell'alluminio durante e alla fine del transitorio di riscaldamento che sarà trattato in un capitolo specifico.

Il nastro è stato suddiviso longitudinalmente in strisce di larghezza 5mm altezza 1mm (lo spessore del nastro) e lunghezza uguale alla lunghezza del nastro. Nello scenario di riferimento, alla fine del transitorio, si è calcolato per ciascuna striscia l'integrale triplo nel volume della densità volumetrica di potenza persa per effetto joule. I risultati sono stati utilizzati per creare i grafici in fig. 6.5 e fig. 6.6 che rappresentano l'andamento della potenza specifica riferita alla potenza indotta al centro del nastro, in funzione della larghezza del nastro, prendendo l'asse del nastro come coordinata 0.

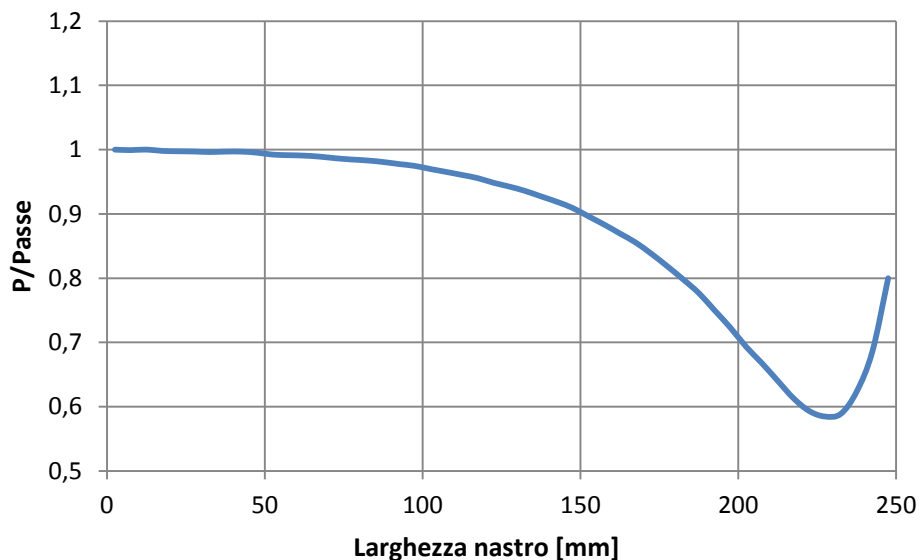


Fig. 6.5 Distribuzione potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM

Per la configurazione SPM nella simulazione 2D dello scenario di riferimento la potenza indotta per un nastro di larghezza 500mm è 38,3kW, nella simulazione 3D la potenza indotta è 34,6kW. Nel passaggio dal 2D al 3D si ha una diminuzione della potenza indotta del 10%.

Simulazione 3D

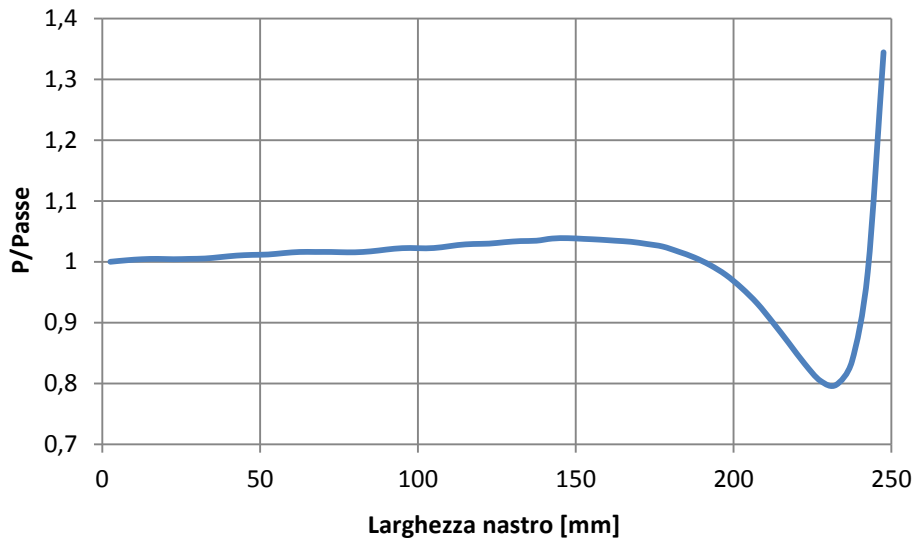


Fig. 6.6 Distribuzione potenza nella larghezza del nastro per la configurazione IPM

Per la configurazione IPM nella simulazione 2D dello scenario di riferimento la potenza indotta per un nastro di larghezza 500mm è 21,9kW, nella simulazione 3D la potenza indotta è 16,6kW. Nel passaggio dal 2D al 3D si ha una diminuzione della potenza indotta del 24%.

6.3 Variazione della potenza indotta al variare della velocità

È stata valutata la variazione della potenza totale indotta e della distribuzione di potenza al variare della velocità del nastro lasciando sempre un traferro di 10mm. La variazione della potenza totale indotta al variare della velocità è riportata nella tabella 5.2.

Tabella 5.2 Potenza totale indotta per diverse velocità del nastro

Configurazione	Velocità [m/s]	Potenza [kW]
SPM	5	10.6
	7.5	21.8
	10	34.6
IPM	5	5.8
	7.5	11.3
	10	16.6

La potenza totale indotta nel nastro diminuisce al diminuire della velocità del nastro. In fig. 6.7 si è riportato la potenza adimensionale (il rapporto tra la potenza totale indotta e la potenza totale indotta con la velocità del nastro di 10 m/s) per varie velocità del nastro per entrambe le configurazioni.

Simulazione 3D

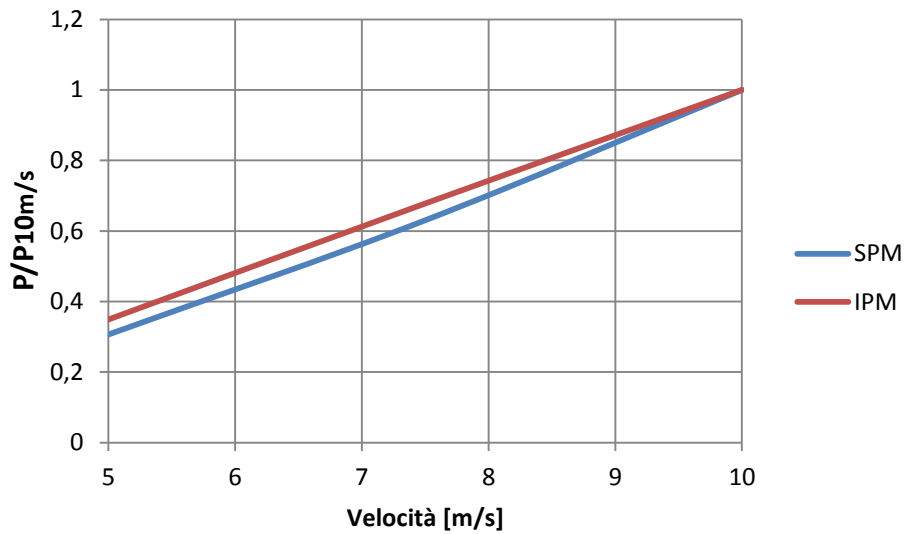


Fig. 6.7 Potenza totale indotta in funzione della velocità per entrambe le configurazioni

L'andamento della potenza specifica riferita alla potenza indotta al centro del nastro, in funzione della larghezza del nastro per diverse velocità è stato riportato in fig. 6.8 e fig. 6.9 rispettivamente per la configurazione SPM e per quella IMP.

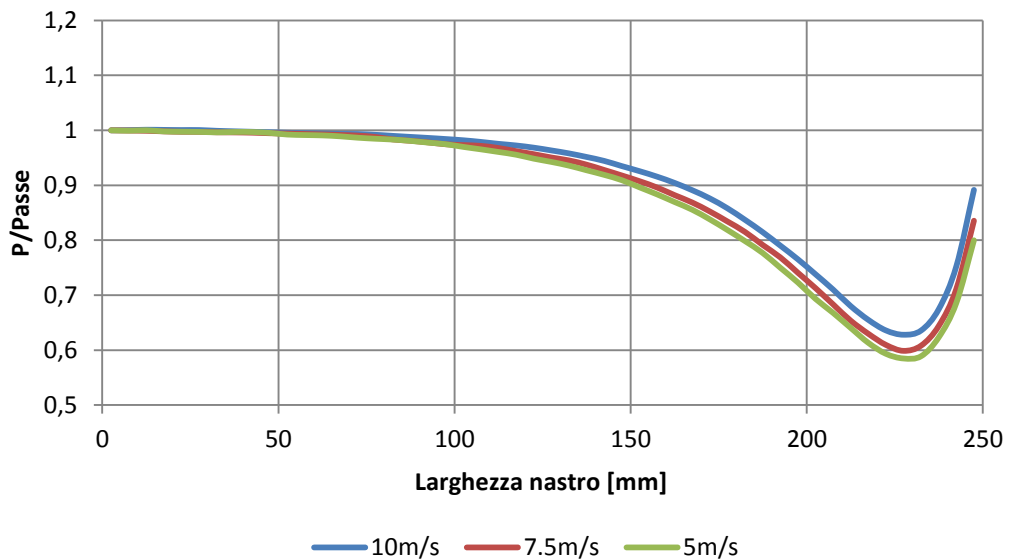


Fig. 6.8 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM per tre diverse velocità

Per la configurazione SPM la distribuzione di potenza non varia molto al variare della velocità del nastro.

Simulazione 3D

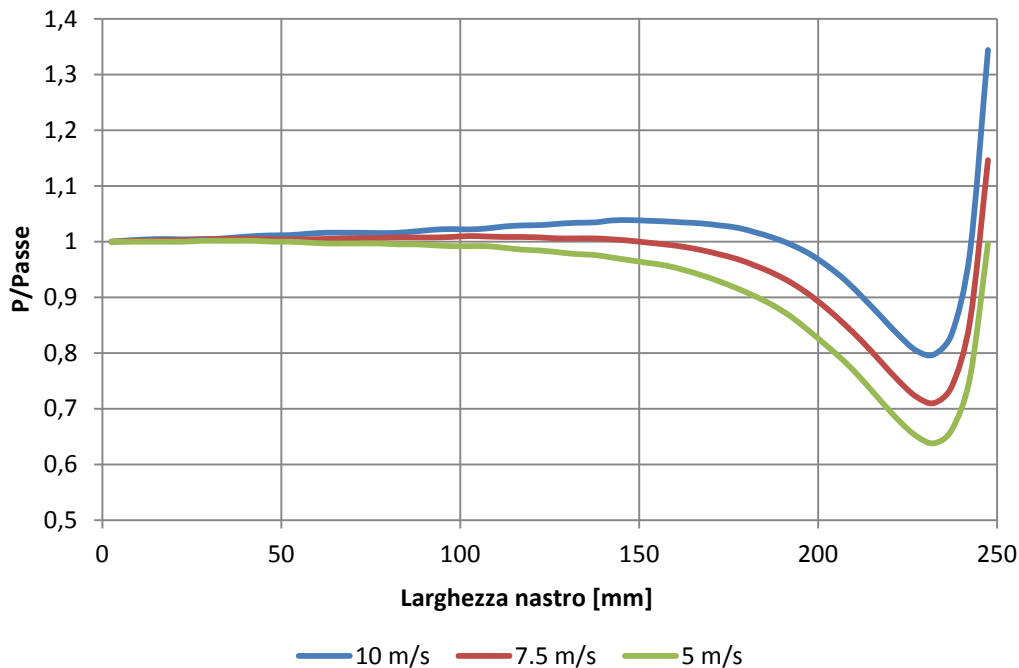


Fig. 6.9 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la configurazione IPM per tre diverse velocità

Per la configurazione IPM la distribuzione di potenza varia apprezzabilmente al variare della velocità del nastro. Si nota una diminuzione del picco di potenza indotta sul bordo del nastro al diminuire della velocità. Per una velocità del nastro di 10m/s la potenza indotta sul bordo è il 134% della potenza indotta al centro del nastro mentre per una velocità di 5m/s la potenza sul bordo è uguale alla potenza indotta al centro del nastro.

6.4 Variazione della potenza indotta al variare del traferro

È stata valutata la variazione della potenza totale indotta e della distribuzione di potenza al variare del traferro lasciando invariata la velocità del nastro a 10 m/s. Il metodo migliore per regolare la potenza indotta è tramite la variazione del traferro, anche variando la velocità del nastro la potenza indotta varia però variando la velocità del nastro si varia anche la velocità del processo. La variazione della potenza totale indotta al variare del traferro è riportata nella tabella 5.3.

Simulazione 3D

Tabella 5.3 Potenza totale indotta per diversi traferri

Configurazione	Traferro [mm]	Potenza [kW]
SPM	10	34.6
	15	23.4
	20	16.0
IPM	10	16.6
	15	10.0
	20	6.4

La potenza totale indotta nel nastro diminuisce all'aumentare del traferro. In fig. 6.10 si è riportato la potenza adimensionale (il rapporto tra la potenza totale indotta e la potenza totale indotta con traferro 10mm) per diversi valori di traferro per entrambe le configurazioni.

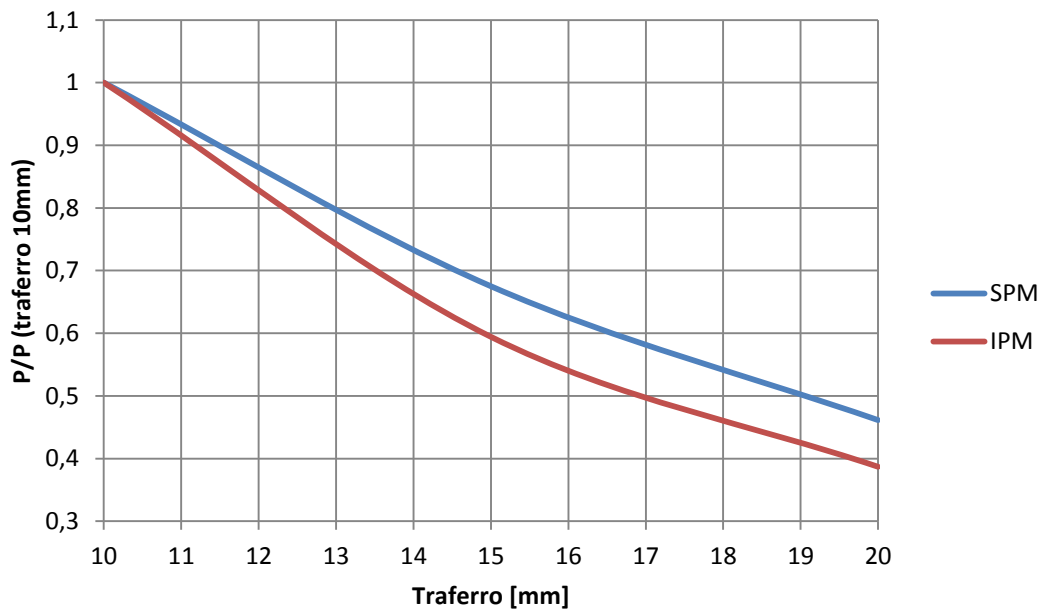


Fig. 6.10 Potenza totale indotta in funzione del traferro per entrambe le configurazioni

Per entrambe le configurazioni la potenza totale indotta varia molto al variare del traferro, è sufficiente aumentare il traferro di un millimetro per diminuire la potenza indotta di circa 10%.

L'andamento della potenza specifica riferita alla potenza indotta al centro del nastro, in funzione della larghezza del nastro per tre diversi valori di traferro è stato riportato in fig. 6.11 e fig. 6.12 rispettivamente per la configurazione SPM e per quella IMP.

Simulazione 3D

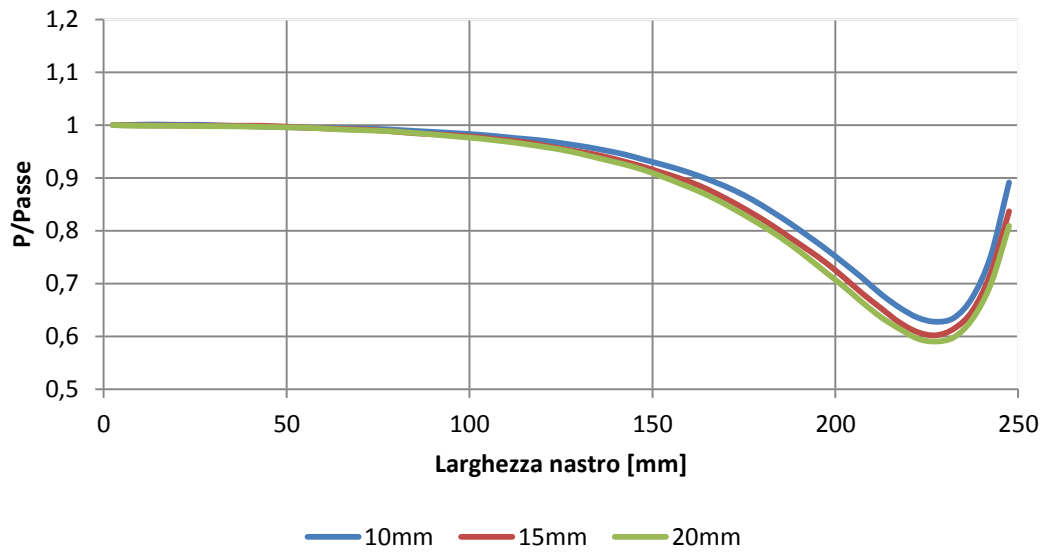


Fig. 6.11 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM per tre valori di traferro

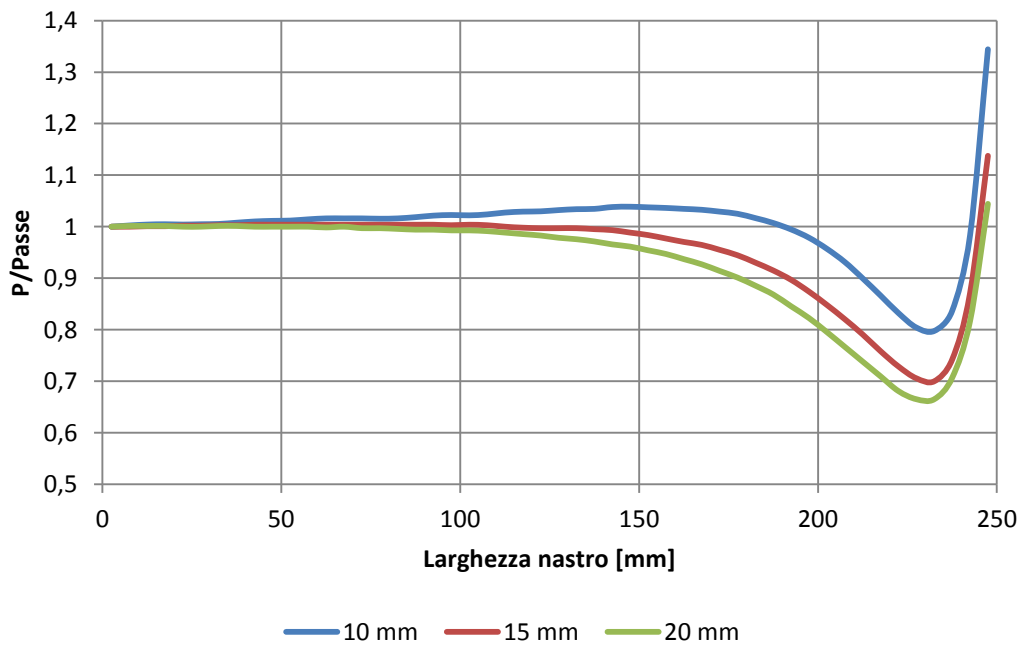


Fig. 6.12 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM per tre valori di traferro

Per entrambe le configurazioni la distribuzione di potenza nella larghezza del nastro non varia molto al variare del traferro.

6.5 Potenza indotta con nastri stretti

In questo paragrafo si è valutata la possibilità di scaldare con lo stesso modulo nastri di larghezza inferiore rispetto alla larghezza del modulo.

Sia per la configurazione SPM sia per quella IPM (fig. 6.13) è stata fatta una simulazione dello scenario di riferimento (tab. 6.1) con il modulo largo 500mm e il nastro largo 400mm.

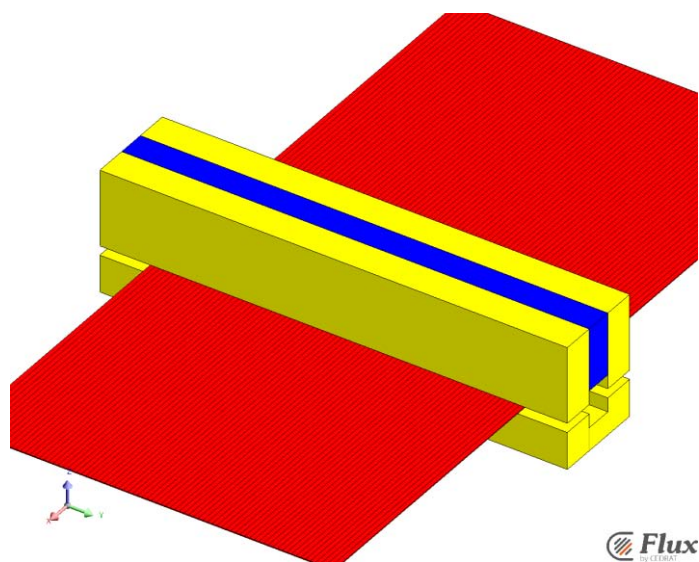
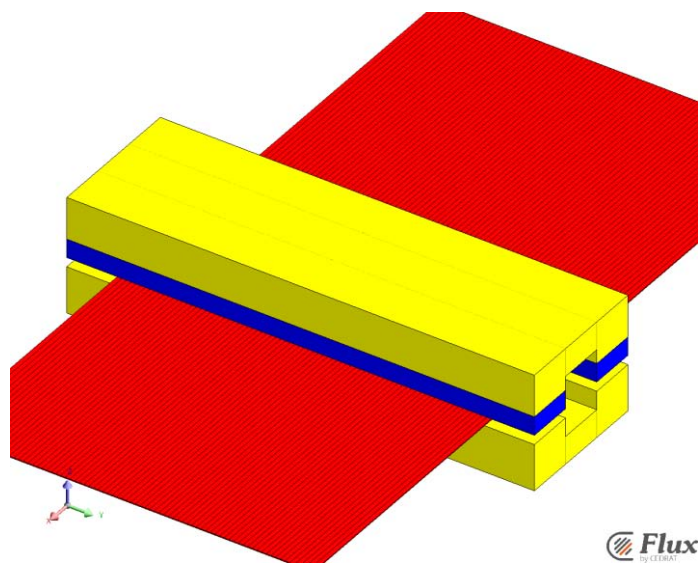


Fig. 6.13 Modulo SPM sopra e IPM sotto, con nastro stretto

Simulazione 3D

Si sono ottenute le seguenti distribuzioni di corrente nel nastro Fig. 6.14.

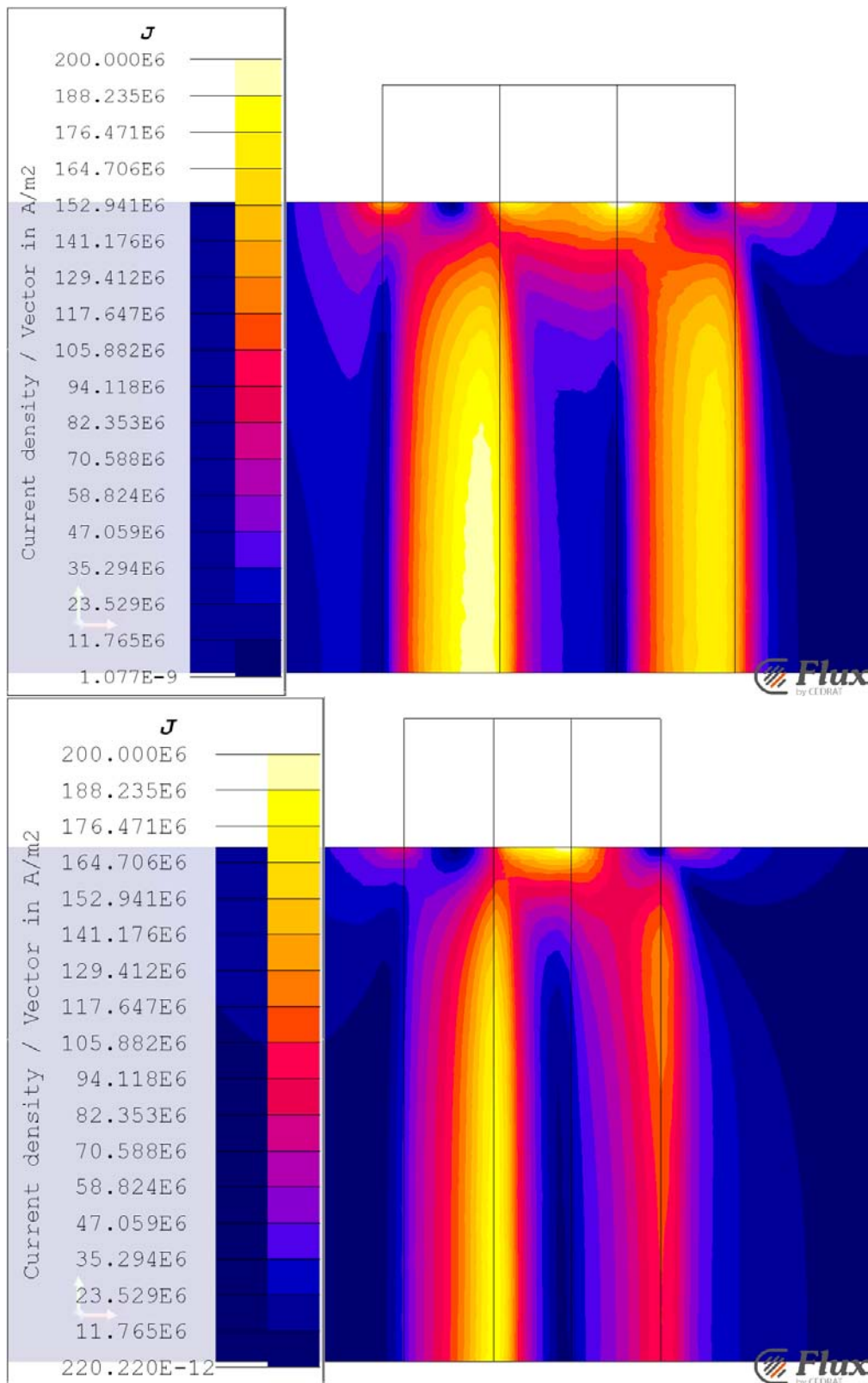


Fig. 6.14 Distribuzione della densità di corrente nello scenario di riferimento con nastro stretto per la configurazione SPM sopra e IPM sotto

Simulazione 3D

Per valutare meglio il riscaldamento è stata calcolato l'andamento della potenza specifica riferita alla potenza indotta al centro del nastro, in funzione della larghezza del nastro per entrambe le configurazioni fig. 6.15 e fig. 6.16.

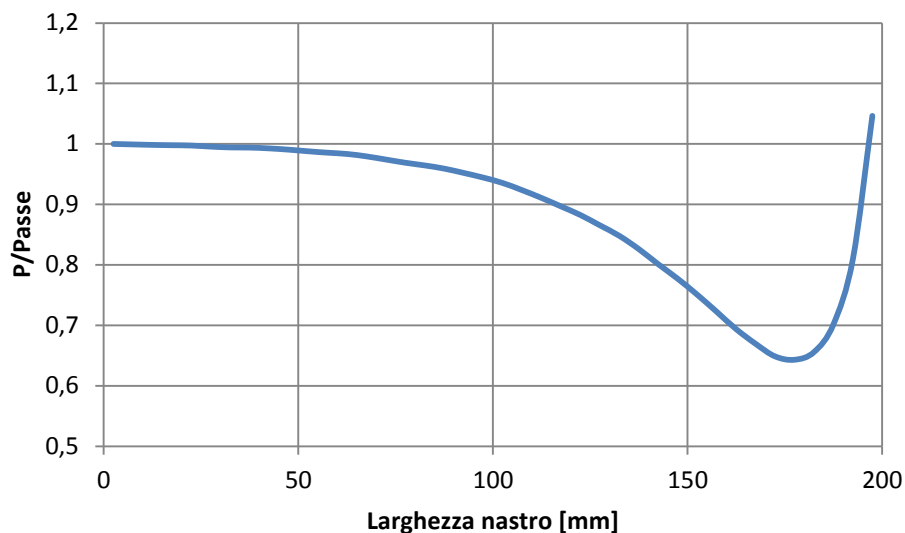


Fig.6.15 Distribuzione potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM

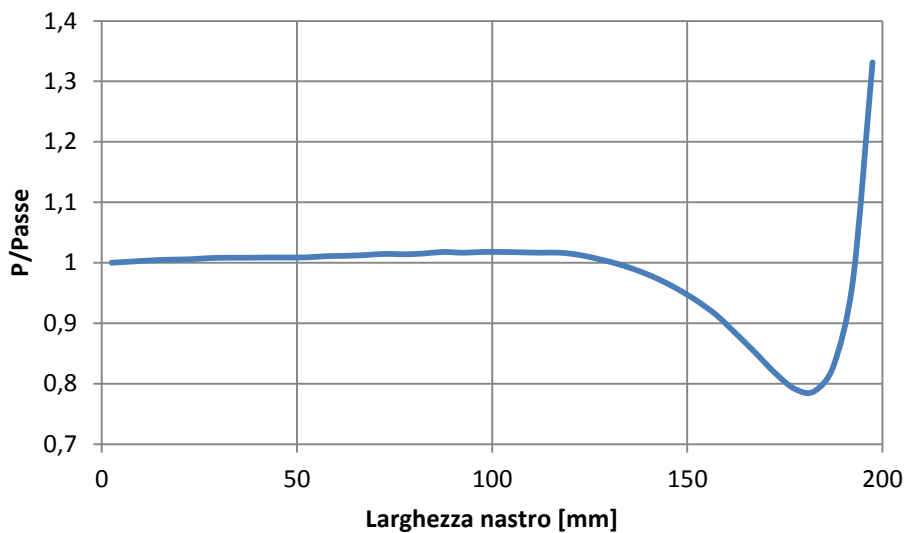


Fig. 6.16 Distribuzione potenza nella larghezza del nastro per la configurazione IPM

Simulazione 3D

La coordinata x lungo la larghezza del nastro che ha l'asse del nastro come coordinata 0 è stata normalizzata.

$$\xi = \frac{x}{\text{larghezza nastro}/2}$$

In questo modo è possibile confrontare i profili di potenza indotta nella larghezza del nastro per diverse larghezze del nastro fig.6.17 per il modulo SPM e fig. 6.18 per il modulo IPM.

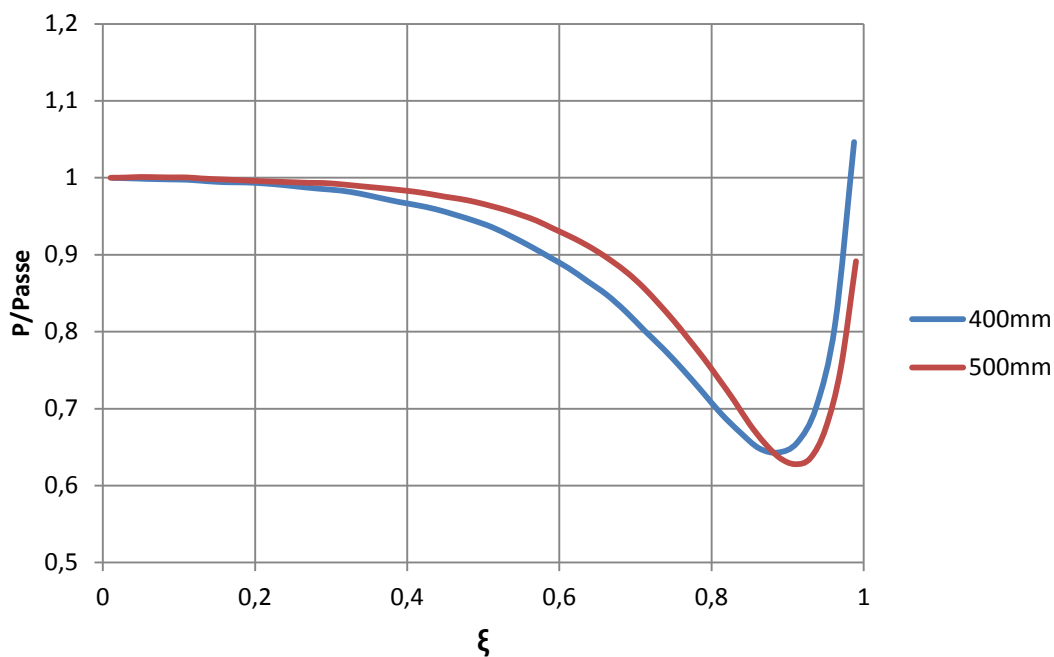


Fig. 6.17 Distribuzione della potenza indotta nella larghezza del nastro per un modulo SPM largo 500mm, per due diverse larghezze del nastro 400mm e 500mm

Per la configurazione SPM, lasciando costante la larghezza del modulo, la distribuzione di potenza varia poco al variare della larghezza del nastro. Si nota un aumento di potenza indotta sul bordo del nastro. Per un nastro largo 500mm la potenza indotta sul bordo è l' 89% della potenza indotta al centro del nastro mentre per un nastro largo 400mm la potenza sul bordo è il 104% della potenza al centro del nastro.

Simulazione 3D

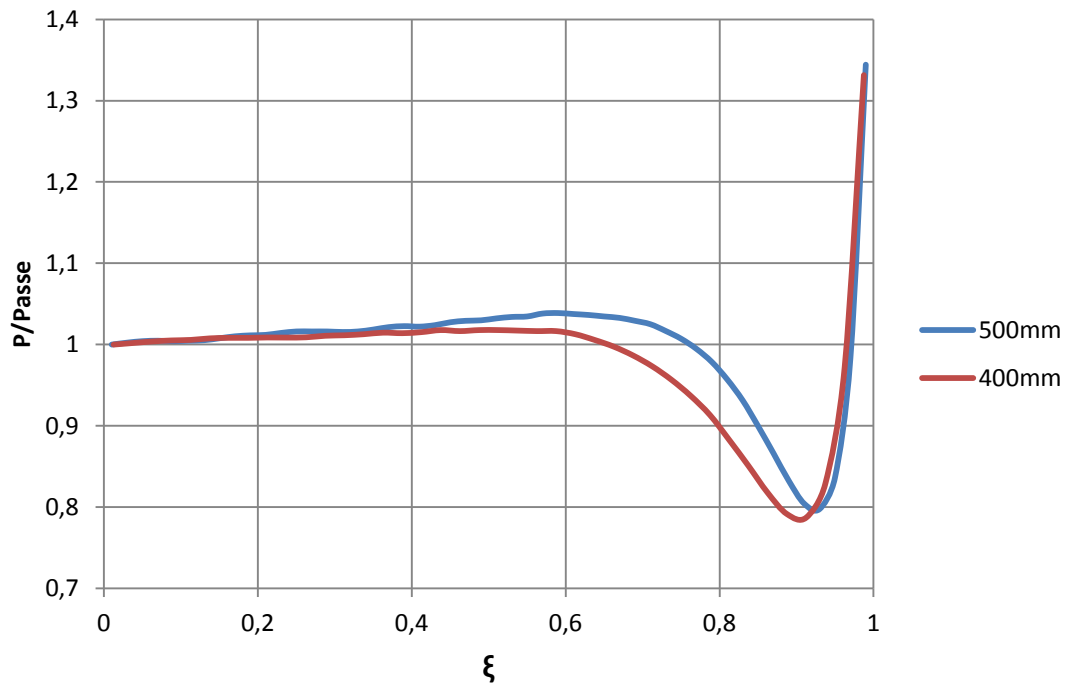


Fig. 6.18 Distribuzione della potenza indotta nella larghezza del nastro per un modulo IPM largo 500mm, per due diverse larghezze del nastro 400mm e 500mm

Per la configurazione IPM, lasciando costante la larghezza del modulo, la distribuzione di potenza varia molto poco al variare della larghezza del nastro. La potenza indotta sul bordo del nastro rimane costante per le due diverse larghezze del nastro.

Per il modulo SPM con il nastro largo 500mm e il modulo largo 500mm la potenza totale indotta per unità di larghezza del nastro è 69,2kW/m, mentre con il nastro largo 400mm e il modulo largo 500mm la potenza totale indotta per unità di larghezza del nastro è 67,6kW/m.

Per il modulo IPM con il nastro largo 500mm e il modulo largo 500mm la potenza totale indotta per unità di larghezza del nastro è 33,5kW/m, mentre con il nastro largo 400mm e il modulo largo 500mm la potenza totale indotta per unità di larghezza del nastro è 30,8kW/m.

Capitolo 7

Distribuzione della temperatura

Il campo scalare di temperatura all'interno di un corpo con generazione interna di calore è descritto dall'equazione differenziale di Fourier:

$$c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} \vartheta) + w$$

Dove:

- $c \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ è il calore specifico
- $\gamma \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ è la densità
- ϑ [K] è la temperatura nel punto
- $\lambda \left[\frac{W}{mK} \right]$ conducibilità termica
- $w \left[\frac{W}{m^3} \right]$ Potenza specifica per unità di volume

Per determinare la soluzione dell'equazione di Fourier è necessario assegnare la distribuzione di temperatura iniziale all'interno del corpo e le modalità di scambio termico tra il corpo e l'ambiente che lo circonda.

Il calore scambiato con l'esterno per unità di superficie è dato da:

$$q = \alpha_c (\vartheta_{superficie} - \vartheta_{ambiente}) + \varepsilon \sigma_n \left[(\vartheta_{superficie})^4 + (\vartheta_{ambiente})^4 \right]$$

Con:

- $\alpha_c \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ coefficiente di scambio termico per convezione
- ε emissività alluminio
- $\sigma_n \left[\frac{W}{m^2K^4} \right]$ è la costante di radiazione del corpo nero

7.1 Simulazione transitorio termico 2D

Come si è visto nei capitoli precedenti la distribuzione di potenza è costante nello spessore del nastro ma variabile nella sua larghezza, perciò è necessario studiare la distribuzione di temperatura nella larghezza del nastro durante e alla fine del riscaldamento. Si è fatta una simulazione del transitorio termico 2D dove il nastro è stato diviso in strisce della larghezza di 5mm (fig. 7.1), il problema è simmetrico rispetto al centro del nastro. In ogni striscia si è imposta una generazione di calore corrispondente alla potenza indotta calcolata nella corrispondente striscia della simulazione 3D.

La potenza indotta nel nastro è moltiplicata per un segnale chiamato T_ON che può valere 0 oppure 1, il quale simula il passaggio del nastro attraverso i moduli.

Quando il nastro è affacciato al modulo c'è potenza indotta perciò T_ON=1, quando il nastro si trova tra due moduli la potenza indotta è nulla perciò T_ON=0

Nelle simulazioni si è imposto:

- Temperatura iniziale 20°C
- Coefficiente di convezione $\alpha_c = 70 \frac{W}{m^2K}$
- Nullo lo scambio termico per irraggiamento dato le temperature non troppo elevate e la bassa emissività dell'alluminio ($\varepsilon = 0,04 \div 0,06$)
- Conduttività termica $\lambda = 235 \frac{W}{mK}$
- Capacità termica volumetrica $c \cdot \gamma = 2530000 \frac{J}{m^3K}$

Fig. 7.1 Sezione del nastro, suddiviso in strisce

7.2 Transitorio termico per la configurazione SPM

La profondità del dominio nella simulazione 2D del transitorio termico è 0,15m che corrisponde alla lunghezza del modulo SPM. In ogni striscia del nastro si è imposta una generazione interna di calore corrispondente alla potenza indotta in quella striscia dal modulo SPM, ricavata nella simulazione 3D dello scenario di riferimento (tab. 6.1) con il nastro largo 500mm come la larghezza del modulo.

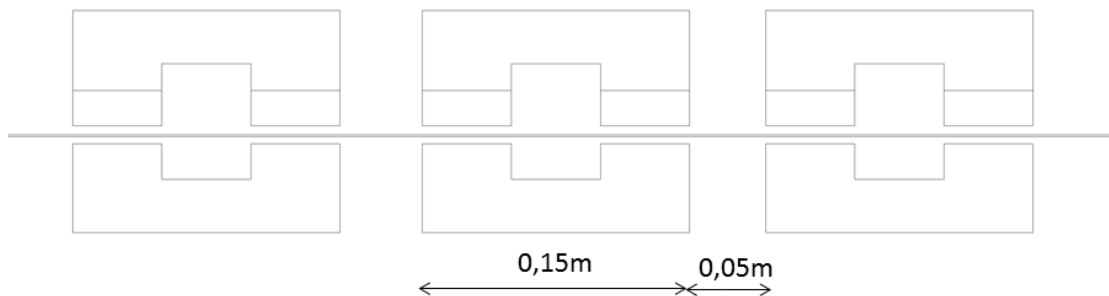


Fig. 7.2 Configurazione SPM con più moduli in serie

La lunghezza del modulo SPM è 0,15m e la distanza tra due moduli è 0,05m (fig.7.2). Se il nastro si sposta ad una velocità 10m/s (come avviene nello scenario di riferimento) il nastro impiega 15ms per transitare sotto il modulo SPM e 5ms per raggiungere il modulo successivo.

Perciò la potenza interna è moltiplicata per T_ON che è un segnale periodico che ha periodo 20ms, nei quali per 15ms vale 1 e per 5ms vale 0, in fig. 7.3 sono riportati due periodi di T_ON .

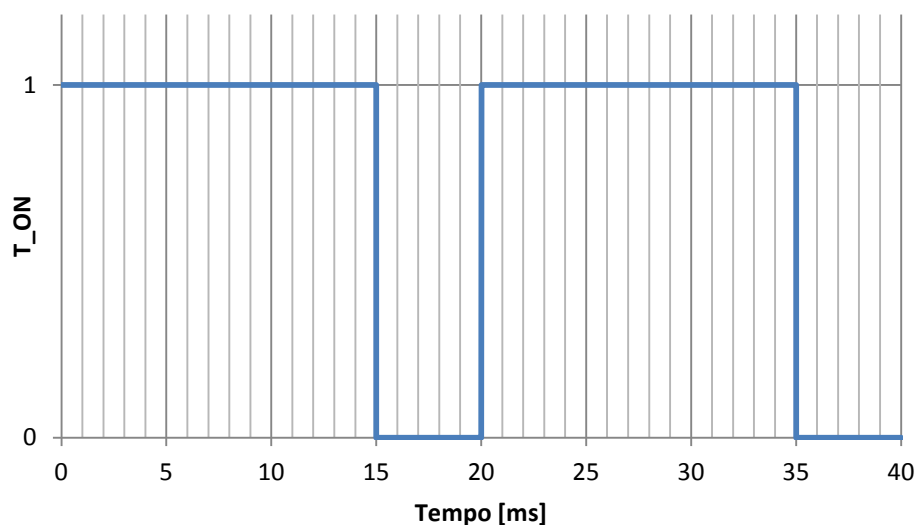


Fig. 7.3 Segnale T_ON

Distribuzione temperatura

Nella fase di annealing si deve portare il nastro dall'alluminio ad una temperatura compresa tra 300 e 400°C, l'incremento di temperatura del nastro dovuto al passaggio sotto un modulo è:

$$\Delta T_{modulo} = \frac{P \cdot t}{V \cdot \gamma \cdot c}$$

Dove:

- $c \cdot \gamma = 2530000 \frac{J}{m^3 K}$ è la capacità termica volumetrica
- V è il volume del nastro considerato $V = l \cdot h \cdot w$, l è la lunghezza 0,15m, h l'altezza 0,001m e w la larghezza 0,5m
- t è il tempo impiegato per attraversare il modulo 15ms
- P è la potenza totale indotta 34600W

Sostituendo si ottiene:

$$\Delta T_{modulo} = \frac{P \cdot t}{l \cdot h \cdot w \cdot \gamma \cdot c}$$

Il rapporto tra la lunghezza del nastro considerato w e il tempo t impiegato per attraversare il modulo è la velocità del nastro, perciò si ottiene:

$$\Delta T_{modulo} = \frac{P}{w \cdot h \cdot v \cdot \gamma \cdot c} = \frac{34600}{0,5 \cdot 0,001 \cdot 10 \cdot 2530000} = 2,73^\circ C \quad (7.1)$$

Numero di moduli necessari per aumentare la temperatura del nastro di 380°C è:

$$N = \frac{\Delta T_{totale}}{\Delta T_{modulo}} = \frac{380}{2,73} = 139 \text{ moduli}$$

Teoricamente sono necessari 139 moduli SPM in serie per portare il nastro da 20°C a 400°C, considerando che si vuole raggiungere una temperatura compresa tra 300 e 400°C si può utilizzare un numero minore di moduli.

Si è simulato il passaggio attraverso 130 moduli (è stata fornita potenza al nastro per un tempo di $130 \cdot 0,02 = 2,6s$ sempre con andamento a gradini) e successivamente un periodo di 2 secondi nei quali la potenza all'interno del nastro è nulla per vedere se la temperatura nel nastro si equalizza.

Distribuzione temperatura

Le distribuzioni di temperatura nel nastro a fine riscaldamento e ad 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento sono riportati in fig. 7.4.

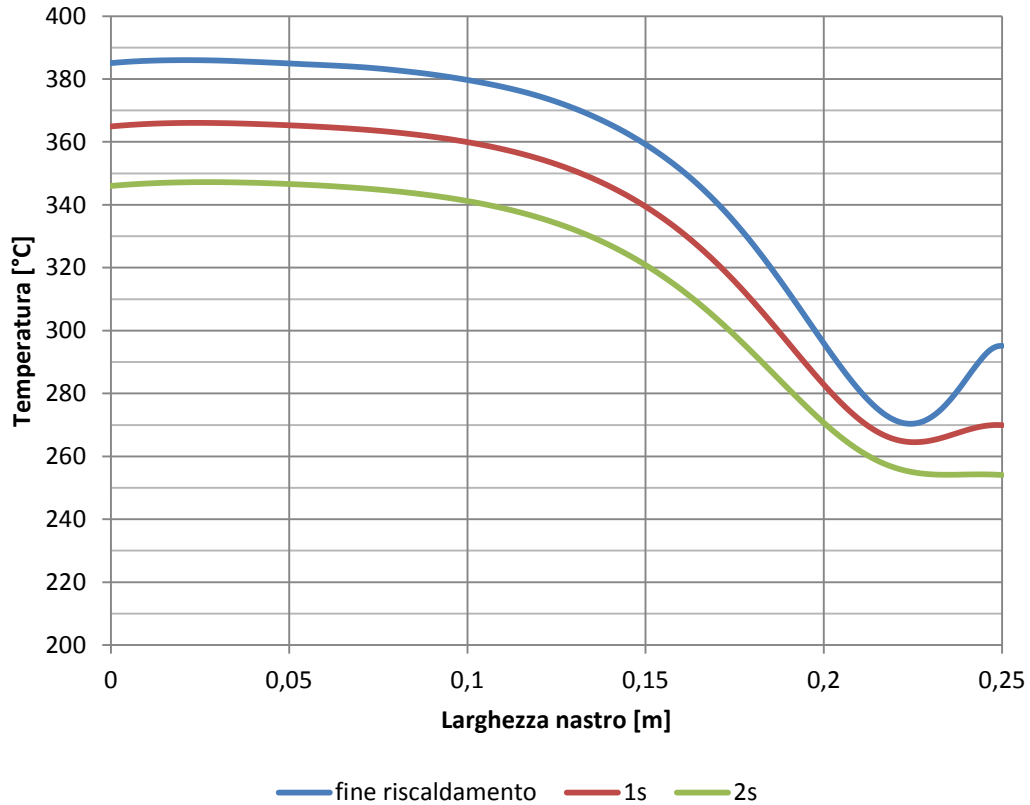


Fig. 7.4 Distribuzione della temperatura del nastro alla fine del riscaldamento ed a 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento per la configurazione SPM

Nella Tab. 7.1 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate: la temperatura media, massima, minima e la massima differenza di temperatura nel nastro. Si considera il tempo zero l'istante in cui termina il riscaldamento.

Tab. 7.1 Equalizzazione della temperatura a fine riscaldamento

Tempo [s]	0	1	2
Temperatura media[°C]	350,6	332,7	315,9
Temperatura massima[°C]	386	366	347
Temperatura minima [°C]	270	264	254
Differenza di temperatura [°C]	116	101	93

Distribuzione temperatura

Si è calcolato la distribuzione di temperatura nella larghezza del nastro in quattro istanti: alla fine del riscaldamento, e ad $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ e $\frac{3}{4}$ del tempo di riscaldamento. Il tempo di riscaldamento vale 2,6s ed è stato indicato con T. I risultati sono riportati in fig. 7.5.

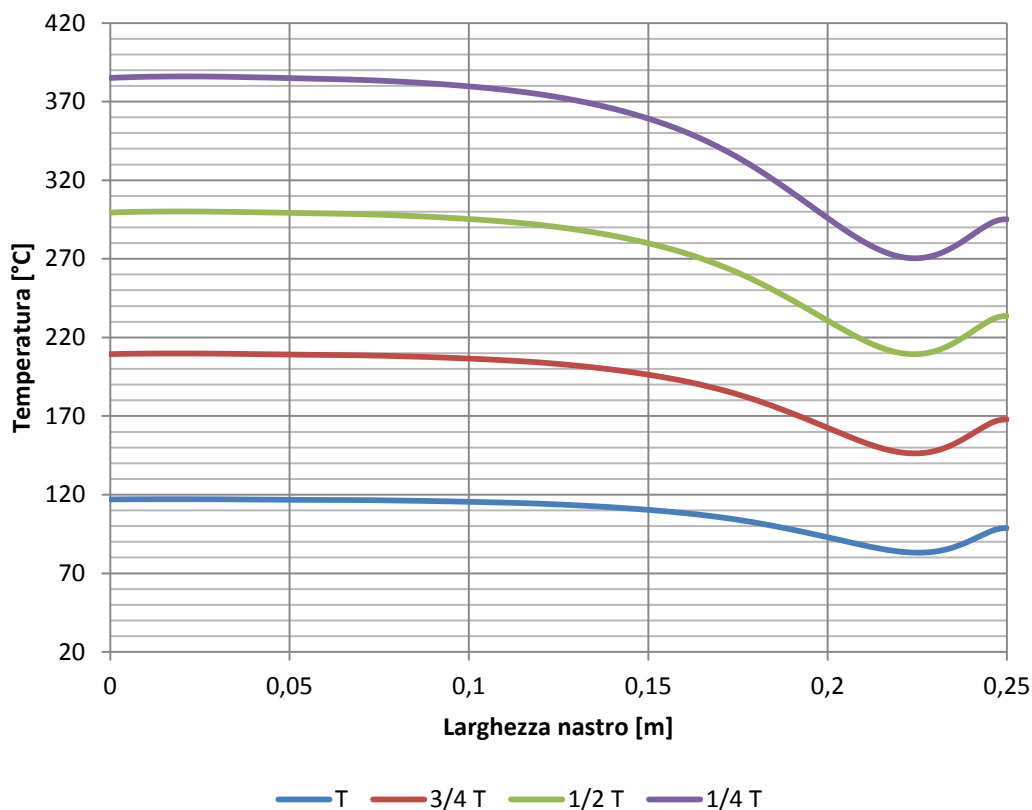


Fig. 7.5 Distribuzione della temperatura del nastro durante il riscaldamento

Nella tabella 7.2 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate durante il riscaldamento.

Tab. 7.2 Variazione della temperatura durante il riscaldamento

Tempo	$\frac{1}{4}T$	$\frac{2}{4}T$	$\frac{3}{4}T$	T
Temperatura media[°C]	108	191	273	351
Temperatura massima[°C]	117	210	300	386
Temperatura minima [°C]	83	146	209	270
Differenza di temperatura [°C]	34	64	91	115

Distribuzione temperatura

7.3 Transitorio termico per la configurazione IPM

La profondità del dominio nella simulazione 2D del transitorio termico è 0,1m che corrisponde alla lunghezza del modulo IPM. In ogni striscia del nastro si è imposta una generazione interna di calore corrispondente alla potenza indotta in quella striscia dal modulo IPM, ricavata nella simulazione 3D dello scenario di riferimento con il nastro largo 500mm come la larghezza del modulo.

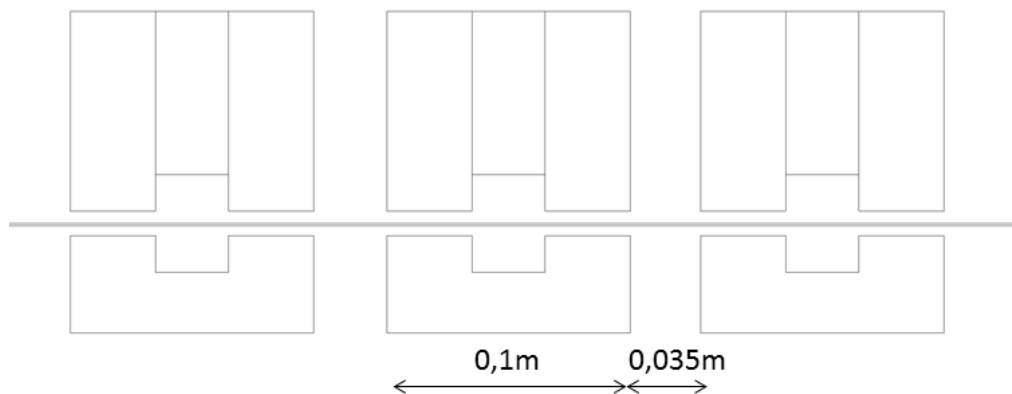


Fig. 7.6 Configurazione IPM con più moduli in serie

La lunghezza del modulo IPM è 0,1m e la distanza tra due moduli è 0,035m (fig.7.6). Se il nastro si sposta ad una velocità 10m/s (come avviene nello scenario di riferimento) il nastro impiega 10ms per transitare sotto il modulo IPM e 3,5ms per raggiungere il modulo successivo.

Perciò la potenza interna è moltiplicata per T_ON che è un segnale periodico che ha periodo 13,5ms, nei quali per 10ms vale 1 e per i restanti 3,5ms vale 0, in fig. 7.7 è riportato due periodi di T_ON .

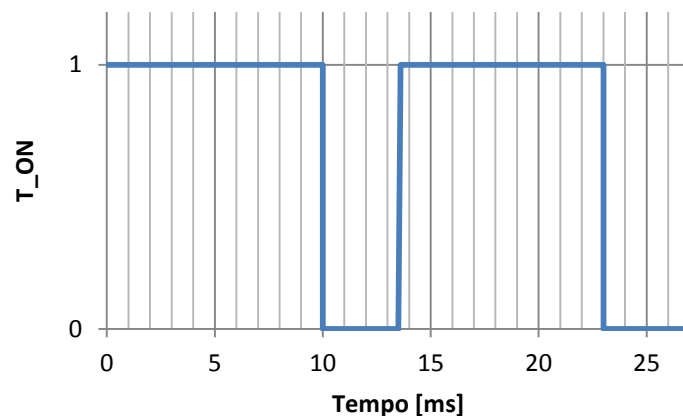


Fig. 7.7 Segnale T_ON per la configurazione IPM

Distribuzione temperatura

La potenza totale indotta è $P=16600W$.

L'incremento di temperatura del nastro dovuto al passaggio attraverso un modulo, utilizzando la relazione 7.1, è:

$$\Delta T_{modulo} = \frac{P}{w \cdot h \cdot v \cdot \gamma \cdot c} = \frac{16600}{0,5 \cdot 0,001 \cdot 10 \cdot 2530000} = 1,31^{\circ}C$$

Numero di moduli necessari per aumentare la temperatura del nastro di $380^{\circ}C$ è:

$$N = \frac{\Delta T_{totale}}{\Delta T_{modulo}} = \frac{380}{1,31} = 290 \text{ moduli}$$

Teoricamente sono necessari 290 moduli IPM in serie per portare il nastro da $20^{\circ}C$ a $400^{\circ}C$, considerando le perdite termiche si deve utilizzare un numero maggiore di moduli. Rispetto all'utilizzo di moduli SPM il tempo di riscaldamento è maggiore, perciò è maggiore l'energia persa attraverso la superficie del nastro durante il riscaldamento.

Si è simulato il passaggio attraverso 315 moduli (è stata fornita potenza al nastro per un tempo di $315 \cdot 0,0135 = 4,25s$ sempre con andamento a gradini) e successivamente un periodo di 2 secondi nei quali la potenza all'interno del nastro è nulla, per vedere se la temperatura nel nastro si equalizza.

Distribuzione temperatura

Le distribuzioni di temperatura nel nastro a fine riscaldamento e ad 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento sono riportati in fig. 7.8.

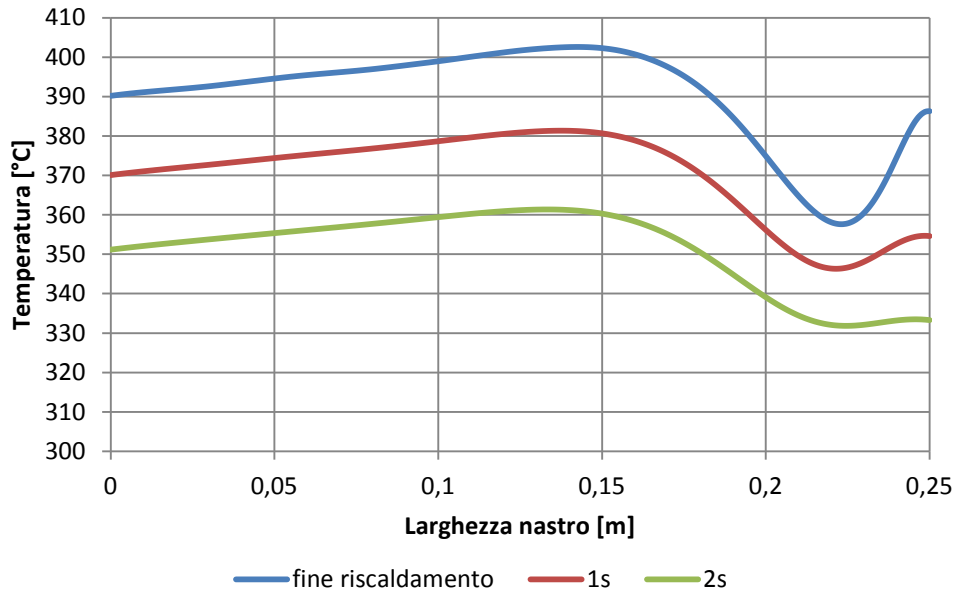


Fig. 7.8 Distribuzione della temperatura del nastro alla fine del riscaldamento ed a 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento

In tab. 7.3 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate: la temperatura media, massima, minima e la massima differenza di temperatura nel nastro. Si considera il tempo zero l'istante in cui termina il riscaldamento.

Tab. 7.3 Equalizzazione della temperatura a fine riscaldamento

Tempo [s]	0	1	2
Temperatura media [°C]	390	370	351
Temperatura massima [°C]	403	381	361
Temperatura minima [°C]	358	346	332
Differenza di temperatura [°C]	45	35	29

Distribuzione temperatura

Si è calcolato la distribuzione di temperatura nella larghezza del nastro in quattro istanti: alla fine del riscaldamento, e ad $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ e $\frac{3}{4}$ del tempo di riscaldamento. Il tempo di riscaldamento vale 4,25s ed è stato indicato con T. I risultati sono riportati in fig. 7.9.

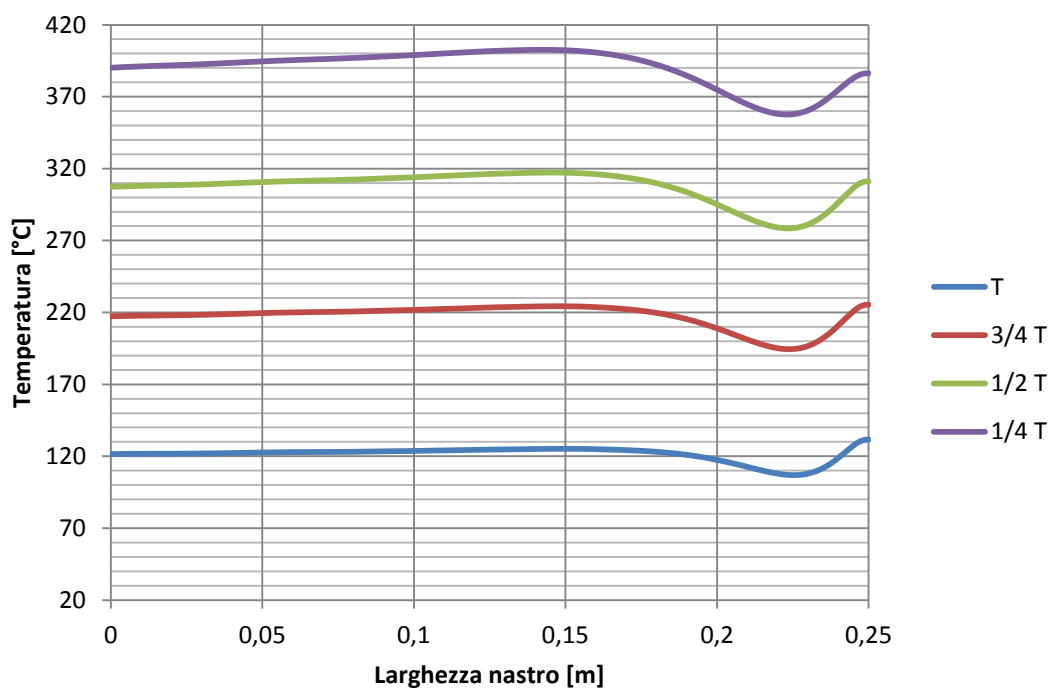


Fig. 7.9 Distribuzione della temperatura del nastro durante il riscaldamento

In tab. 7.4 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate durante il riscaldamento.

Tab. 7.4 Variazione della temperatura durante il riscaldamento

Tempo	$\frac{1}{4}T$	$\frac{2}{4}T$	$\frac{3}{4}T$	T
Temperatura media[°C]	121	217	307	390
Temperatura massima[°C]	132	225	317	402
Temperatura minima [°C]	107	194	278	357
Differenza di temperatura [°C]	25	31	39	45

La massima differenza di temperatura nel nastro aumenta durante il riscaldamento.

Distribuzione temperatura

7.4 Transitorio termico per la configurazione IPM con nastro stretto

In ogni striscia del nastro si è imposta una generazione interna di calore corrispondente alla potenza indotta in quella striscia dal modulo IPM, ricavata nella simulazione 3D dello scenario di riferimento con il nastro largo 400mm e il modulo largo 500mm. Si è simulato il passaggio attraverso 315 moduli, facendo le considerazioni fatte nel paragrafo precedente le distribuzioni di temperatura nel nastro a fine riscaldamento e ad 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento sono riportati in fig. 7.10.

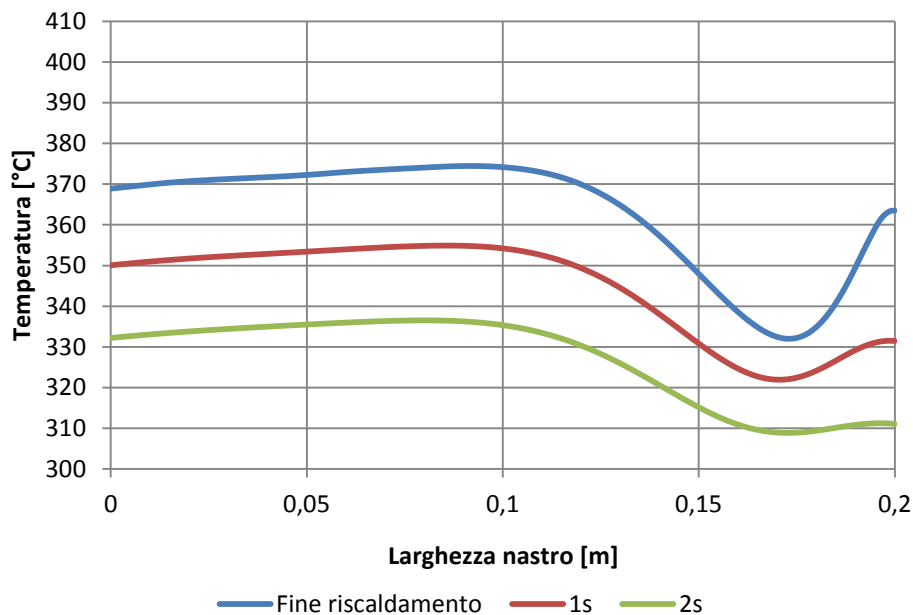


Fig. 7.10 Distribuzione della temperatura del nastro alla fine del riscaldamento ed a 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento con nastro stretto

In tab. 7.5 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate: la temperatura media, massima, minima e la massima differenza di temperatura nel nastro. Si considera il tempo zero l'istante in cui termina il riscaldamento.

Tab. 7.5 Equalizzazione della temperatura a fine riscaldamento

Tempo [s]	0	1	2
Temperatura media [°C]	363	344	327
Temperatura massima [°C]	374	355	336
Temperatura minima [°C]	332	322	309
Differenza di temperatura [°C]	42	33	27

Distribuzione temperatura

Si è calcolato la distribuzione di temperatura nella larghezza del nastro in quattro istanti: alla fine del riscaldamento, e ad $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ e $\frac{3}{4}$ del tempo di riscaldamento. Il tempo di riscaldamento vale 4,25s ed è stato indicato con T. I risultati sono riportati in fig. 7.11.

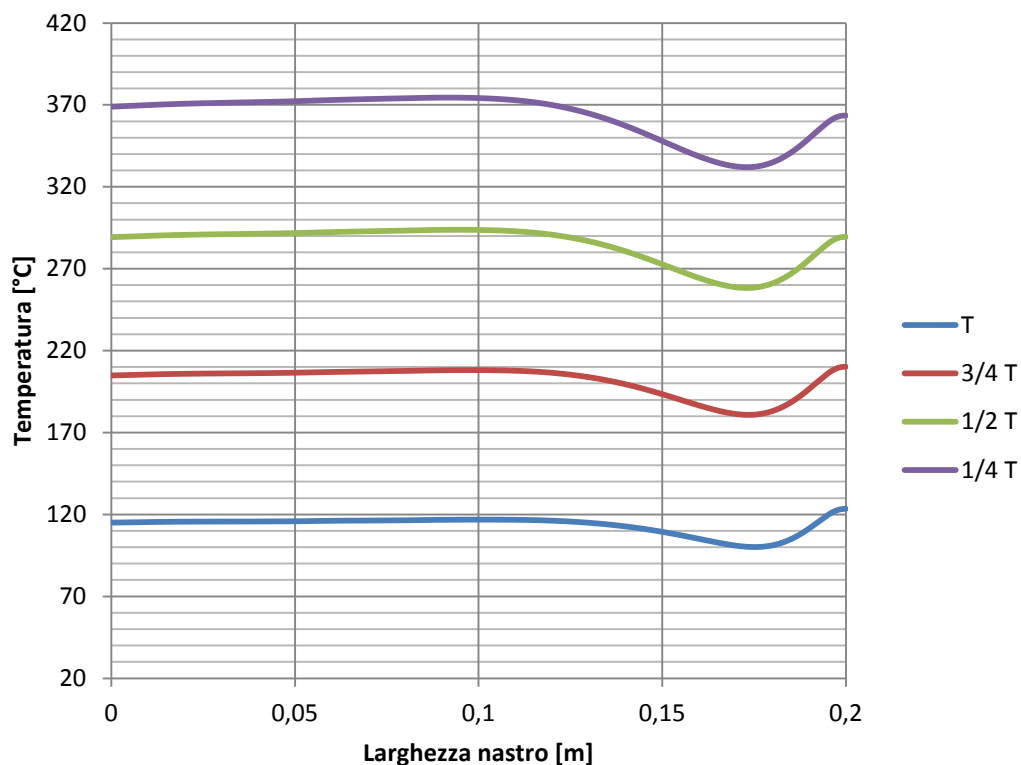


Fig. 7.11 Distribuzione della temperatura del nastro durante il riscaldamento con nastro stretto

In tab. 7.6 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate durante il riscaldamento.

Tab. 7.6 Variazione della temperatura durante il riscaldamento

Tempo	$\frac{1}{4}T$	$\frac{2}{4}T$	$\frac{3}{4}T$	T
Temperatura media[°C]	113	202	285	363
Temperatura massima[°C]	123	210	294	374
Temperatura minima [°C]	100	181	258	332
Differenza di temperatura [°C]	23	29	36	42

7.5 Conclusioni

Il riscaldamento con moduli SPM è molto veloce, sono necessari solo 2,6 secondi e 130 moduli per portare da 20°C a 351°C un nastro d'alluminio che si muove ad una velocità di 10m/s dello spessore di 1mm.

Tramite il riscaldamento con moduli SPM a fine riscaldamento si ha una distribuzione di temperatura troppo disuniforme. Riscaldando il nastro ad una temperatura di 351°C partendo dalla temperatura iniziale di 20°C si ha una differenza di temperatura di 116°C all'interno del nastro, che non è accettabile. A fine riscaldamento nella zona centrale del nastro la temperatura è costante mentre diminuisce vicino ai bordi.

Anche il riscaldamento con moduli IPM è molto veloce, sono necessari 4,25 secondi e 315 moduli per portare da 20 a 390°C un nastro d'alluminio che si muove ad una velocità di 10m/s dello spessore di 1mm.

Tramite il riscaldamento con moduli IPM a fine riscaldamento si ha una distribuzione di temperatura abbastanza uniforme. Riscaldando il nastro ad una temperatura di 390°C partendo dalla temperatura iniziale di 20°C si ha una differenza di temperatura di 45°C all'interno del nastro, dopo due secondi dalla fine del riscaldamento la differenza di temperatura all'interno del nastro è solo 29°C. I moduli IPM si prestano bene anche a scaldare nastri di larghezza inferiore alla larghezza dei modulo.

Capitolo 8

Miglioramento della distribuzione di temperatura

Come si è visto nel capitolo precedente, utilizzando moduli SPM, alla fine del riscaldamento si ha una distribuzione della temperatura non uniforme nella larghezza del nastro. In particolare in prossimità del bordo si ha una diminuzione della temperatura.

Per migliorare la distribuzione della temperatura a fine riscaldamento si è pensato di alternare un modulo SPM standard e un modulo SPM modificato nella serie di moduli che costituirà la macchina finale.

Il modulo SPM modificato fig. 8.1 è costituito da due moduli SPM standard di larghezza ridotta posti alle estremità del nastro, in modo tale da indurre potenza solo nella parte del nastro vicina al bordo. Le parti in blu rappresentano i magneti, quelle in giallo le parti in ferro e in rosso il nastro d'alluminio.

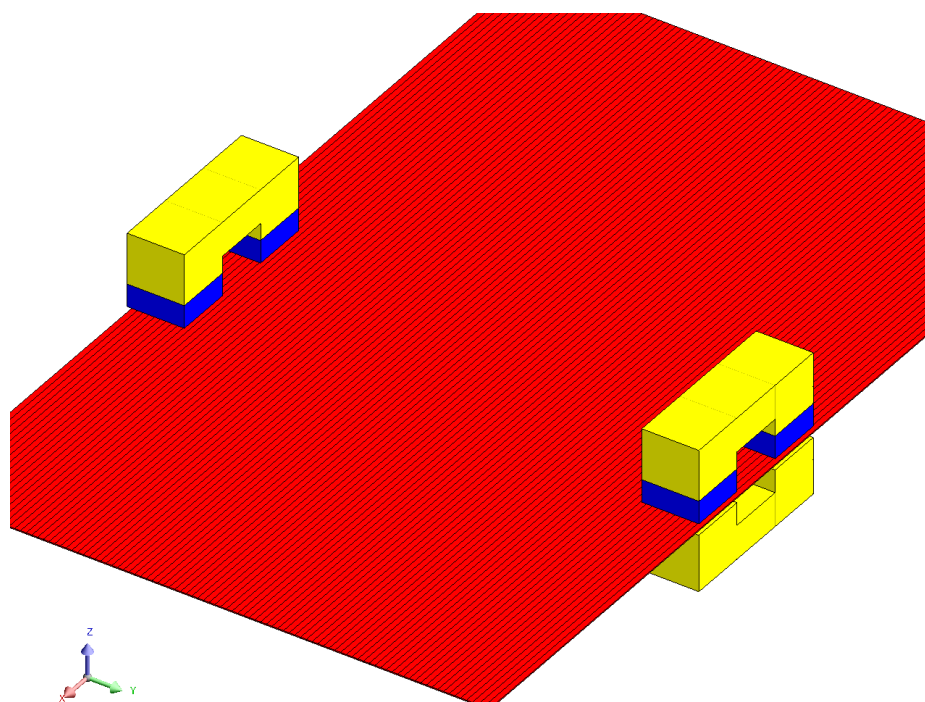


Fig. 8.1 Modulo SPM modificato

Il modello è simmetrico perciò nelle simulazioni, per ridurre il costo computazionale, si è imposto la simmetria sul piano passante per l'asse del nastro.

Miglioramento distribuzione temperatura

8.1 Distribuzione della densità di corrente

È stato risolto lo scenario di riferimento (tabella 6.1) con la larghezza del nastro di 500mm e con il modulo SPM modificato composto da due elementi larghi 50mm. La distribuzione della corrente su metà nastro (nella vista dall'alto) è riportata in fig.8.2, il nastro si muove da sinistra verso destra, i risultati sono speculari rispetto al lato in basso e le linee nere rappresentano il modulo.

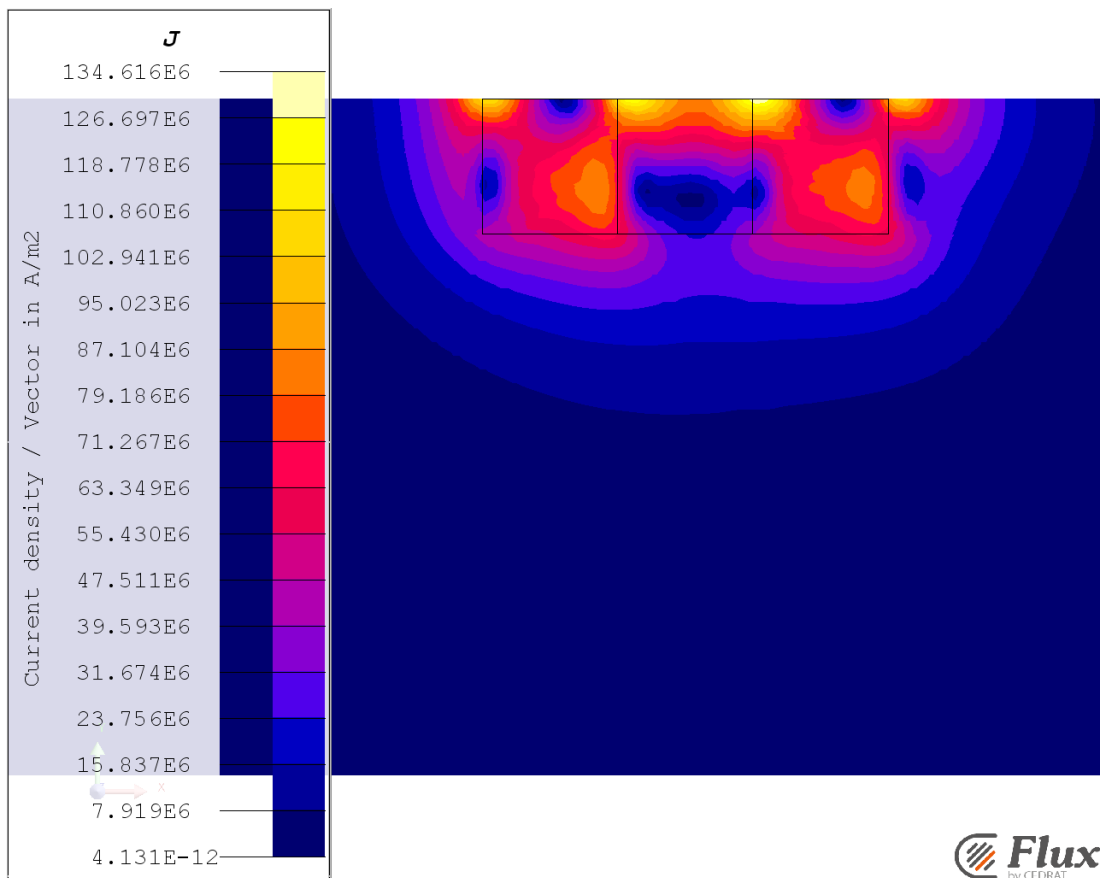


Fig. 8.2 Distribuzione della densità di corrente per la configurazione SPM modificata nello scenario di riferimento

8.2 Distribuzione della potenza indotta

La distribuzione della potenza indotta su metà nastro (nella vista dall'alto) è riportata in fig. 8.3.

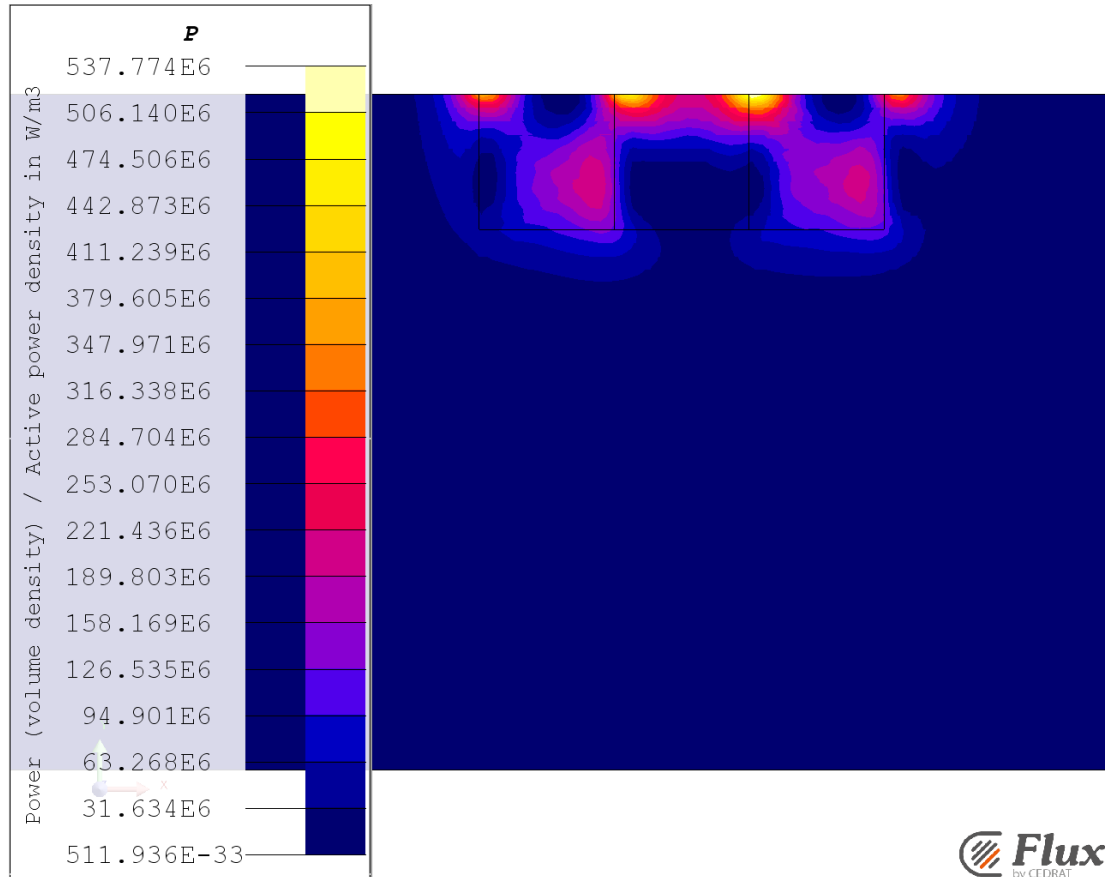


Fig. 8.3 Distribuzione della potenza indotta per la configurazione SPM modificata nello scenario di riferimento

Il nastro è stato suddiviso longitudinalmente in strisce di larghezza 5mm altezza 1mm (lo spessore del nastro) e lunghezza uguale alla lunghezza del nastro. Nello scenario di riferimento, alla fine del transitorio, si è calcolato per ciascuna striscia l'integrale triplo nel volume della densità volumetrica di potenza persa per effetto joule. I risultati sono stati utilizzati per creare i vari grafici. In fig. 8.4 è riportato l'andamento della potenza specifica riferita alla potenza indotta al centro del nastro con modulo SPM standard, per il modulo SPM modificato e per quello standard, in funzione della larghezza del nastro, prendendo l'asse del nastro come coordinata 0.

Miglioramento distribuzione temperatura

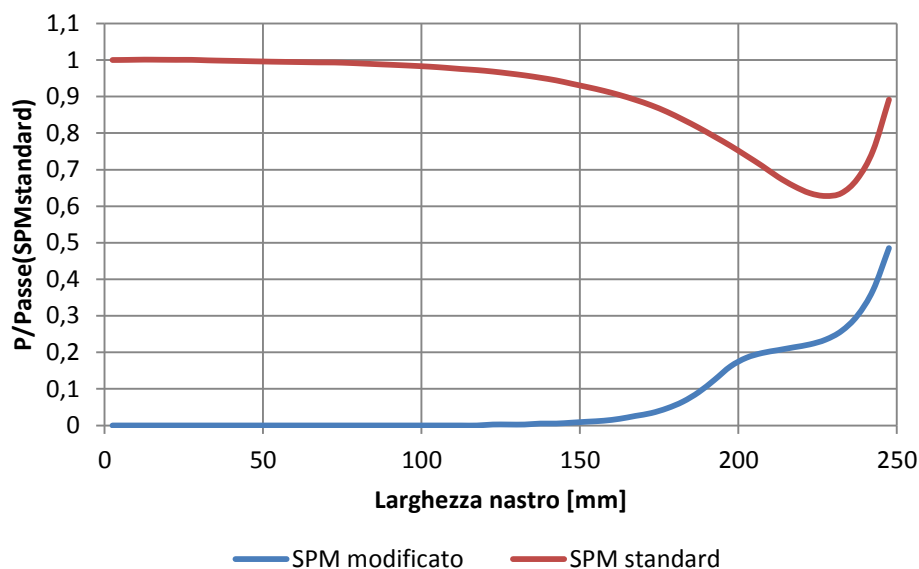


Fig. 8.4 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM modificata e per quella standard, riferita alla potenza indotta al centro del nastro dal modulo SPM standard

Il modulo SPM modificato induce potenza proprio nella parte del nastro dove il modulo SPM standard induce meno potenza, mentre è nulla la potenza che induce al centro del nastro dove la distribuzione di temperatura a fine riscaldamento, con moduli SPM standard, è accettabile.

È stata calcolata la distribuzione, nella larghezza del nastro, della potenza indotta utilizzando una coppia di moduli diversi in serie (SPM standard e SPM modificato) ed è stata confrontata con la distribuzione di potenza indotta con il solo modulo SPM standard fig. 8.5.

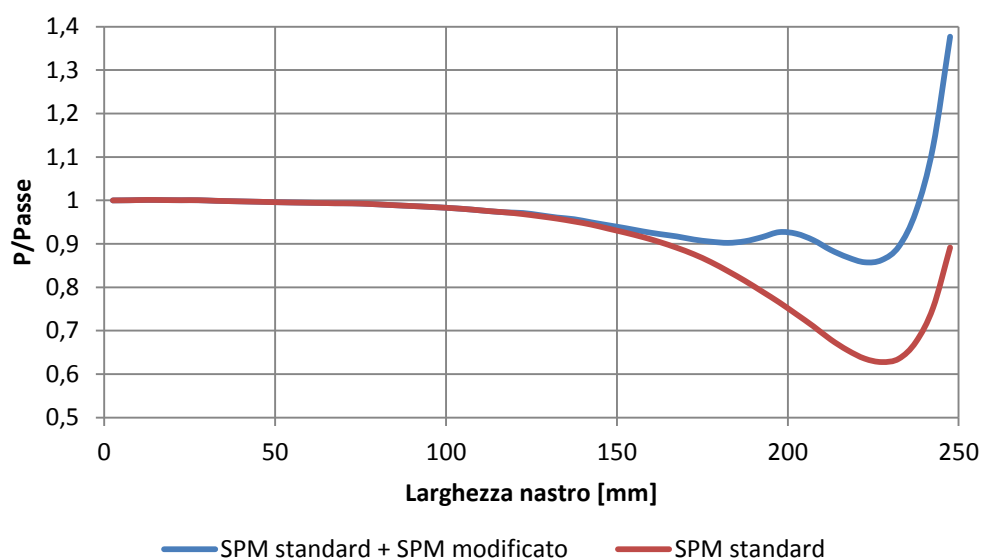


Fig. 8.5 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la coppia SPM modificato e SPM standard e per il solo modulo SPM standard

Miglioramento distribuzione temperatura

La potenza totale indotta da un modulo SPM standard nello scenario di riferimento con il nastro largo 500mm è 34,6kW.

La potenza totale indotta da un modulo SPM modificato costituito da due elementi larghi 50mm, nello scenario di riferimento, con il nastro largo 500mm è 2,5kW.

8.3 Distribuzione della temperatura

Per ottenere la distribuzione di temperatura all'interno del nastro a fine riscaldamento è stata fatta una simulazione 2D del transitorio termico. In fig. 8.6 è riportato il modello termico



Fig. 8.6 Sezione del nastro, suddiviso in strisce

La potenza totale indotta dalla coppia SPM standard e SPM modificato è 37,1kW. La profondità del dominio nella simulazione 2D è 0,15m che corrisponde alla lunghezza del modulo SPM. In ogni striscia del nastro nella simulazione termica 2D si è imposta una generazione interna di calore.

Per ogni striscia la generazione interna di calore corrisponde alla somma della potenza indotta in quella striscia dal modulo SPM standard e dal modulo SPM modificato, ricavata dalla simulazione 3D nello scenario di riferimento con il nastro largo 500mm.

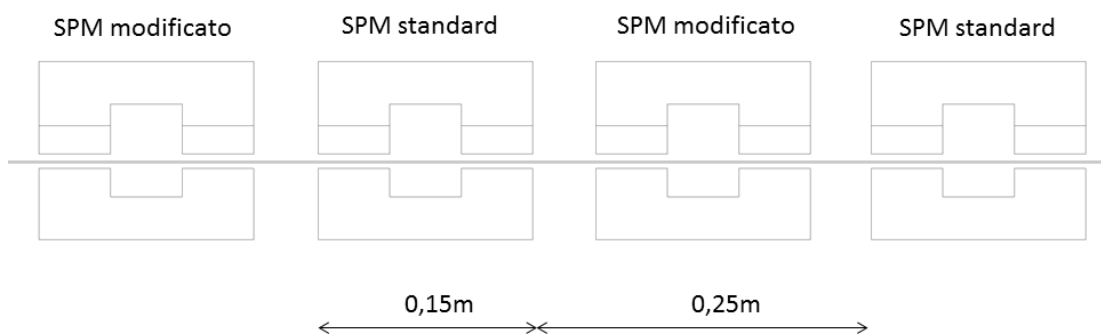


Fig. 8.7 Configurazione SPM con più moduli in serie

Miglioramento distribuzione temperatura

La lunghezza del modulo SPM standard e SPM modificato è sempre 0,15m e la distanza tra due moduli è 0,05m. Se il nastro si sposta ad una velocità 10m/s (come avviene nello scenario di riferimento) il nastro impiega 15ms per transitare attraverso un modulo SPM e 25ms per raggiungere la coppia di moduli successivi (fig.8.7). Dato che nella simulazione la generazione interna di potenza nel nastro è la somma della potenza indotta con SPM standard ed SPM modificato la generazione interna di calore è moltiplicata per T_ON che è un segnale periodico che ha periodo 40ms, nei quali per 15ms vale 1 e per 25ms vale 0, in fig. 8.8 sono riportati due periodi di T_ON.

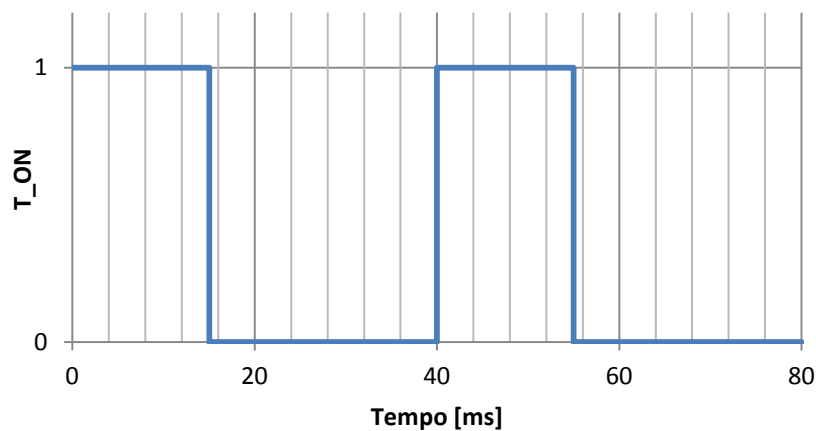


Fig. 8.8 Segnale T_ON

Nella fase di annealing si deve portare il nastro d'alluminio ad una temperatura compresa tra 300 e 400°C, l'incremento di temperatura del nastro dovuto al passaggio attraverso la coppia di moduli costituita da un modulo SPM standard ed uno modificato, utilizzando la formula 7.1, è:

$$\Delta T_{coppia\ moduli} = \frac{P}{w \cdot h \cdot v \cdot \gamma \cdot c} = \frac{37100}{0,5 \cdot 0,001 \cdot 10 \cdot 2530000} = 2,93^{\circ}C$$

Il numero di coppie di moduli necessari per aumentare la temperatura del nastro di 380°C è:

$$N = \frac{\Delta T_{totale}}{\Delta T_{coppia\ moduli}} = \frac{380}{2,93} = 130\ coppie\ moduli$$

Si è simulato il passaggio attraverso 130 coppie di moduli (è stata fornita potenza al nastro per un tempo di $130 \cdot 0,04 = 5,2s$ sempre con andamento a gradini) e successivamente un periodo di 2 secondi nei quali la potenza all'interno del nastro è nulla per vedere se la temperatura nel nastro si equalizza.

Miglioramento distribuzione temperatura

Nelle simulazioni si è imposto:

- Temperatura iniziale 20°C
- Coefficiente di convezione $\alpha_c = 70 \frac{W}{m^2K}$
- Nullo lo scambio termico per irraggiamento dato le temperature non troppo elevate e la bassa emissività dell'alluminio ($\varepsilon = 0,04 \div 0,06$)
- Conduttività termica $\lambda = 235 \frac{W}{mK}$
- Capacità termica volumetrica $c \cdot \gamma = 2530000 \frac{J}{m^3K}$

Le distribuzioni di temperatura nel nastro a fine riscaldamento e ad 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento sono riportati in fig. 8.9.

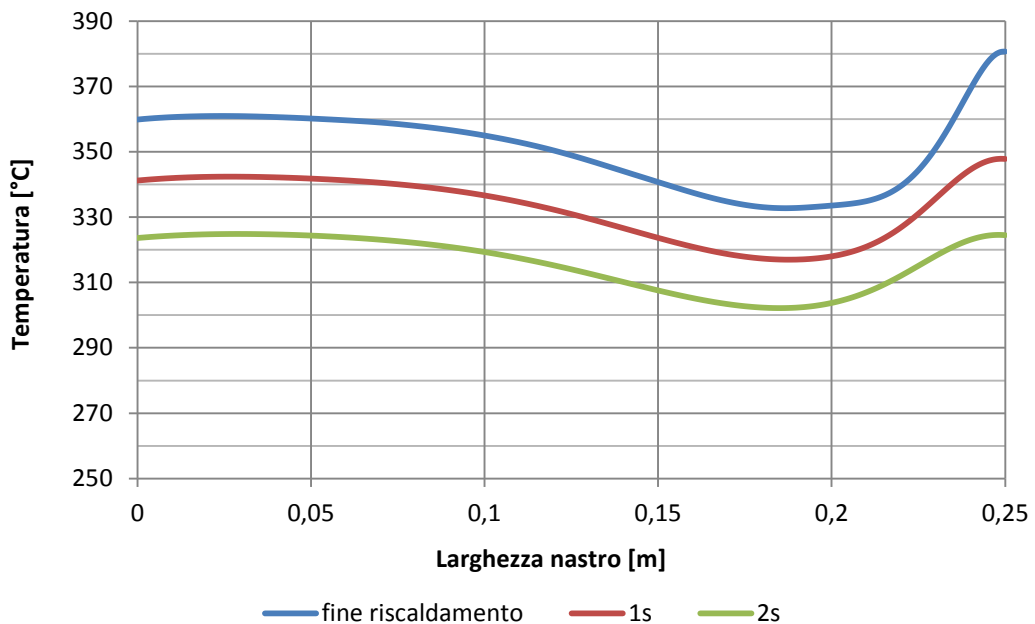


Fig. 8.9 Distribuzione della temperatura del nastro alla fine del riscaldamento ed a 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento utilizzando coppie di moduli SPM standard e SPM modificato

Nella tabella 8.1 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate: la temperatura media, massima, minima e la massima differenza di temperatura nel nastro. Si considera il tempo zero l'istante in cui termina il riscaldamento.

Tabella 8.1 Equalizzazione della temperatura a fine riscaldamento

Tempo [s]	0	1	2
Temperatura media[°C]	351	333	316
Temperatura massima[°C]	381	348	325
Temperatura minima [°C]	333	317	302
Differenza di temperatura [°C]	48	31	23

Miglioramento distribuzione temperatura

Si è calcolato la distribuzione di temperatura nella larghezza del nastro in quattro istanti: alla fine del riscaldamento, e ad $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ e $\frac{3}{4}$ del tempo di riscaldamento. Il tempo di riscaldamento vale 5,2s ed è stato indicato con T. I risultati sono riportati in fig.8.10.

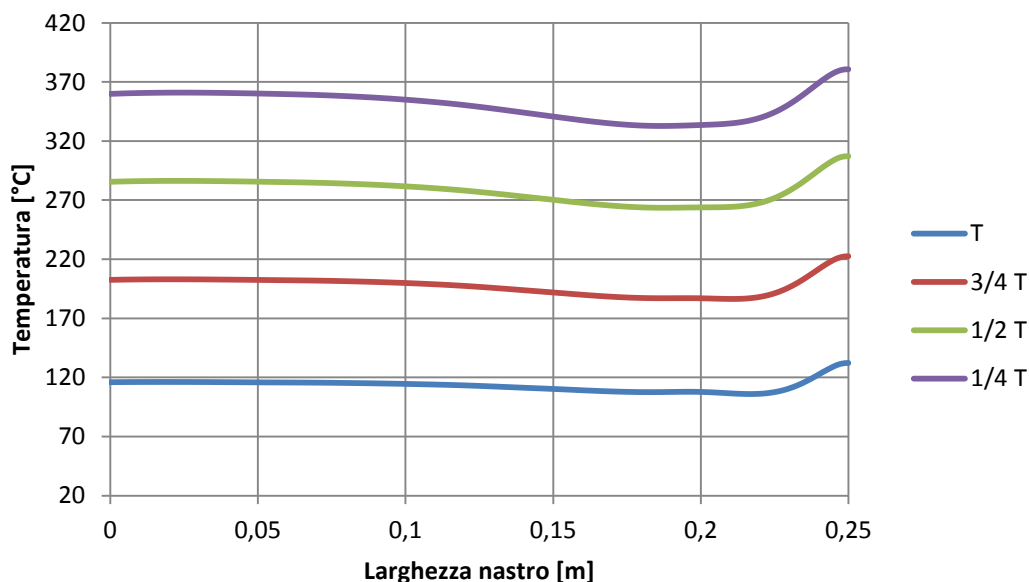


Fig. 8.10 Distribuzione della temperatura del nastro durante il riscaldamento tramite coppie di moduli SPM standard e SPM modificato

Nella tabella 8.2 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate durante il riscaldamento.

Tabella 8.2 Variazione della temperatura durante il riscaldamento

Tempo	$\frac{1}{4}T$	$\frac{2}{4}T$	$\frac{3}{4}T$	T
Temperatura media[°C]	113	197	278	351
Temperatura massima[°C]	132	222	307	381
Temperatura minima [°C]	106	186	263	333
Differenza di temperatura [°C]	26	36	44	48

Miglioramento distribuzione temperatura

Si è fatto un confronto tra la distribuzione di temperatura a fine riscaldamento dopo il passaggio attraverso 130 moduli SPM standard e attraverso 130 coppie di moduli. I risultati sono riportati in fig. 8.11.

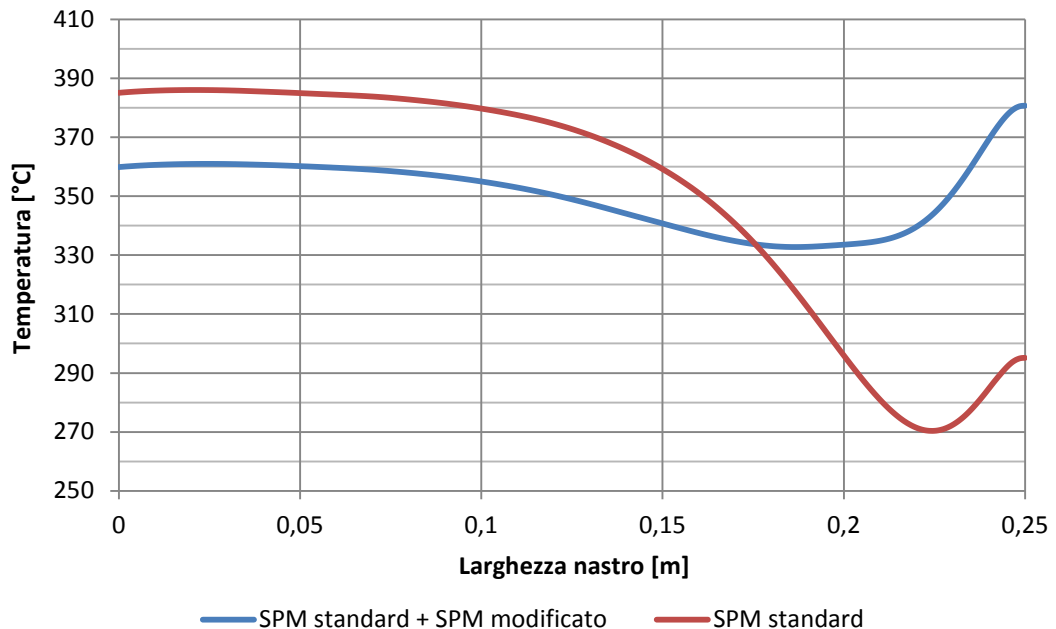


Fig. 8.11 Temperatura del nastro a fine riscaldamento utilizzando moduli SPM standard ed utilizzando coppie di moduli SPM standard e modificati

Nella tabella 8.3 sono riportate le principali grandezze calcolate alla fine del riscaldamento dopo il passaggio attraverso 130 moduli SPM standard e attraverso 130 coppie di moduli. La distribuzione di temperatura nel nastro è migliorata, la temperatura al centro del nastro a fine riscaldamento con l'utilizzo di coppie di moduli SPM standard e modificato è diminuita perché è aumentato il tempo di riscaldamento, aumentando di conseguenza l'energia ceduta dal nastro all'ambiente durante il transitorio di riscaldamento.

Tabella 8.3 Temperature a fine riscaldamento

	SPM standard + SPM modificato	SPM standard
Temperatura media [°C]	351	351
Temperatura massima [°C]	381	386
Temperatura minima [°C]	333	270
Differenza di temperatura [°C]	48	116

8.4 Distribuzione della temperatura con nastro stretto

Il modulo SPM modificato è sempre costituito da due moduli di larghezza 50mm posti sul bordo del nastro. Il traferro del modulo SPM modificato è stato aumentato in modo tale da ridurre la sua potenza indotta del 30%.

In fig. 8.12 è riportato l'andamento della potenza specifica riferita alla potenza indotta al centro del nastro con modulo SPM standard, per il modulo SPM modificato e per quello standard, in funzione della larghezza del nastro, prendendo l'asse del nastro come coordinata 0.

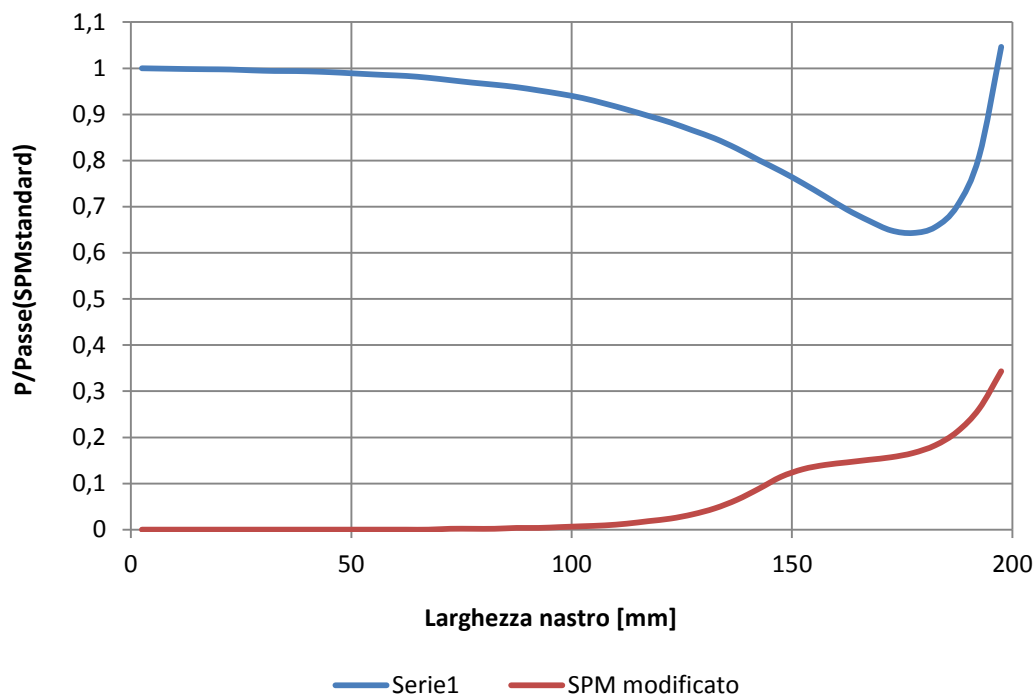


Fig. 8.12 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la configurazione SPM modificata e per quella standard, riferita alla potenza indotta al centro del nastro dal modulo SPM standard, con nastro largo 400mm.

È stata calcolata la distribuzione, nella larghezza del nastro, della potenza indotta utilizzando una coppia di moduli diversi in serie (SPM standard e SPM modificato) ed è stata confrontata con la distribuzione di potenza indotta con il solo modulo SPM standard fig. 8.13

Miglioramento distribuzione temperatura

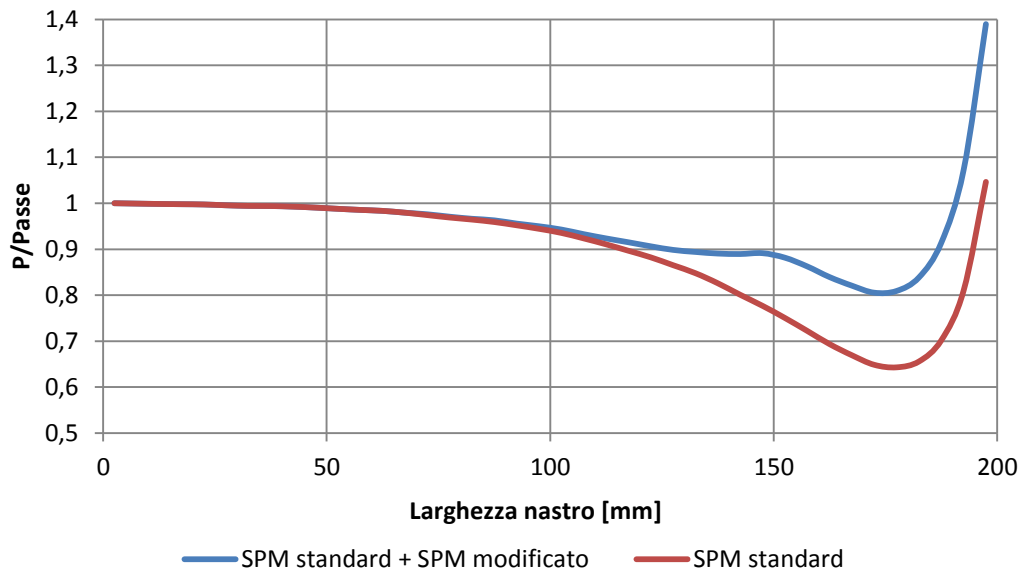


Fig. 8.13 Distribuzione della potenza nella larghezza del nastro per la coppia SPM modificato e SPM standard e per il solo modulo SPM standard

La coordinata x lungo la larghezza del nastro che ha l'asse del nastro come coordinata 0 è stata normalizzata.

$$\xi = \frac{x}{\text{larghezza nastro}/2}$$

In questo modo è possibile confrontare i profili di potenza indotta nella larghezza del nastro per diverse larghezze del nastro fig. 8.14 per la coppia di moduli SPM standard + SPM modificato.

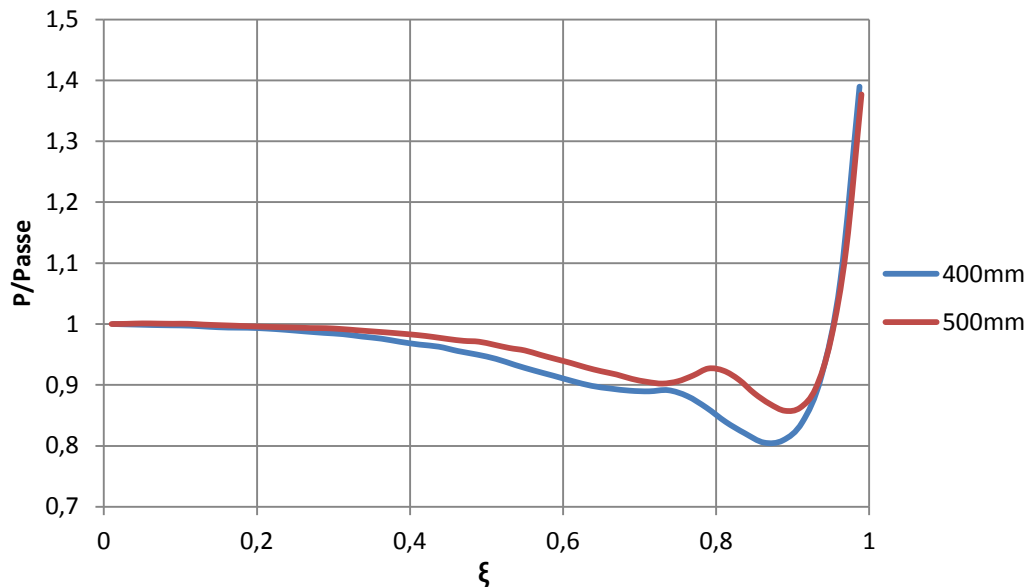


Fig. 8.14 Distribuzione della potenza indotta nella larghezza del nastro per la coppia SPM standard largo 500mm e SPM modificato, per due diverse larghezze del nastro 400mm e 500mm

Miglioramento distribuzione temperatura

Si è simulato il transitorio termico facendo le stesse considerazioni fatte nel paragrafo precedente. Per ogni striscia la generazione interna di calore corrisponde alla somma della potenza indotta in quella striscia dal modulo SPM standard e dal modulo SPM modificato, ricavata dalla simulazione 3D nello scenario di riferimento con il nastro largo 400mm e modulo SPM standard largo 500mm.

Si è simulato il passaggio attraverso 130 coppie di moduli.

Le distribuzioni di temperatura nel nastro a fine riscaldamento e ad 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento sono riportati in fig. 8.15.

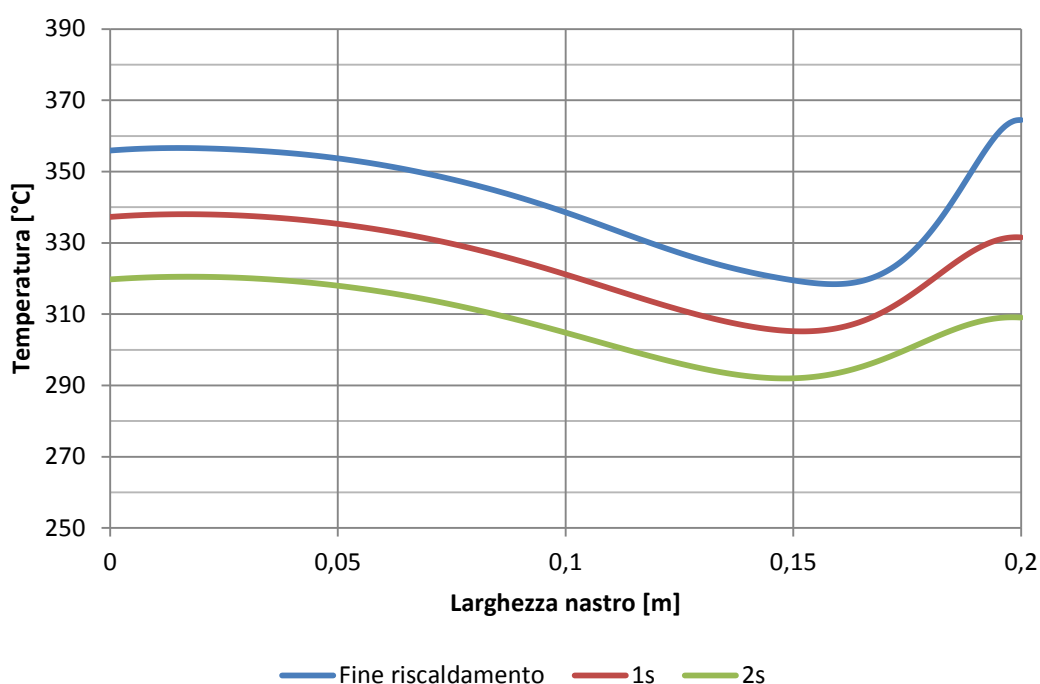


Fig. 8.15 Distribuzione della temperatura del nastro alla fine del riscaldamento ed a 1 e 2 secondi dalla fine del riscaldamento

Nella tabella 8.4 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate: la temperatura media, massima, minima e la massima differenza di temperatura nel nastro. Si considera il tempo zero l'istante in cui termina il riscaldamento.

Tabella 8.4 Equalizzazione della tempera a fine riscaldamento

Tempo [s]	0	1	2
Temperatura media [°C]	341	324	307
Temperatura massima [°C]	364	338	320
Temperatura minima [°C]	318	305	292
Differenza di temperatura [°C]	46	33	28

Miglioramento distribuzione temperatura

Si è calcolato la distribuzione di temperatura nella larghezza del nastro in quattro istanti: alla fine del riscaldamento, e ad $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ e $\frac{3}{4}$ del tempo di riscaldamento. Il tempo di riscaldamento vale 5,2s ed è stato indicato con T. I risultati sono riportati in fig.8.16.

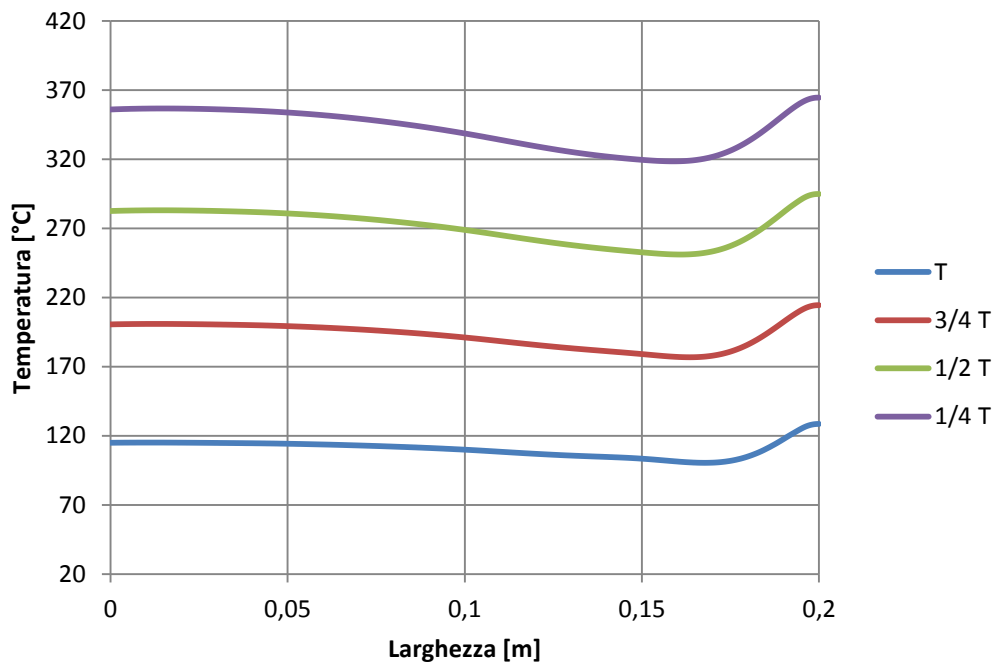


Fig. 8.16 Distribuzione della temperatura del nastro durante il riscaldamento

Nella tabella 8.5 sono riportate le principali grandezze che sono state calcolate durante il riscaldamento

Tabella 8.5 Variazione della temperatura durante il riscaldamento

Tempo	$\frac{1}{4}T$	$\frac{2}{4}T$	$\frac{3}{4}T$	T
Temperatura media[°C]	110	192	271	341
Temperatura massima[°C]	128	214	295	364
Temperatura minima [°C]	100	177	251	318
Differenza di temperatura [°C]	28	37	44	46

La differenza di temperatura massima all'interno del nastro aumenta durante il transitorio di riscaldamento.

8.5 Conclusioni

Con il riscaldamento tramite coppie di moduli SPM standard e SPM modificati il tempo di riscaldamento raddoppia rispetto al solo utilizzo di moduli standard. Il riscaldamento è comunque molto veloce, sono necessari 5,2 secondi per portare da 20 a 351°C un nastro d'alluminio che si muove ad una velocità di 10m/s dello spessore di 1mm.

Tramite il riscaldamento con coppie di moduli SPM standard e SPM modificati a fine riscaldamento si ha una distribuzione di temperatura abbastanza uniforme.

Riscaldando il nastro ad una temperatura di 351°C partendo dalla temperatura iniziale di 20°C si ha una differenza di temperatura di 48°C all'interno del nastro, dopo due secondi dalla fine del riscaldamento la differenza di temperatura all'interno del nastro è solo 23°C.

Le coppie di moduli SPM standard e SPM modificato si prestano bene anche a scaldare nastri di larghezza inferiore alla larghezza del modulo.

Capitolo 9

Prototipo

Volendo verificare sperimentalmente le distribuzioni di temperatura ottenute dalle varie simulazioni numeriche si è deciso di costruire un prototipo in dimensioni ridotte della macchina, sia per la configurazione a magneti superficiali sia per quella a magneti interni.

Nel prototipo si ha:

- Un nastro di alluminio dello spessore di 1mm e della larghezza di 100mm.
- La potenza indotta da un modulo è stata limitata ad 1kW in modo tale da limitare di conseguenza la potenza e la coppia fornita dal motore che aziona il nastro.
- Magnet permanenti in SmCo con $B_r=0,9T$
- Per entrambe le configurazioni un ampio traferro di 15mm, per evitare di danneggiare il nastro e i magneti a seguito di eventuali oscillazioni del nastro.

9.1 Geometria dei moduli

La geometria del modulo SPM è stata modificata in modo tale da indurre una potenza di circa 1kW. Nella figura 9.1 è stato riportato il modulo SPM e le dimensioni del prototipo sono riportate nella tabella 9.2. La potenza indotta nel nastro, calcolata in una simulazione 2D dello scenario nella tabella 9.1, è di 1,41kW. La potenza indotta è maggiore di 1kW però si deve considerare una riduzione di potenza indotta nel passaggio dal 2D al 3D a causa degli effetti di bordo.

Tabella 9.1 Dati dello scenario

Parametro	Quantità	Unità di misura
Velocità nastro	10	m/s
Spessore nastro	1e-3	m
Traferro	0,015	m
SmCo induzione residua B_r	0,9	T
Resistività alluminio	3e-8	Ωm
Permeabilità magnetica relativa ferro	1000	-

Prototipo

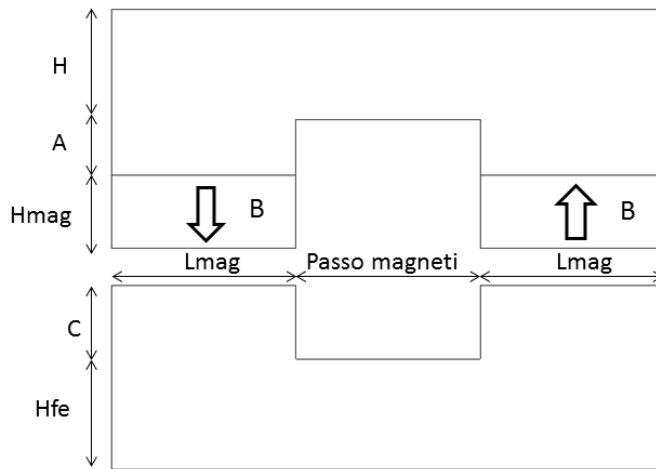


Fig. 9.1 Modulo SPM

Tabella 9.2 Dimensioni modulo SPM

Grandezza	Valore [mm]
Lmag	25
Hmag	15
A	10
H	30
C	15
Hfe	25
Passo mag	40

La geometria del modulo IPM è stata modificata in modo tale da indurre una potenza di circa 1kW. Nella figura 9.2 è stato riportato il modulo IPM e le dimensioni del prototipo sono riportate nella tab. 9.3. La potenza indotta nel nastro, calcolata in una simulazione 2D dello scenario nella tab. 9.1, è di 1,24kW. La potenza indotta è maggiore di 1kW però si deve considerare una riduzione di potenza indotta nel passaggio dal 2D al 3D a causa degli effetti di bordo.

Prototipo

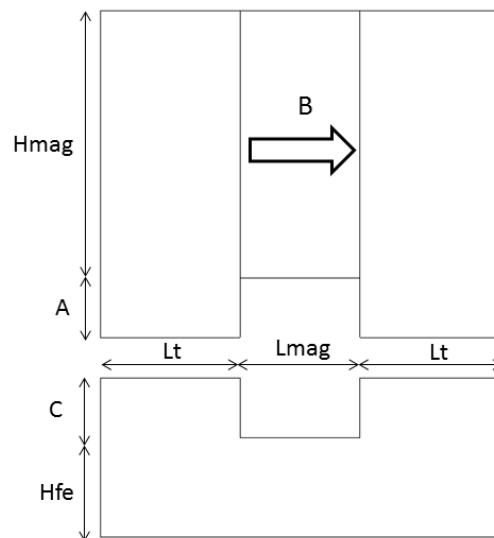


Fig. 9.2 Modulo IPM

Tabella 9.3 Dimensioni modulo IPM

Grandezza	Valore [mm]
Lmag	30
Hmag	40
A	15
Lt	30
C	15
Hfe	25

9.2 Struttura del prototipo

Il nastro non attraverserà una serie di moduli come previsto nel progetto industriale, ma utilizzerà un solo modulo e il nastro dovrà compiere più passaggi attraverso lo stesso modulo.

Per fare questo si è deciso di simulare il nastro utilizzando un disco di alluminio dello spessore di 1mm, del raggio di 750mm con foro concentrico del raggio di 650mm. Il disco di alluminio è fissato con 16 bulloni ad un disco centrale in acciaio dello spessore di 3mm e del raggio di 640mm.

Il disco di alluminio dovrà ruotare ad una velocità di:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \cdot 60 = \frac{v}{r} \cdot \frac{60}{2\pi} = 127 \frac{\text{giri}}{\text{min}}$$

Dove:

- $r=0,75\text{m}$ è il raggio esterno del disco d'alluminio
- $v=10\text{m/s}$ è la velocità tangenziale del nastro

Prototipo

Con il nastro ad una velocità di 10m/s e una potenza indotta di 1kW la forza che agisce sul nastro è di 100N nel verso opposto alla velocità del nastro. Siccome il disco di alluminio ha un raggio di 0,75m al disco interno in acciaio dovrà essere fornita una coppia di 75Nm.

L'aumento di temperatura per un passaggio attraverso il modulo, utilizzando la relazione (7.1) è:

$$\Delta T_{modulo} = \frac{P}{w \cdot h \cdot v \cdot \gamma \cdot c} = \frac{1000}{0,1 \cdot 0,001 \cdot 10 \cdot 2530000} = 0,395^{\circ}C$$

Se si vuole portare il nastro a 200°C cioè aumentare la temperatura di 180°C sono necessari 456 giri. Considerando che il disco ha una velocità di 127 giri/min sono necessari 3,6 minuti. Il motore che aziona il disco permette un servizio di durata limitata, cioè funziona per circa 4 minuti e poi ha un periodo di pausa fino alla prova successiva.

Il disco è azionato da un motore sincrono a magneti permanenti attraverso un riduttore di velocità con vite senza fine, con un rapporto di riduzione pari a 19.

Osservazioni:

1. Si deve considerare la dilatazione termica dell'alluminio, a 200°C il raggio esterno del disco di alluminio è:

$$r_{200^{\circ}C} = r + r \cdot \Delta T \cdot \lambda = 0,753m$$

Dove $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ è il coefficiente di dilatazione termica lineare dell'alluminio, $\Delta T = 180K$ è l'incremento di temperatura, $r=0,75m$ è il raggio esterno del disco di alluminio a 20°C.

2. La massa del disco di acciaio è 29kg e la massa del disco d'alluminio è 1,2Kg. Il momento d'inerzia totale è 6,5Kgm²
3. La velocità tangenziale del disco di alluminio non è uguale in tutti i punti, nella parte esterna è 10m/s, nella parte interna 8,66m/s, però diminuisce anche la quantità di alluminio da riscaldare, il perimetro nella parte esterna è 4,71m e nella parte interna è 4,08m. Per il prototipo SPM ad una velocità del nastro di 8,66 m/s la potenza indotta è 1,16kW e per il prototipo IPM è 1,00kW. Per il prototipo IPM nella parte interna del disco di alluminio la potenza indotta diminuisce del 19,3% e la quantità di alluminio da riscaldare diminuisce del 13,3%,. Per il prototipo SPM nella parte interna del disco di alluminio la potenza indotta diminuisce del 17,7% e la quantità di alluminio da riscaldare diminuisce del 13,3%.

Prototipo

In fig. 9.3 è riportato il prototipo con il disco in acciaio in rosso e in grigio il disco esterno in alluminio e il modulo.

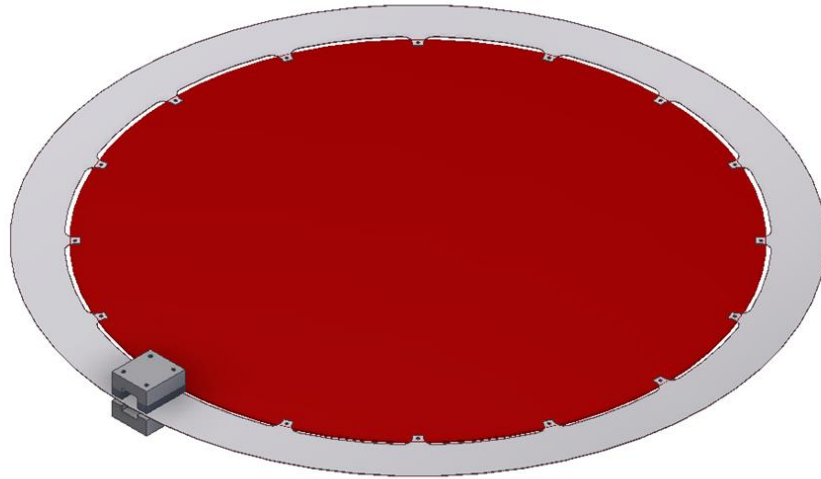


Fig. 9.3 Struttura del prototipo

In fig. 9.4 e fig. 9.5 sono riportati i prototipi SPM e IPM, sia nel concentratore di flusso sia nel back iron sono stati fatti dei fori filettati per inserire le viti per fissare il modulo ai supporti. Le viti sono fissate con dei dadi ai supporti, agendo sui dadi è possibile variare il traferro e di conseguenza la potenza indotta.

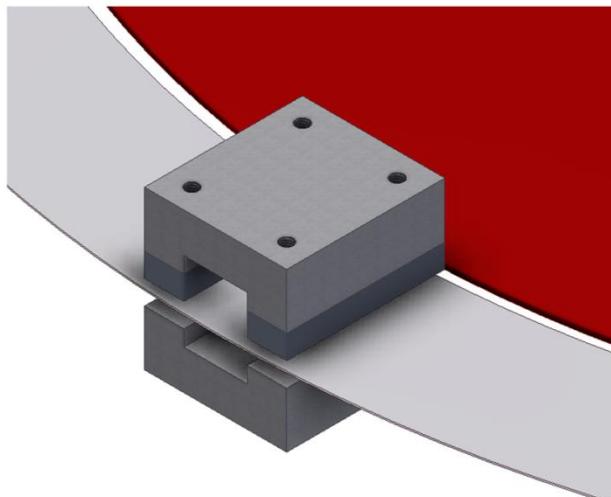


Fig. 9.4 Prototipo del modulo SPM

Prototipo

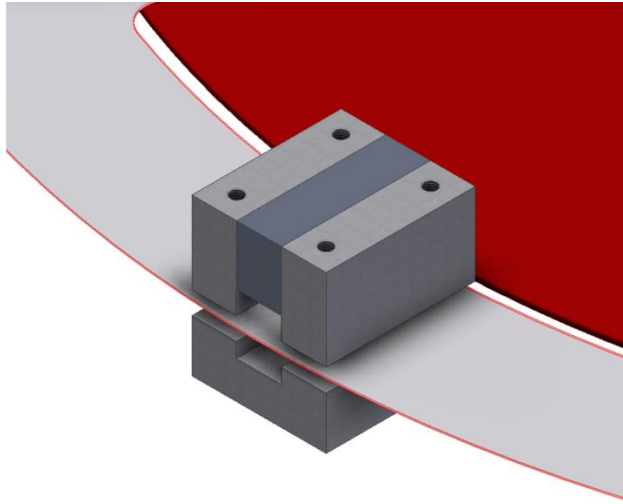


Fig. 9.5 Prototipo del modulo IPM

In fig. 9.6 è riportato uno dei sedici punti di fissaggio tra il disco di alluminio esterno e il disco di acciaio. I due dischi sono in contatto solo nella zona di fissaggio, nelle altre zone c'è un gap di 10mm di aria per evitare che il calore nel disco di alluminio diffonda nel disco di acciaio.

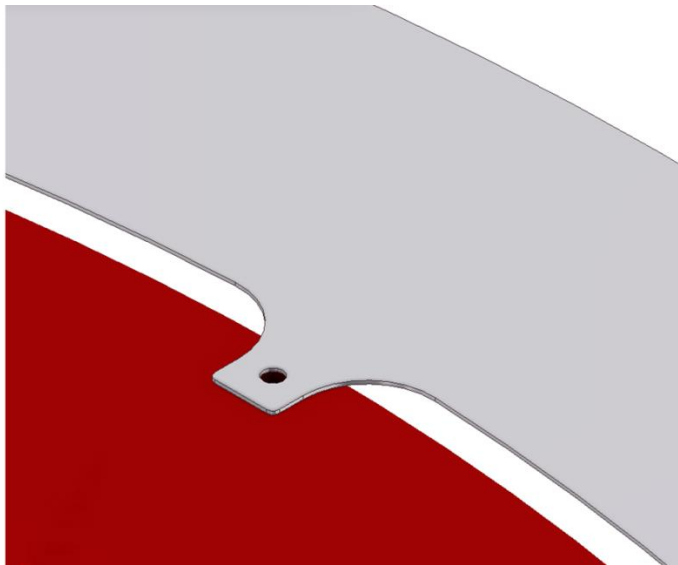


Fig. 9.6 Giunzione tra disco in acciaio e disco in alluminio

Il prototipo sarà ultimato tra alcuni mesi, perciò al momento non è stato possibile fare nessuna prova.

Capitolo 10

Conclusioni

Nella presente tesi è stato fatto uno studio di fattibilità del riscaldamento di nastri di alluminio tramite l'utilizzo di magneti permanenti. Sono state studiate due configurazioni una a magneti interni ed una a magneti superficiali.

Tramite delle simulazioni 2D sono state trovate le geometrie ottime per entrambe le configurazioni, cioè la geometria che massimizza la potenza indotta nel nastro a parità di quantità di magneti permanenti.

Sono state fatte delle simulazioni 3D dove si è visto che a causa degli effetti di bordo la potenza indotta diminuisce almeno nelle configurazioni considerate. È stata calcolata la distribuzione di potenza nella larghezza del nastro per entrambe le configurazioni per diversi valori di velocità del nastro e di traferro e si è visto che la distribuzione di potenza nella sezione del nastro non varia molto al variare della velocità o del traferro.

È stata fatta una prova, per entrambe le configurazioni, del riscaldamento di un nastro di larghezza inferiore rispetto alla larghezza del modulo e anche in questo caso la distribuzione di potenza nella larghezza del nastro non varia molto rispetto a quella del nastro della stessa larghezza.

Dalle distribuzioni di potenza nella larghezza del nastro è stato possibile fare una simulazione del transitorio termico di riscaldamento, ottenendo i valori della temperatura nella sezione del nastro. Per la configurazione IPM le distribuzioni di temperatura a fine riscaldamento sono accettabili. Per la configurazione SPM a fine riscaldamento la temperatura in prossimità del bordo del nastro diminuisce ottenendo così una distribuzione di temperatura non accettabile.

Per migliorare la distribuzione di temperatura si è deciso di inserire in serie ad ogni modulo SPM un modulo SPM modificato che induce potenza solo nella zona del nastro in prossimità del bordo. Sono state rifatte le simulazioni 3D e le simulazioni del transitorio termico. Alternando un modulo SPM ed un modulo SPM modificato le distribuzioni di temperatura a fine riscaldamento sono accettabili.

Per entrambe le configurazioni si hanno densità di potenza molto elevate e tempi di riscaldamento piccoli. Il rendimento del processo di riscaldamento è molto vicino al rendimento del motore che aziona il nastro.

Con il riscaldamento tramite una macchina che utilizza moduli IPM e coppie di moduli SPM standard e SPM modificato si possono riscaldare nastri di diversa larghezza e di diverso spessore. La potenza indotta può essere controllata variando

Conclusioni

l'ampiezza del traferro. Uno dei possibili utilizzi di questa macchina è il riscaldamento di nastri di alluminio per il processo di annealing, questo processo avviene dopo la fase di laminazione dei nastri e ha lo scopo di ridurre gli stress interni al materiale.

Verranno fatte delle prove sperimentali sul prototipo costruito in laboratorio per verificare i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche.

Questa tesi offre una base per ulteriori studi e approfondimenti su questo nuovo sistema di riscaldamento.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione della Tesi. Ringrazio anzitutto il relatore Dott. Ing. Michele Forzan, e il correlatore Dott. Ing. Cristian Pozza, per l'opportunità datami nell'affidarmi questo progetto di tesi, per l'autonomia e la fiducia che mi hanno dato.

Un grazie anche alla CIBAS srl che ha donato i magneti permanenti necessari per la realizzazione del prototipo.

Ringrazio anche tutti i ragazzi del laboratorio di elettrotermia: Alessandro Tolomio, Mattia Spezzapria, Cristian Bianchi e Marco Bullo che mi hanno accolto bene fin da subito.

Un enorme grazie alla mia famiglia, a cui dedico la tesi, per avermi sempre supportato.

Ringrazio tutti i miei amici che mi hanno accompagnato in questi anni, per avermi aiutato, consigliato e con i quali mi sono molto divertito.

Bibliografia

- [1] *Heat treatment systems for aluminium rolling mills*, Otto Junker web site, <http://www.otto-junker.de/>
- [2] S. Lupi, *Appunti di Elettrotermia A.A. 2005-2006*
- [3] Alliance LLC, *Magnet guide & tutorial*
- [4] G. Marchesi, *Lezioni di materiali per l'ingegneria elettrica*, Libreria Progetto, 1999
- [5] P. Alotto, *appunti del corso di Elettrotecnica Computazionale*, Università degli Studi di Padova, 2013-2014
- [6] *Flux 2D, User's guide*
- [7] A. Tortella, *appunti del corso di Macchine elettriche speciali*, Università degli studi di Padova, 2013-2014
- [8] S. Bobbio, *Esercizi di elettrotecnica*, CUEN, Napoli, 1995
- [9] Spagnolo A., "Auto-adaptive multi-coil inductors for transverse flux induction heating of metal strips", *tesi di dottorato*, Università degli Studi di Padova.
- [10] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, M. Tasca, "Numerical and experimental analysis of an electro-thermal coupled problem for transverse flux induction heating equipment", *IEEE Trans. On magnetics*, 34 (5), 1998
- [11] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, "3D solution of electromagnetic and thermal coupled field problems in the continuous transverse flux heating of metal strips", *IEEE Trans. on Magnetics*, 33(2), 1997.
- [12] H. Schülbe, A. Nikanorov, B. Nacke, "Development and investigation of flexible transverse flux heaters", *international scientific colloquium, Modelling for electromagnetic processing, Hannover 2003*
- [13] J. Barglik, *Advances in induction and microwave heating of mineral and organic materials*, Stanislaw Grundas, 2011, capitolo 10, *Induction Heating of Thin Strips in Transverse Flux Magnetic Field*
- [14] M. Zorbina, A. Nikarov, Yu. Blinov, "Different concepts for in-line steel strip induction heating", *International Seminar on Heating by internal Sources, Padova 2001*