

Progetto Nazionale MURST 2005
TECNOLOGIE INNOVATIVE AD ALTO RENDIMENTO NEL
RISCALDAMENTO AD INDUZIONE PER TRATTAMENTI TERMICI
DI BILLETTE E NASTRI DI ALLUMINIO

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA
RISCALDAMENTO AD INDUZIONE DI BILLETTE DI ALLUMINIO
MEDIANTE ROTAZIONE IN CAMPI MAGNETICI
STAZIONARI PRODOTTI DA MAGNETI SUPERCONDUTTIVI

Massimo Fabbri, Antonio Morandi, Pier Luigi Ribani
Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italia
massimo.fabbri@mail.ing.unibo.it
antonio.morandi@mail.ing.unibo.it
pierluigi.ribani@mail.ing.unibo.it

Sommario: Questo documento descrive la geometria e le principali caratteristiche di un dispositivo dimostrativo in scala di laboratorio finalizzato a dimostrare la fattibilità ingegneristica del processo di riscaldamento proposto. Lo studio del processo di riscaldamento in scala di laboratorio è stato effettuato attraverso il codice sviluppato dall'unità di Bologna. Il sistema magnetico è stato realizzato e se ne è verificata sperimentalmente la congruità. Infine, sulla base delle misure di campo, si sono dedotte le sorgenti di magnetizzazione equivalente.

Indice

1.	Analisi del processo di riscaldamento	3
2.	Progettazione del dispositivo sperimentale.....	6
3.	Realizzazione e test del dispositivo sperimentale.....	11
4.	Bibliografia	17

1. Analisi del processo di riscaldamento

Il codice utilizzato in questa relazione per l'analisi del processo di riscaldamento di una billetta di alluminio rotante in un campo di induzione stazionario e la geometria della mesh utilizzata sono descritti in [Breschi2006]. Il codice, sviluppato dall'unità di Bologna, è stato validato per confronto con codici commerciali [Fabbri2006]. I risultati numerici riportati in questa relazione sono relativi a una billetta in alluminio di raggio 20 mm e lunghezza 200 mm. Le proprietà termiche ed elettriche dell'alluminio, al variare della temperatura sono riportate in [Breschi2006]. Le specifiche del processo di riscaldamento sono definite nella tabella 1.1, analogamente a quelle del processo industriale [Fabbri2007].

Tabella 1.1 – Specifiche del processo di riscaldamento.

Temperatura iniziale della billetta (temperatura ambiente)	20°C [293 K]
Temperatura finale della billetta	200°C [473 K]
Errore ammesso sulla temperatura finale	$\pm 2.5\%$ [± 5 K]
Massimo tempo di riscaldamento	300 s [5 min]

L'analisi del processo di riscaldamento è stata condotta al fine di mostrare la fattibilità di un dispositivo sperimentale a magneti permanenti. Al fine di ridurre i costi, si intende collocare il dispositivo nei laboratori dell'unità di Padova, ove risultano essere disponibili sia il sistema di acquisizione dati sia il motore a velocità controllabile. Si è collaborato con l'unità di Padova al fine di concordare le scelte tecnologiche e definire le specifiche tecniche del dispositivo sperimentale. Pertanto si è dapprima studiato il processo di riscaldamento a velocità di rotazione costante in un campo uniforme per determinare le configurazioni iniziali più promettenti. In particolare, si è analizzato il range di velocità 1000-6000 rpm ed il range di campo 100-300 mT (non sono stati considerati valori di campo inferiori in quanto il processo non raggiunge la temperatura prevista). Le figure 1.1, 1.2 ed 1.3 mostrano il tempo di riscaldamento, la differenza di temperatura e la potenza termica iniettata. In base ai risultati ottenuti sembra che una velocità di 2500 rpm e un campo di 200 mT siano accettabili per lo studio sperimentale. Si hanno infatti tempi di riscaldamento dell'ordine di 2 minuti, differenze di temperatura inferiori a 10 °C e potenze dell'ordine di 1 kW.

Fissato il campo medio a 200 mT, si è proceduto nel dimensionamento del sistema magnetico e all'ingegnerizzazione del magnete. A tal fine si sono valutate le caratteristiche dei magneti permanenti in Nd-Fe-B e Sm-Co [http://www.vacuumschmelze.com/dynamic/docroot/medialib/documents/broschueren/dmbrosch/PD002e.pdf]. Si sono quindi scartati i magneti in Nd-Fe-B a causa delle temperature di lavoro medio-basse ed è stato effettuato il dimensionamento del sistema supponendo di operare con magneti in Sm-Co aventi rimanenza di 1 T, valore possibile per magneti Sm-Co operanti cautelativamente a circa 200°C. A valle di un'indagine sui costi, ci si è concentrati sul tipo Sm2-Co17 (grade XGS26) per la sua elevata temperatura di lavoro; vedi tabella 1.2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

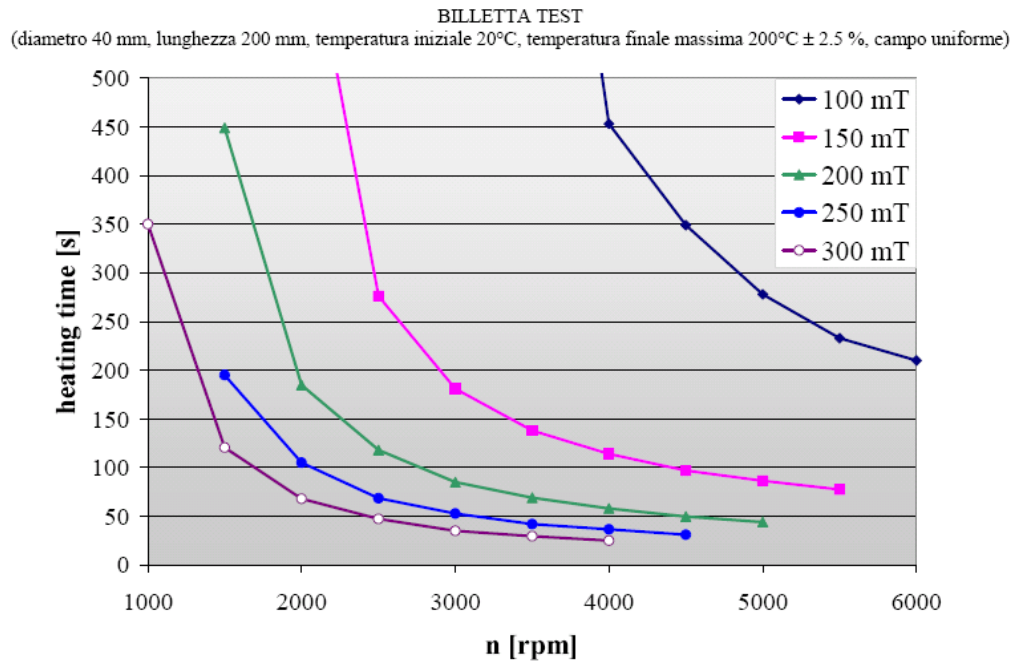


Figura 1.1 – Tempo di riscaldamento per riscaldamento in campo uniforme.

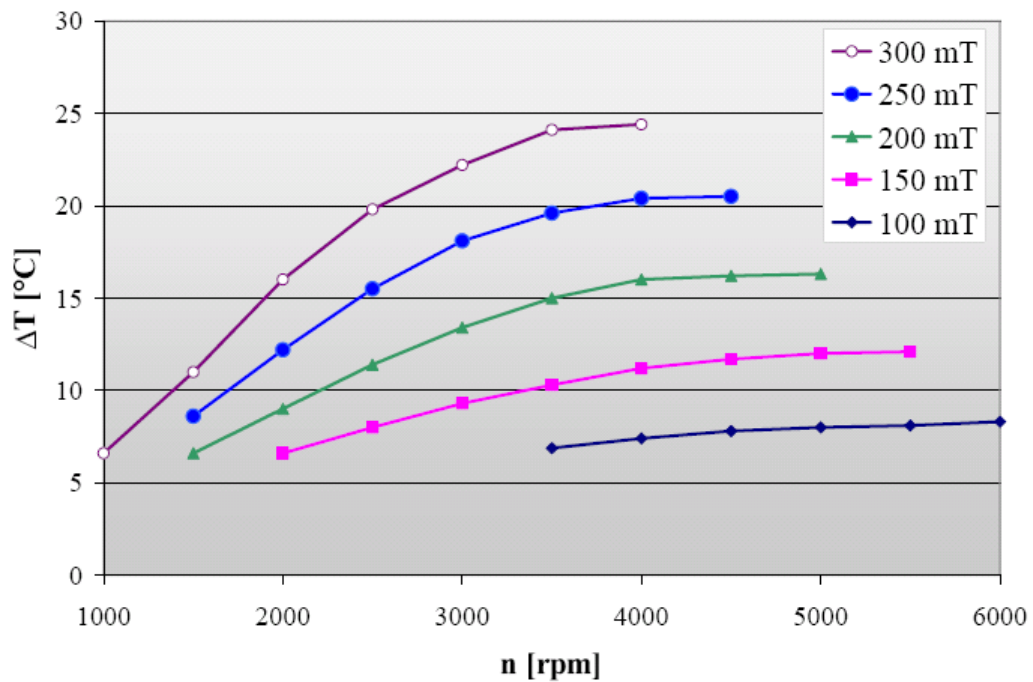


Figura 1.2 – Differenza di temperatura per riscaldamento in campo uniforme.

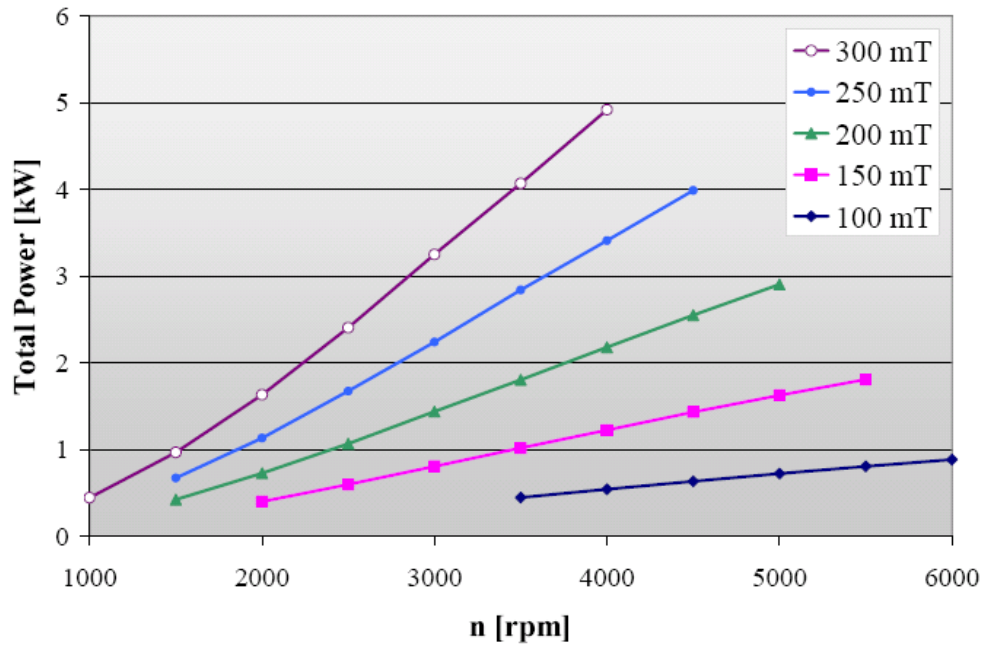


Figura 1.3 – Potenza termica totale per riscaldamento in campo uniforme.

Tabella 1.2 – Caratteristiche standard materiali Sm-Co (SAIMAG S.r.l.)
[\[http://www.saimag.com/indexIta.html\]](http://www.saimag.com/indexIta.html)

TYPE	GRADE	Residual Flux Density Br	Coercitive Force		Max Energy Product (B H) max KJm ³	MAX Operation Temperature °C
			bHC	jHC		
		T	KA/m	KA/m		
Sm1 - Co5	XGS17	0,82-0,85	597-639	>1199	127-143	250
	XGS19	0,85-0,90	623-639	>1203	143-159	
Sm2 - Co17	XGS22	0,90-0,95	639-655	>1200	159-175	250
Sm2 - Co17	XGS22H	0,90-0,95	639-655	>1440	159-175	300
Sm2 - Co17	XGS24	0,95-1,0	678-799	>1199	175-190	
Sm2 - Co17	XGS24H	0,95-1,0	678-799	>1440	175-190	350 ca
Sm2 - Co17	XGS26	1,0-1,05	718-799	>1199	190-206	300
Sm2 - Co17	XGS26H	1,0-1,05	718-799	>1440	190-206	350 ca
Sm2 - Co17	XGS28	1,05-1,08	718-799	>1199	206-222	300

2. Progettazione del dispositivo sperimentale

Le figure 2.1 e 2.2 mostrano lo schema geometrico del sistema magneti-billetta-afferraggi e le dimensioni dei magneti. Le figure 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 mostrano il modulo del campo di induzione nella billetta e del campo disperso, calcolate dal codice UNIBO nell'ipotesi di magnetizzazione uniforme. Le figure 2.7 e 2.8 mostrano gli schemi tecnici di ingegnerizzazione del sistema magnetico: le viti sono state inserite al fine di poter variare la distanza tra i magneti, con possibilità di variare il campo medio sulla billetta.

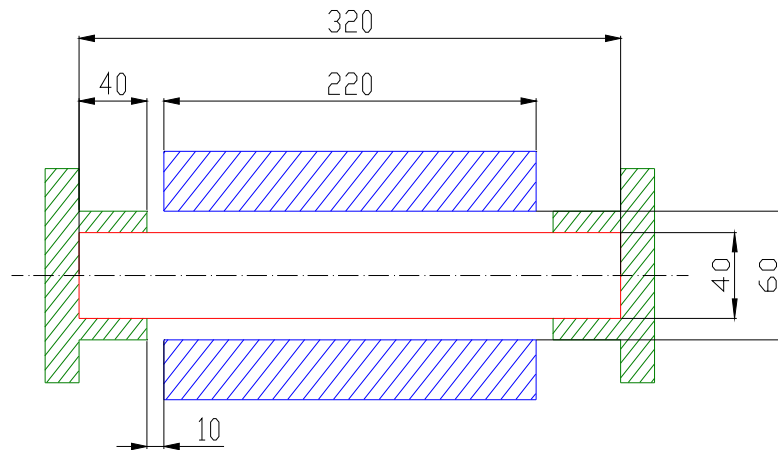
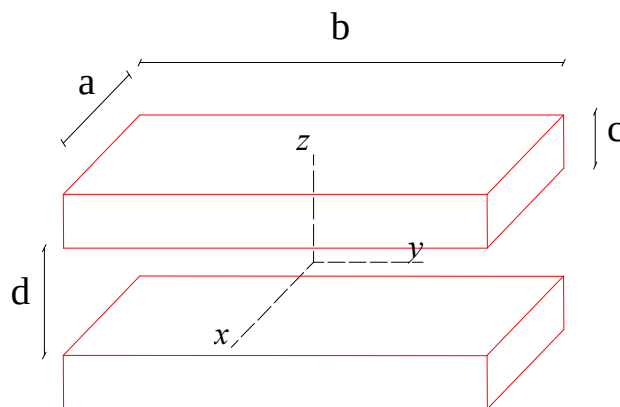


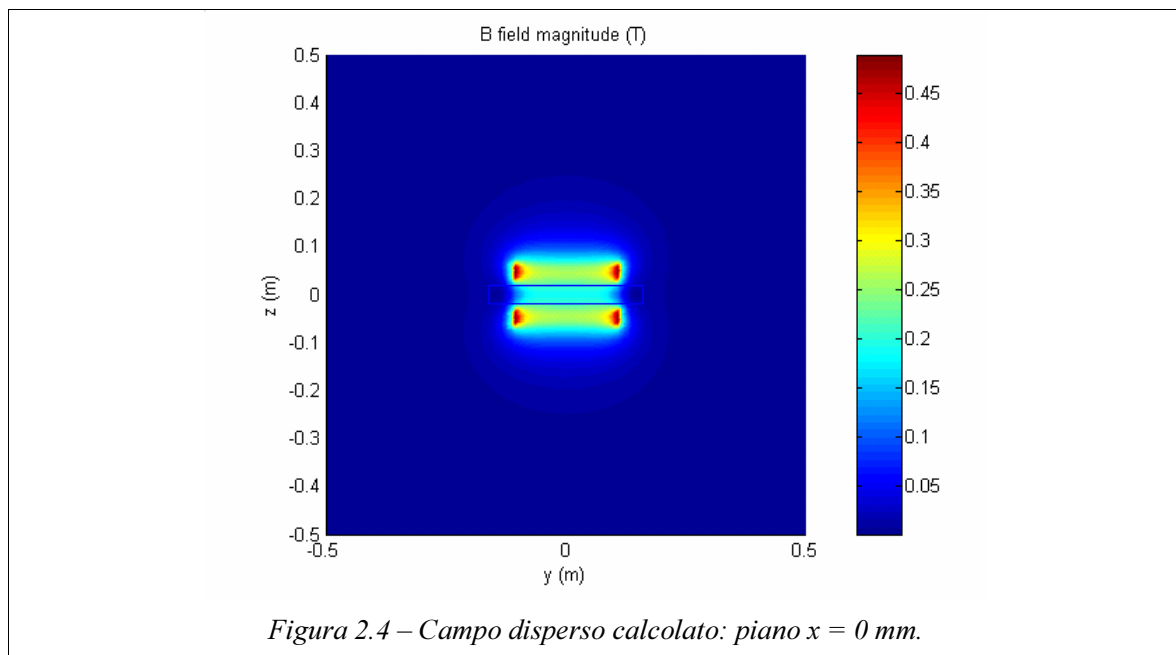
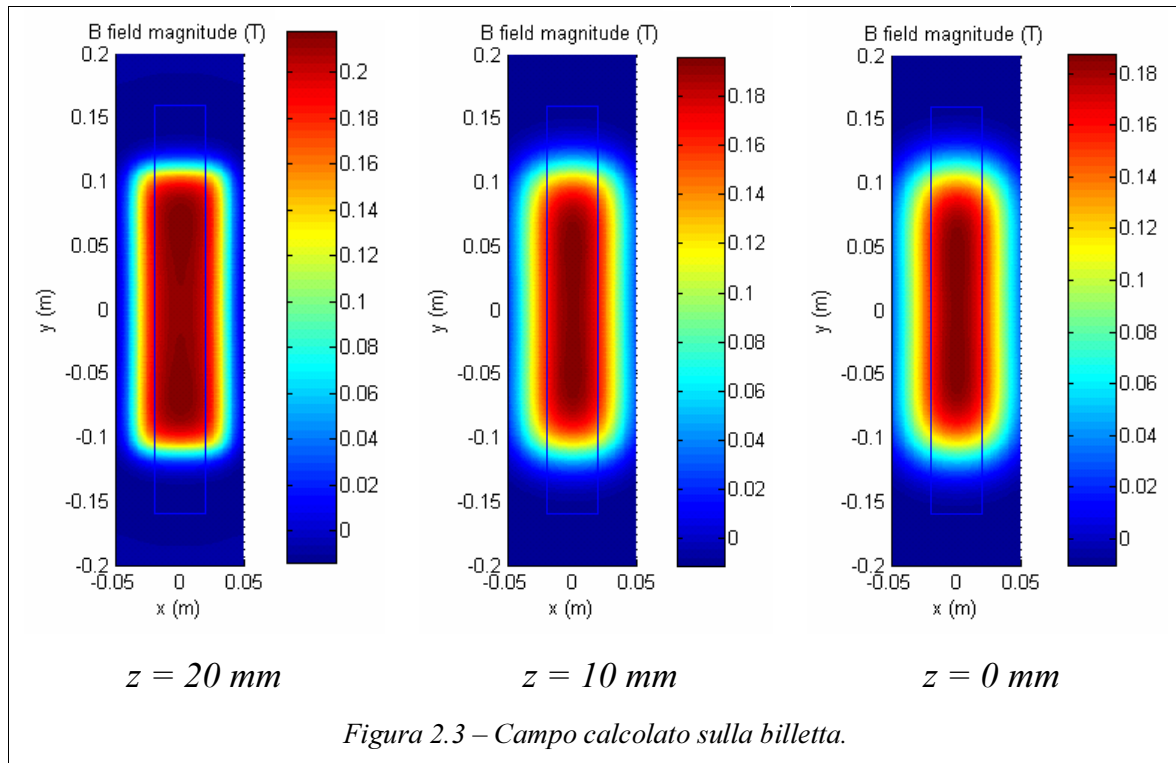
Figura 2.1 – Dimensioni del sistema magneti-billetta-afferraggi.



a = 70 mm
b = 220 mm
c = 30 mm
d = 64 mm

Figura 2.2 – Schema dei magneti e sistema di riferimento.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA



Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

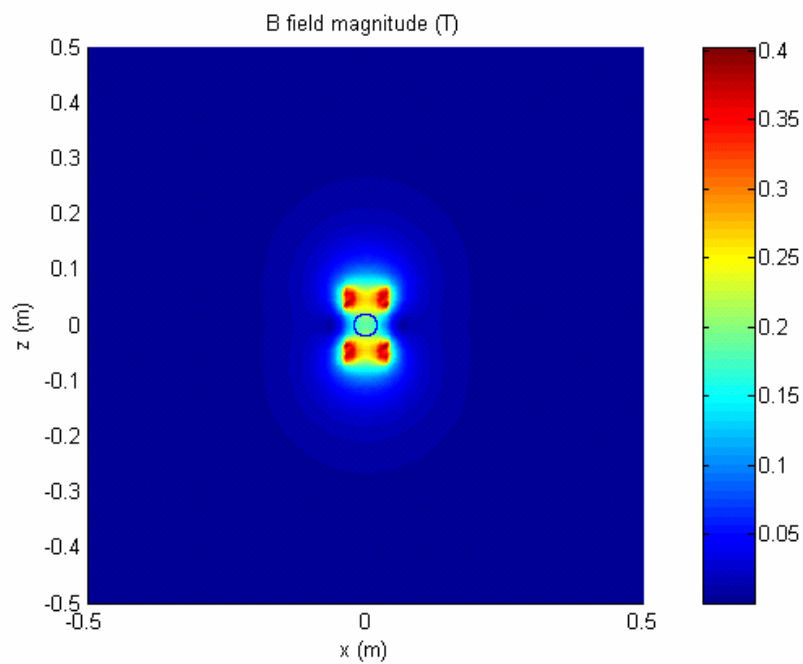


Figura 2.5 – Campo disperso calcolato: piano $y = 0$ mm.

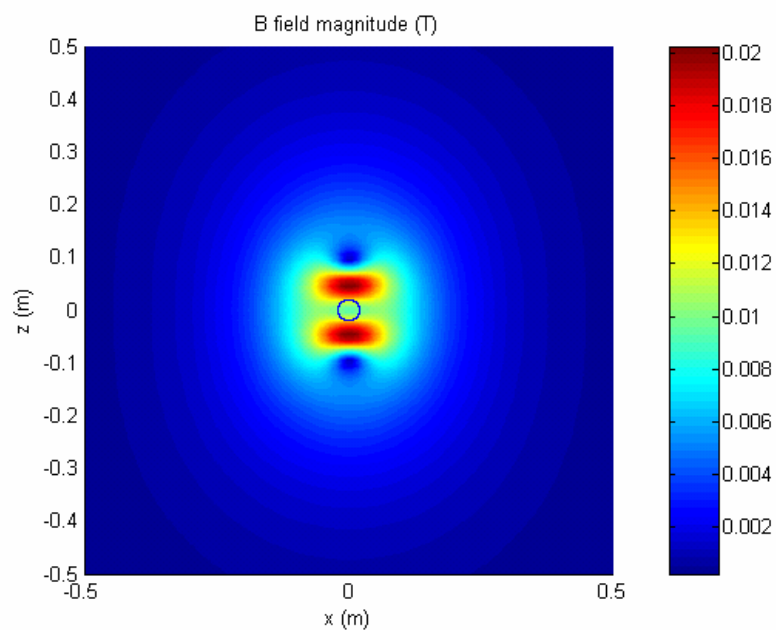
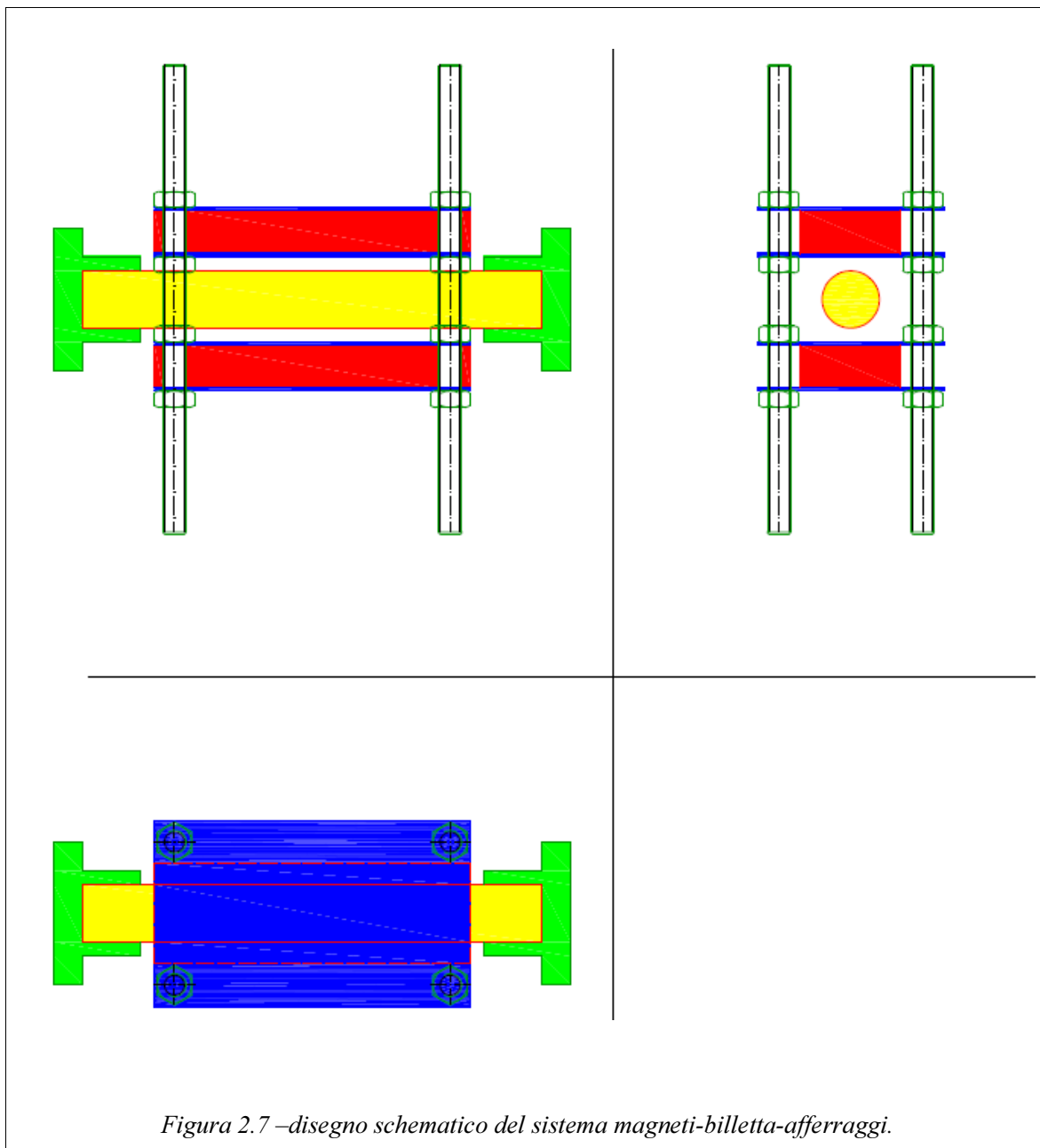


Figura 2.6 – Campo disperso calcolato: piano $y = -160$ mm.



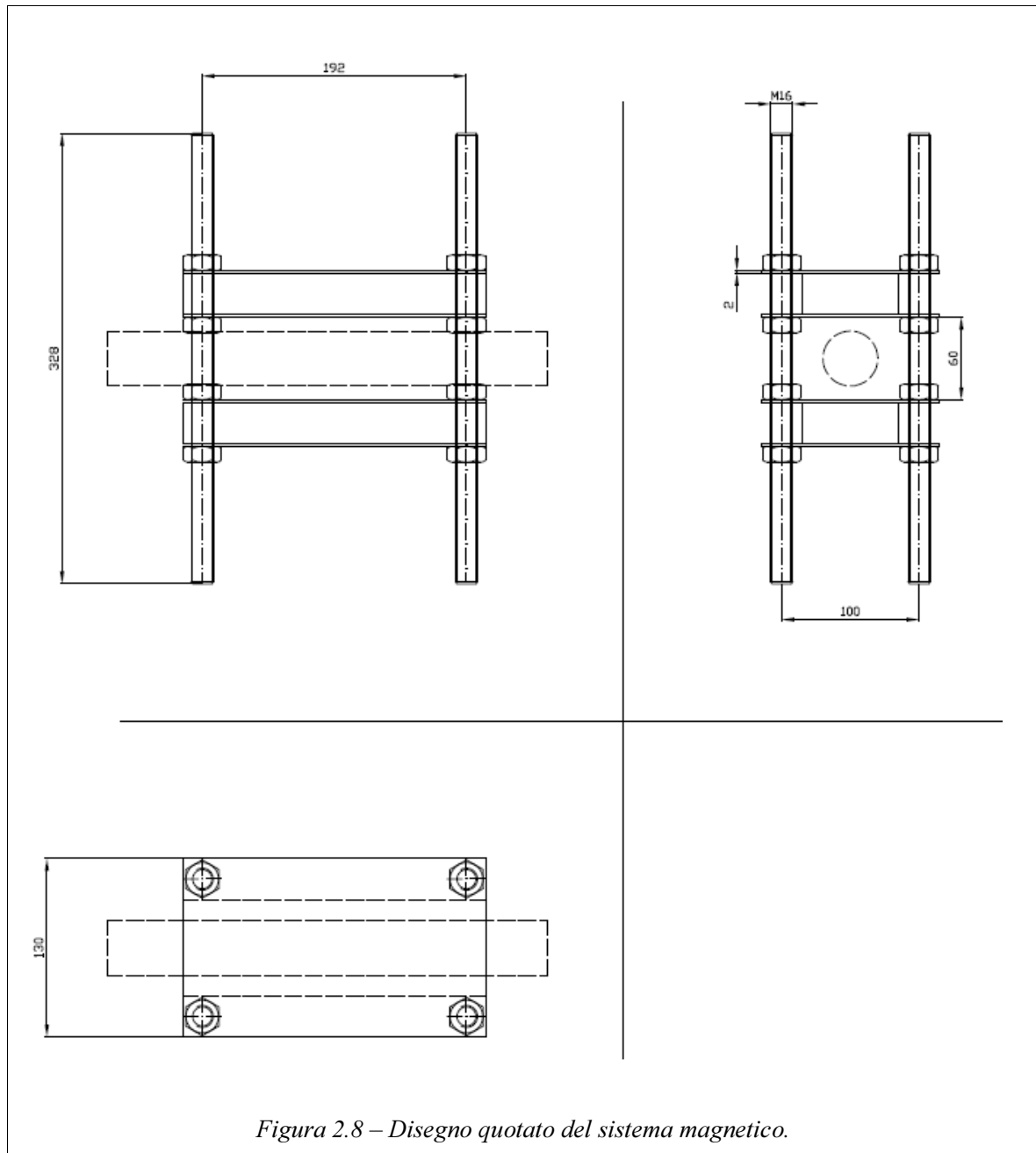


Figura 2.8 – Disegno quotato del sistema magnetico.

3. Realizzazione e test del dispositivo sperimentale

Il sistema magnetico, realizzato da SAIMAG S.r.l., è mostrato nelle figure 3.1 e 3.2. Per testare il dispositivo sono state acquistate una sonda di Hall trasversale (Lake Shore: H 30612), una sonda di Hall assiale (Lake Shore: HMNA 1904 VR) ed un gaussimetro (Lake Shore: 475 DSP). Come mostrato nelle figure 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, è stata fatta la mappatura della componente z dell'induzione magnetica (B_z) in corrispondenza di tre piani: in prossimità alla superficie dei magneti ($z = -16$ mm, $z = 19$ mm), e nella regione centrale ($z = -6$ mm). I dati sono riportati nelle tabelle 3.1, 3.2 e 3.3. L'errore massimo sul campo misurato può essere stimato in un 5% dovuto principalmente all'imprecisione del sistema di movimentazione e posizionamento della sonda. Inoltre, sono state misurate le componenti della induzione magnetica parallele alla superficie dei magneti (B_x in corrispondenza del piano in prossimità della superficie del magnete inferiore ($z = -16$ mm) e B_y in corrispondenza del piano intermedio tra i magneti ($z = -11$ mm) che risultano essere almeno un ordine di grandezza inferiori alla componente z della induzione magnetica. Sia il valore massimo (250 mT) che la uniformità della componente z della induzione magnetica misurate nella regione che verrà occupata dalla billetta sono in accordo con i dati di progetto.

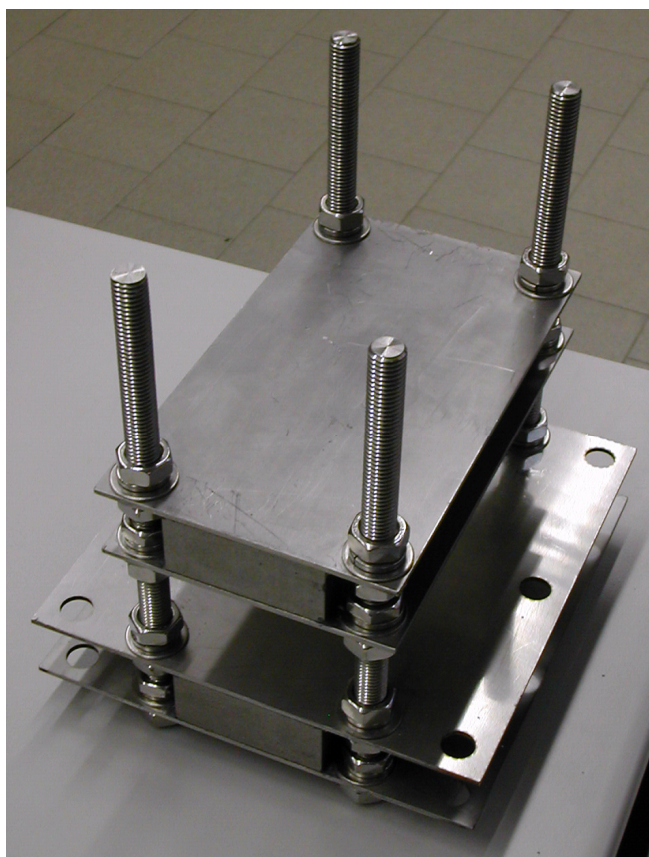


Figura 3.1 – Sistema magnetico (vista dall'alto).

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

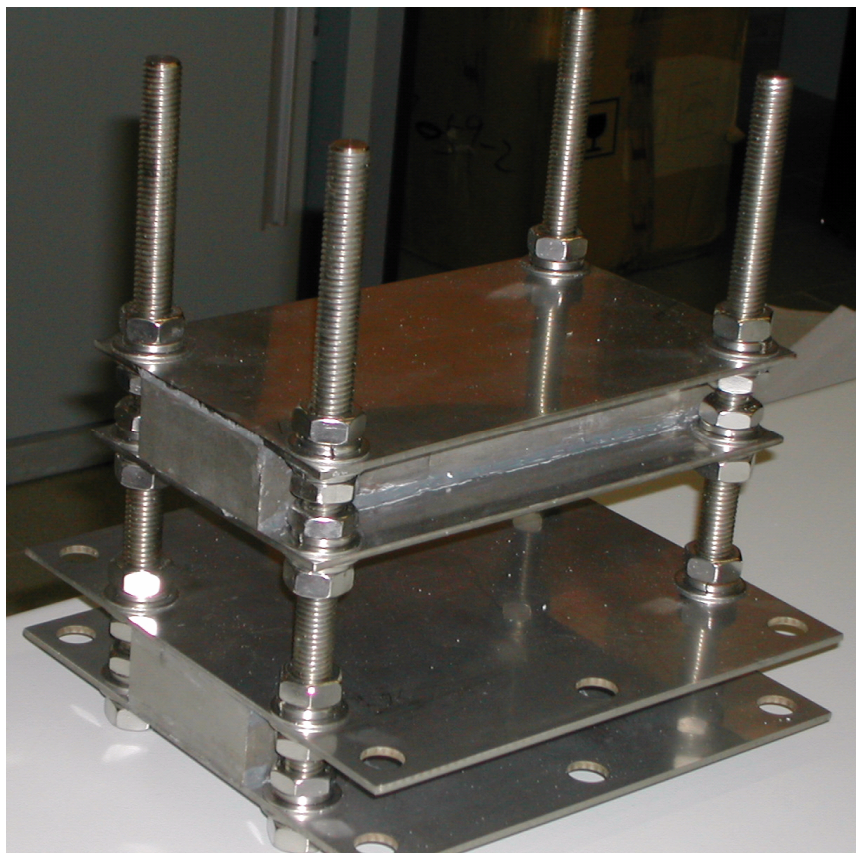


Figura 3.2 – Sistema magnetico (vista laterale).

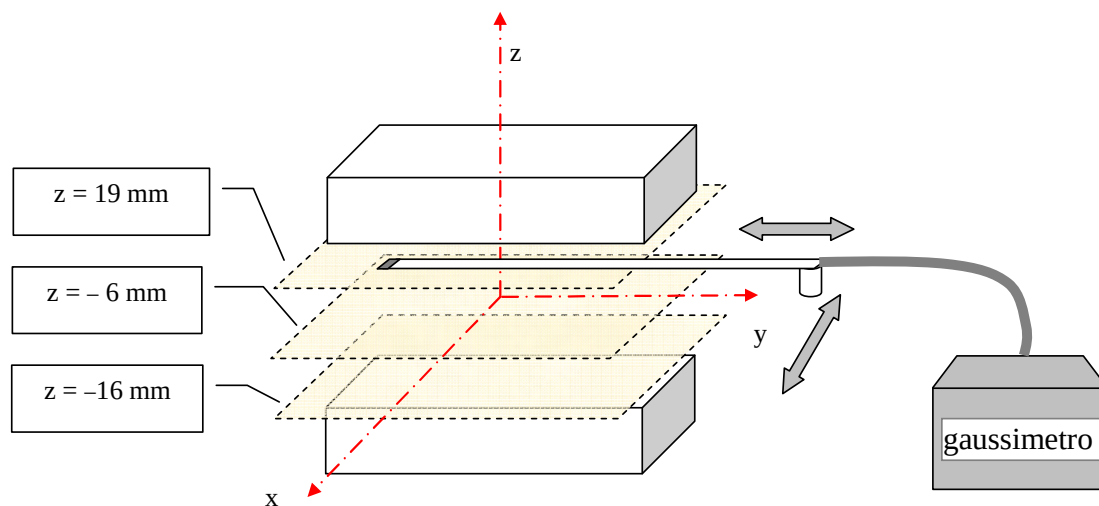
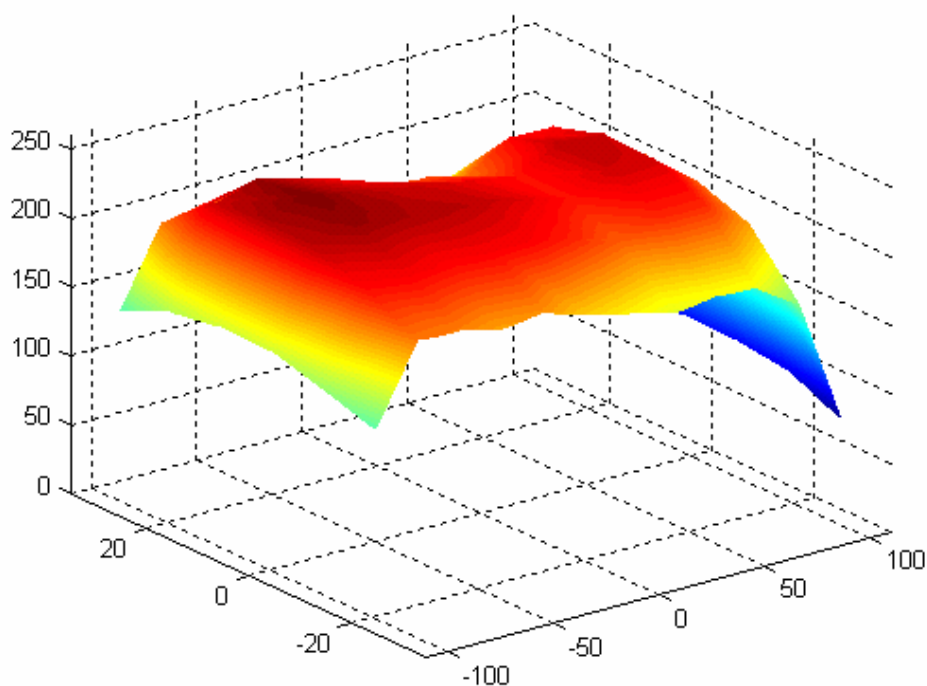


Figura 3.3 – Sistema di misura.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

Figura 3.4 – Campo misurato sul piano superiore (x ed y in mm, B_z in mT); max 251.4 mT.Tabella 3.1 – Campo misurato sul piano superiore (x ed y in mm, B_z in mT); max 251.4 mT.

x\y	113	93	73	53	33	13	-7	-27	-47	-67	-87	-107
-25	65.1	156.9	177.7	178.2	174.0	182.5	189.7	201.1	197.5	204.2	205.4	149.3
-15	82.6	198.4	220.7	220.6	210.3	220.5	227.7	229.1	226.4	229.9	225.5	160.9
-5	87.3	211.5	235.9	236.6	224.3	232.7	238.6	241.6	242.9	246.2	239.1	170.6
5	89.1	213.8	236.8	239.3	224.1	229.4	235.7	238.6	244.1	<u>251.4</u>	243.1	171.5
15	83.7	203.1	226.5	225.8	207.4	213.8	216.5	228.9	236.9	246.2	237.0	166.1
25	70.8	163.9	182.5	184.7	169.9	171.2	177.5	183.8	198.1	208.6	204.9	148.5

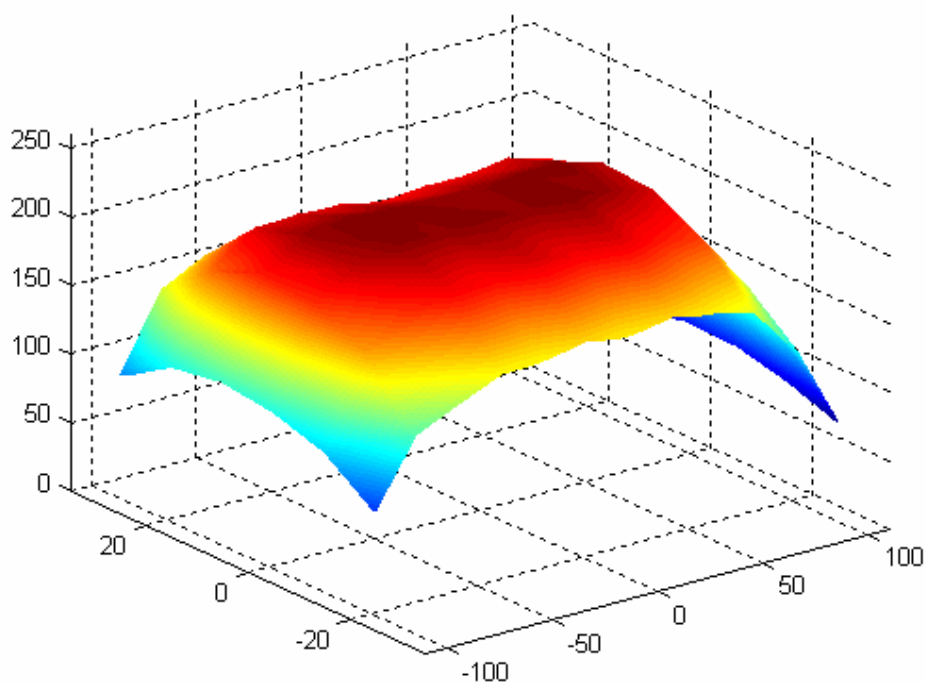


Figura 3.5– Campo misurato sul piano intermedio (x ed y in mm, B_z in mT); max 226 mT.

Tabella 3.2 – Campo misurato sul piano intermedio (x ed y in mm, B_z in mT); max 226 mT.

x\y	113	93	73	53	33	13	-7	-27	-47	-67	-87	-107
-25	60.3	120.9	157.5	164.5	169.6	165.5	169.6	163.6	162.8	148.9	134.9	87.3
-15	73.9	151.9	193.7	200.8	210.8	206.4	212.1	202.9	206.8	193.6	178.7	113.5
-5	82.2	170.6	212.6	221.2	<u>226.0</u>	223.0	224.4	223.0	224.3	215.5	197.6	126.0
5	82.6	175.3	216.1	225.2	224.4	223.0	222.7	223.9	225.2	221.8	201.1	131.1
15	76.9	166.1	201.4	210.9	207.2	207.3	204.7	209.3	210.7	210.3	188.5	124.9
25	60.8	140.2	167.1	172.2	165.5	162.1	162.3	166.4	171.7	173.0	155.4	101.2

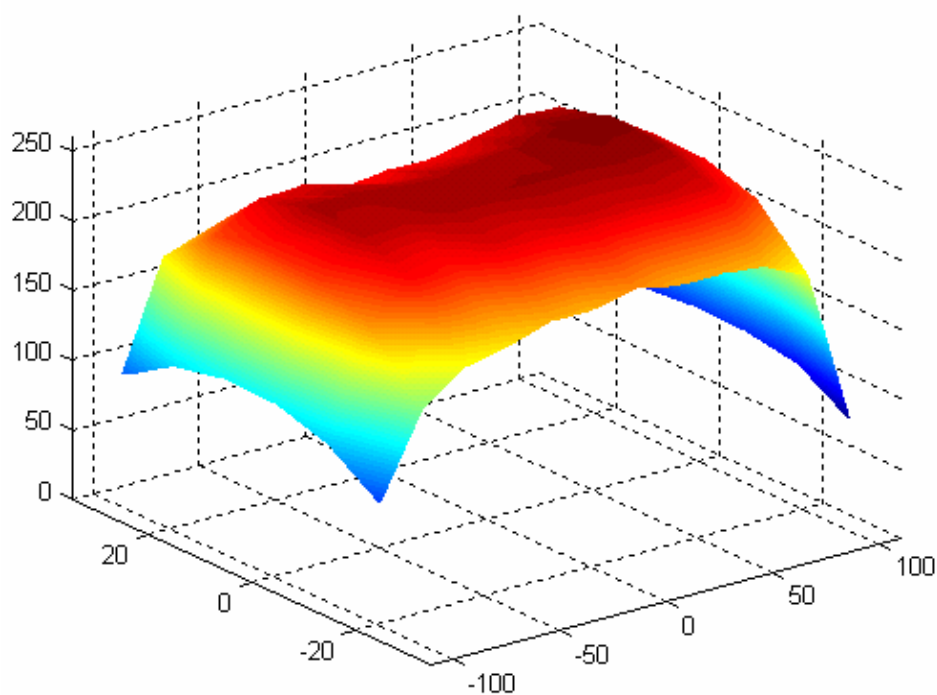


Figura 3.6 – Campo misurato sul piano inferiore (x ed y in mm, B_z in mT); max 252.2 mT.

Tabella 3.3 – Campo misurato sul piano inferiore (x ed y in mm, B_z in mT); max 252.2 mT.

x\y	113	93	73	53	33	13	-7	-27	-47	-67	-87	-107
-25	68.7	180.1	195.0	197.5	197.7	203.6	196.2	196.4	186.9	179.8	159.1	99.8
-15	90.5	218.0	235.6	237.6	236.9	237.3	233.6	234.8	224.6	227.2	203.3	125.6
-5	97.5	229.0	247.1	248.1	246.8	247.0	246.2	245.5	240.8	242.4	218.5	136.9
5	98.9	230.3	251.6	<u>252.2</u>	247.1	244.9	243.2	243.4	245.0	244.9	222.3	137.8
15	95.3	221.5	241.6	241.8	235.0	229.5	229.6	225.7	234.6	232.8	216.2	130.4
25	75.0	174.9	205.1	204.3	194.8	175.5	185.8	183.0	197.0	194.5	183.3	106.2

Per quanto riguarda l'utilizzo delle misure del campo di induzione magnetica nell'analisi dei risultati sperimentali sul processo di riscaldamento della billetta, oggetto della fase finale del PRIN, si sono ricostruite con una procedura di minimo errore le sorgenti equivalenti di magnetizzazione all'interno dei magneti del sistema. La figura 3.7 mostra la geometria delle sorgenti equivalenti e la tabella 3.4 le loro intensità. Le figure 3.8, 3.9 e 3.10 mostrano la componente z dell'induzione magnetica calcolata in corrispondenza di tre piani di misura. L'errore nella ricostruzione è inferiore a quello di misura.

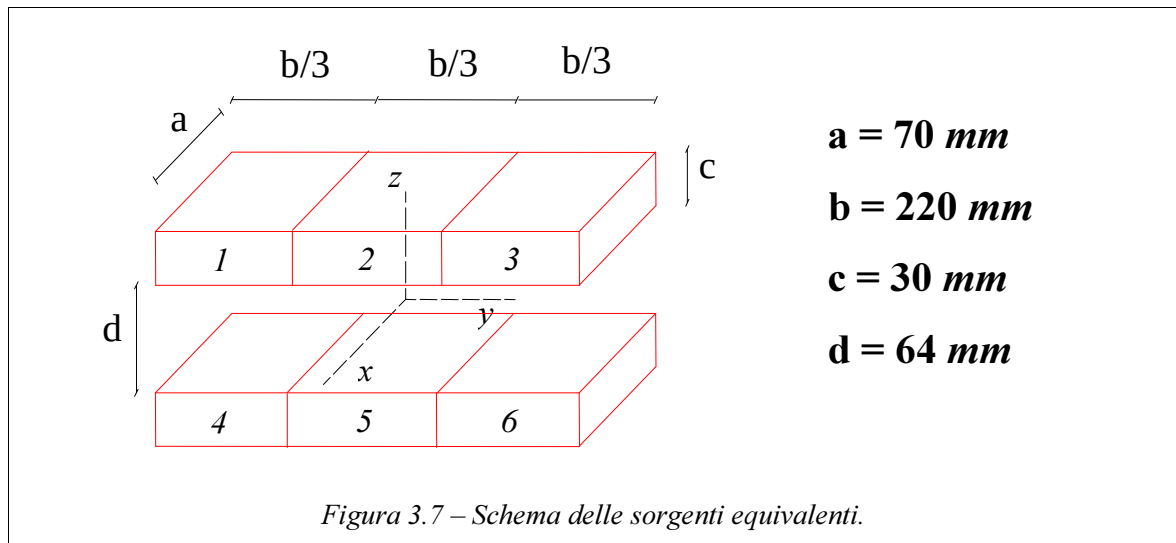


Tabella 3.4 – Sorgenti equivalenti.

Elemento	Induzione Residua			
	Componente x	Componente y	Componente z	Modulo
1	0.1076 T	0.1680 T	0.9793 T	0.999
2	0.0362 T	0.1254 T	0.9424 T	0.951
3	0.1178 T	0.0143 T	0.9223 T	0.930
4	0.0146 T	0.0350 T	0.9958 T	0.997
5	0.1981 T	0.0023 T	1.0577 T	1.08
6	0.0410 T	0.0069 T	1.0902 T	1.09

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

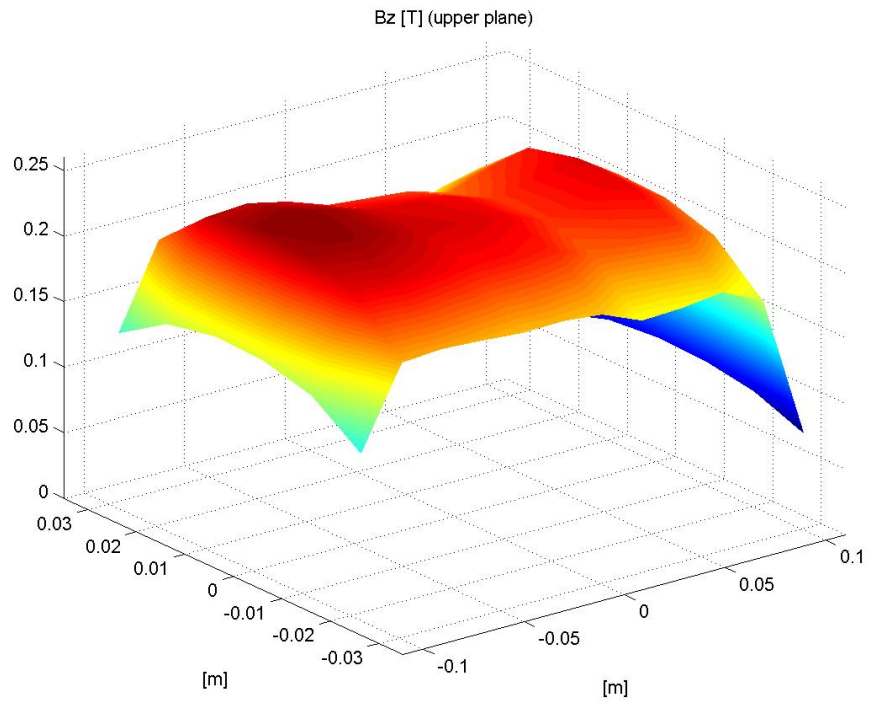


Figura 3.8 – Campo calcolato sul piano superiore con le Sorgenti equivalenti di Tabella 3.4.

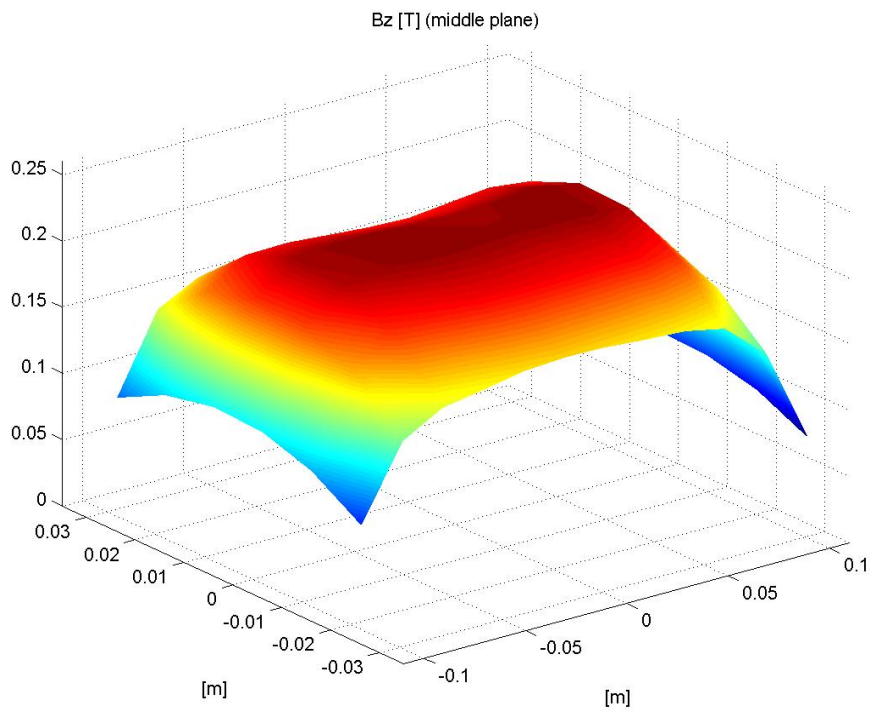


Figura 3.9– Campo calcolato sul piano intermedio con le Sorgenti equivalenti di Tabella 3.4.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

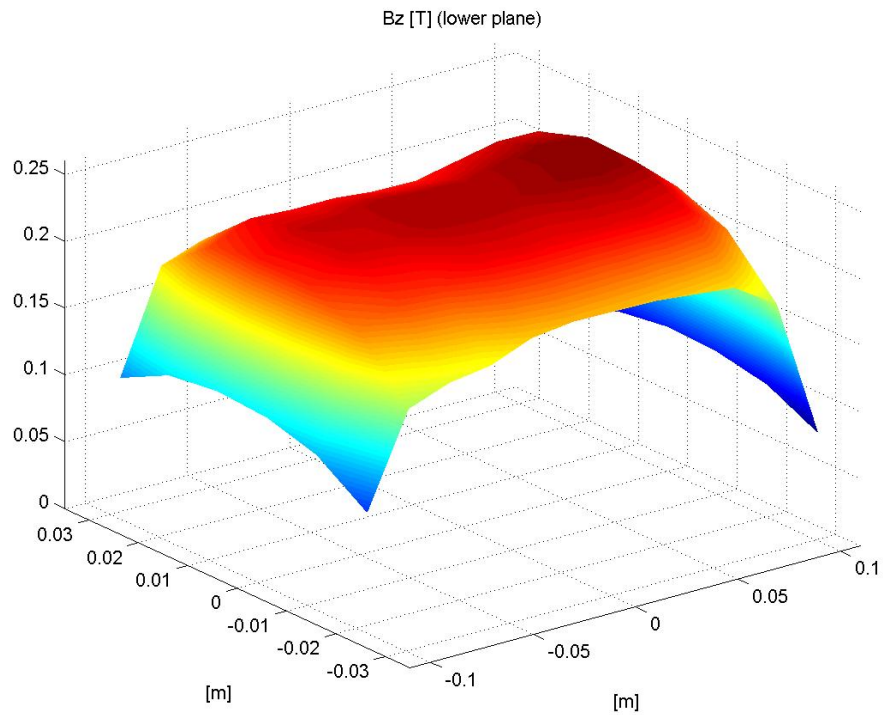


Figura 3.10 – Campo calcolato sul piano inferiore con le Sorgenti equivalenti di Tabella 3.4.

4. Bibliografia

- [Breschi2006] M. Breschi, M. Fabbri, A. Morandi, P.L. Ribani, Relazione PRIN2005 “Tecnologie innovative ad alto rendimento nel riscaldamento ad induzione per trattamenti termici di billette e nastri di alluminio”– Sottoprogetto UNIBO - Settembre 2006.
- [Fabbri2006] M. Fabbri, A. Morandi, S. Lupi, M. Forzan, Relazione PRIN2005 “Tecnologie innovative ad alto rendimento nel riscaldamento ad induzione per trattamenti termici di billette e nastri di alluminio”– Sottoprogetto UNIBO - Novembre 2006.
- [Fabbri2007] M. Fabbri, A. Morandi, S. Lupi, M. Forzan, Relazione PRIN2005 “Tecnologie innovative ad alto rendimento nel riscaldamento ad induzione per trattamenti termici di billette e nastri di alluminio”– Sottoprogetto UNIBO - Febbraio 2007.