

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 53/64
29.10.1953.

F. Amman: CALCOLO DELLE DIMENSIONI DI MINIMO COSTO
PER IL MAGNETE DI UN SINCROTRONE.-

CALCOLO DELLE DIMENSIONI DI MINIMO COSTO
PER IL MAGNETE DI UN SINCROTRONE.- =====

F. Amman - 29 Ottobre (53

Premesse.-

In queste considerazioni si fa riferimento ad un magnete avente la sezione, secondo un piano meridiano, a C; con alcune variazioni esse sono però valide anche per magneti aventi sezioni di forma differente.

E' nota la relazione che lega l'induzione massima nel traferro al raggio dell'orbita stabile in una macchina acceleratrice di particelle relativistiche:

$$1) \quad B_a r = \frac{E}{300} = A \quad (\text{per } E=1000 \text{ MeV ; } A=3.33 \text{ Wb/m})$$

dove B_a induzione massima nel traferro, in Wb/m^2
 r raggio dell'orbita stabile, in m
 E energia finale delle particelle accelerate, in MeV

fissato quindi il valore di E , si vede che una delle due grandezze, r o B_a , può essere scelta a piacere, l'altra restando determinata dalla relazione 1).

Il costo del magnete dipende dalle dimensioni del traferro; bisogna quindi conoscere, per il calcolo di minimo costo, il legame tra queste dimensioni ed il raggio: supporremo, per ora, che tali dimensioni siano funzioni genericamente crescenti col raggio. Aumentando quindi il raggio, aumentano queste dimensioni, ed insieme ad esse, a parità di altre condizioni, l'energia magnetica immagazzinata ed il volume.

Come influisce invece B_a sul costo? Non tutto il flusso circolante nel circuito di ferro attraverserà il traferro nella zona utile (per zona utile, in prima approssimazione, intendiamo la corona

circolare corrispondente all'estremità dell'espansione polare), quindi, se il circuito di ferro ha sezione costante (poli rettangolari), l'induzione nell'aria è minore di quella nel ferro. Mantenendo uguali le dimensioni geometriche del ferro, non è possibile aumentare il valore di B_a indefinitamente, poichè il valore dell'induzione raggiungibile nel ferro è limitato: indichiamo con B_0 tale valore massimo dell'induzione raggiungibile nel ferro.

Pensiamo ora ad un circuito di ferro di sezione maggiore dell'estremità delle espansioni polari, con poli trapezoidali; la percentuale di flusso utile (flusso nella zona utile del traferro) rispetto al flusso totale generato, circolante nella gamba del C (anzi, per semplificazione supporremo che dal C propriamente detto, escludendo quindi le espansioni polari, non escano tubi di flusso, i quali si suppone escano tutti dalle espansioni polari: questa ipotesi è pessimistica, porta cioè a calcolare il circuito di ferro con una certa abbondanza), sarà minore che nel caso precedente; essendo però la sezione utile minore della sezione del ferro, può darsi che, pur essendo il flusso utile percentualmente minore, l'induzione nella zona utile sia invece maggiore del caso con poli rettangolari. Se ciò avviene, ed in fatto avviene, si vede che per aumentare B_a bisogna in definitiva aumentare la sezione del ferro.

Bisogna quindi trovare i valori di r e di B_a , soddisfacenti alla (1), tali che rendano minimo il costo del magnete, e, contemporaneamente, una forma di poli tale da assicurare, in relazione all'induzione esistente nel traferro, un buon sfruttamento del ferro, ciò che si traduce ponendo la condizione che nel ferro l'induzione abbia il valore massimo compatibile col materiale usato.

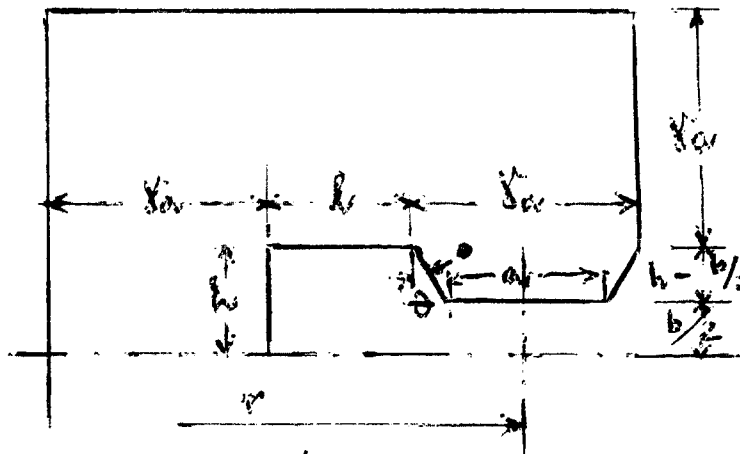
Il costo del magnete è determinato dalle sue dimensioni geometriche (peso del ferro e del rame) e dall'energia magnetica immagazzinata (energia che ad ogni ciclo deve essere trasferita nei condensatori).

Impostazione del problema.-

Assunte come variabili indipendenti le caratteristiche geometriche del magnete, si può vedere che per risolvere il problema è sufficiente il rilievo sperimentale di una sola grandezza, che ci dica l'entità dei flussi dispersi rispetto al flusso utile; scegliamo come funzione da rilevare il rapporto tra il flusso totale ed il flusso utile, che indicheremo con K .

Fatta l'ipotesi che la permeabilità del ferro sia infinita rispetto a quella dell'aria, tale rapporto K dipende solamente dalle caratteristiche geometriche del circuito magnetico, e, dato il suo carattere adimensionale, mantiene lo stesso valore per strutture geometricamente simili.

Fissati che siano i legami tra le dimensioni del traferro a e b (fig.1) e il raggio (si è detto più sopra che a e b sono funzioni genericamente crescenti col raggio) ed inoltre il rapporto tra le due dimensioni h e l della finestra, le caratteristiche geometriche del magnete



risultano funzioni di due variabili, il raggio r e γ , rapporto tra la base maggiore e la base minore del polo (invece di γ si potrebbe prendere l'angolo φ).

Si è detto più sopra che K dipende dalle caratteristiche geometriche del magnete, quindi K sarà funzione di r e di γ . Vi sono d'altra parte due condizioni a cui debbono soddisfare le tre grandezze B_a , r , e γ :

$$(1) \quad r B_a = A$$

$$(2) \quad B_{fe} = B_0$$

La (2), introducendo B_a in luogo di B_{fe} , considerando il flusso totale della sezione larga γa e il flusso utile nella sezione larga a , diviene:

$$(3) B_a = B_o \frac{\gamma}{K}$$

Eliminando poi B_a tra la (3) e la (1) si ottiene:

$$(4) K = \frac{B_a}{A} r \gamma$$

Questa è la condizione cercata che lega le tre grandezze K, r, γ . Bisogna quindi rilevare sperimentalmente la funzione $K = K(r, \gamma)$, esprime geometricamente una superficie. L'intersezione di ~~questa~~ questa superficie con la superficie espressa dalla (4), ci dà una curva dalla quale sono ricavabili i valori di K per valori di r e γ compatibili con la condizione (2), esprime il buon sfruttamento del ferro.

Si può notare che la curva K , intersezione di due superficie, sarà in genere una curva gobba, rappresentabile per mezzo di due curve piane, ad esempio $K = K(r)$ e $\gamma = \gamma(r)$; per un determinato valore di r si ha un valore di k e uno di γ ben fissati.

Praticamente si procede così: si rileva la funzione $K(r, \gamma)$, fissando alcuni valori di r , per ciascuno dei quali si fa poi variare γ ; si riportano poi sul piano $K - \gamma$ le curve di livello della superficie rilevata (intersezione di tale superficie con piani $r = \text{cost}$). Tracciate quindi le linee di livello della superficie espressa dalla condizione (4), per valori di r naturalmente uguali a quelli delle linee di livello della superficie rilevata sperimentalmente, i punti di intersezione tra due corrispondenti linee di livello sono punti della curva cercata; ad ogni punto è associato naturalmente un valore di K , uno di γ ed uno di r . Mediante i punti così ottenuti si tracciano le due curve $K(r)$ e $\gamma(r)$ da cui partire per il calcolo di minimo. Un'osservazione è da farsi a proposito del rapporto h/ℓ (dimensioni della finestra): la finestra quadrata ($2h = \ell$) ren

derebbe minimo il volume del ferro, a parità di altre condizioni; d'altra parte facendo $2h > l$ diminuisce il flusso disperso nella finestra stessa. Alcune considerazioni geometriche e alcuni rilievi di flusso disperso, hanno dato come risultato che finestre con $2h \leq l \leq 1,4h$ sono praticamente equivalenti, entro dei limiti di pochi per cento di variazione sia nel volume che nel coefficiente K.

Dimensioni del traferro.-

Sono state fatte due serie di prove: nella prima serie le dimensioni del traferro sono:

$$a = \alpha r \quad ; \quad b = \beta r \quad \text{con} \quad \alpha = 0.05 \text{ e } \beta = 0.03$$

(traferro proporzionale al raggio)

Nella seconda serie si è invece preso:

$$a = \alpha r \quad ; \quad b = \beta' r + c \quad \text{con} \quad \alpha = 0.05 \quad ; \quad \beta' = 0.025 \quad ; \quad c = 0.02 \text{ m}$$

In questa seconda serie si fa cioè l'ipotesi che le dimensioni lineari della zona utile del traferro debbano essere proporzionali al raggio: il termine costante in b (2 cm) tien conto dello spessore della ciambella e degli avvolgimenti di correzione, spessore che evidentemente non può essere ridotto col raggio.

Prima serie di prove: dimensioni del traferro $a=0.05r$; $b=0.03r$

Dimensioni della finestra.

Detta $M=NI$ la forza magnetomotrice (I corrente massima, N numero di spire), H la forza magnetica, si può scrivere:

$$(5) \quad NI = Hb = \frac{B_a}{\mu_0} \cdot b = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{b}{r} \cdot B_a r$$

Per la (1), e dato che in questa serie $b/r = \beta = \text{cost.}$, la (5) diviene:

$$(6) \quad NI = \beta / \mu_0 \cdot A$$

La corrente totale, e quindi le dimensioni della finestra, non dipendono dal raggio.

Sono stati fissati questi valori:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.05 & \beta &= 0.03 \\ h &= 0.1 \text{ m} & \ell &= 0.16 \text{ m} \\ B_0 &= 1.4 \text{ Wb/m}^{2(*)} & E &= 1.000 \text{ MeV} & A &= 3.33 \text{ Wb/m} \end{aligned}$$

I modelli in vasca sono rappresentati in scala 1:1,56. Sono state fatte 28 prove così distribuite:

$r_1 = 2 \text{ m}$	$2.03 < \gamma < 3.31$	5 prove
$r_2 = 2.5 \text{ m}$	$1.24 < \gamma < 2.95$	6 "
$r_3 = 3 \text{ m}$	$1 < \gamma < 2.08$	6 "
$r_4 = 3.5 \text{ m}$	$1.16 < \gamma < 1.78$	5 "
$r_5 = 4 \text{ m}$	$1 < \gamma < 1.24$	6 "

Nella tabella I sono riportati i risultati ottenuti in questa prima serie di prove.

Dai dati contenuti nella tabella I come già detto si ottiene un valore di K ed uno di γ associati ad ogni valore di r; per tener conto degli errori di misura (dell'ordine dei percento) e di quelli connessi nella costruzione grafica, invece che un solo valore di K ed uno di γ , ad ogni valore di raggio si è associato un valore limite superiore e un valore limite inferiore rispettivamente per γ e per K.

Nella tabella II sono riportati i valori delle seguenti grandezze:

- r raggio
- K rapporto tra flusso totale e flusso utile
- γ rapporto tra la base maggiore e la base minore dell'espansione polare; γ e K sono ricavati dai dati contenuti nella tabella I.
- a = 0.05r dimensione orizzontale del traferro
- b = 0.03r dimensione verticale del traferro

(*) Presumendo un coefficiente di riempimento 0.9 l'induzione massima effettiva nel ferro assume il valore di 1,56 Wb/m, valore raggiungibile in lamierini legati. Le perdite specifiche nel ferro, a 30 p/sec per lamierini con cifra di perdita 1,4 assommano a 1,9 W/Kg.

- $\gamma a = 0.05$ r base maggiore del polo
- $m = 2\gamma a + 2h$ dimensione maggiore del C
- ϑ angolo segnato nella fig.1, la cui tangente è data dalla relazione:
$$\text{tg } \vartheta = \frac{\gamma - 1}{2h - b} a$$
- Volume ferro calcolato mediante la:

$$(8) \quad 2 \times 2 \pi \left(r - \frac{\delta d + \ell}{2} \right) \left(h + \ell + 2\gamma a + \frac{1+\gamma}{2\gamma} \left(h - \frac{b}{2} \right) \right) \gamma a$$
- Peso ferro - peso specifico : 7.5 t/m^3
- Costo ferro - costo specifico: 0,6 milioni lire/t (*)
- Volume rame: calcolato approssimativamente moltiplicando per un coefficiente 3 il volume del rame interno della finestra: sezione del rame nella finestra 0.025 m^2 :

$$(9) \quad 3 \times 2 \pi r \times 0.025$$
- Peso rame - peso specifico: $8,9 \text{ t/m}^3$
- Costo rame - costo specifico: 1 milione lire/t
- W energia magnetica immagazzinata, ottenuta mediante la formula:

$$(10) \quad W = 1/2 \phi_{mf} \times NI = 1/2 \phi_{mf} K \times A / \mu_0 b/r$$
 ma $\phi_{mf} = 2 \pi r a B_a = 2 \pi r \alpha r B_a$ quindi, essendo anche $b/r = \beta$ si ha:

$$(11) \quad W = \frac{\pi}{\mu_0} \alpha \beta A^2 r K$$
- Costo dell'energia magnetica - costo specifico: 0,7 milioni /KJ
- Costo totale somma dei tre costi; ferro, rame ed energia magnetica.

In fig. 2 sono riportati i diagrammi delle più interessanti di queste grandezze. Ciascuna di queste curve è naturalmente limitata tra due valori del raggio: quello per cui si ha $B_a = B_0$ (per raggi minori si avrebbe $B_a > B_0$ e quindi una parte del ferro in cui l'induzione sarebbe maggiore di B_0) e per il quale vale la relazione $\gamma = K$ come facilmente si può dedurre dalla (3); quello per cui $\gamma = 1$ (poli rettangolari).

(*) I costi specifici mi sono stati forniti dall'ing. Sacerdoti.

Dalla fig.2 si ricava che per il caso di traferro variabile in proporzione ad r , la soluzione conveniente è compresa all'incirca tra $r=2,50$ m ed $r=3,60$ m.

Vantaggi delle soluzioni con raggi minori:

- minor costo del basamento, elemento che non entra in questo calcolo di minimo;
- zona utile del traferro maggiore: essendo infatti le facce laterali del polo più inclinate, il campo in cui n è contenuto nei limiti voluti è più grande, mentre più piccole sono le zone morte nei pressi degli spigali dei poli.

Vantaggio principale dei raggi maggiori: la sezione del magnete è più piccola, e quindi più facile la tranciatura del C in un sol pezzo.

In queste prove il valore del raggio associato alle curve di livello della superficie $K(r, \xi)$ rilevata sperimentalmente è ricavabile dalla relazione esprime la condizione di similitudine tra modello e magnete (le lettere con l'apice sono relative al modello, quelle senza al magnete):

$$(12) \quad \frac{a'_n}{a_n} = \frac{h'}{h} \quad \text{ma} \quad a_n = \alpha r'_n, \quad \text{quindi}$$

$$(13) \quad r_n = \frac{h}{h'} \frac{a'_n}{\alpha}$$

Dalla (13) si ricava che i risultati già ottenuti possono, variando semplicemente il valore del raggio relativo ad una curva di livello, essere applicati anche a casi in cui si abbiano valori di h e di α diversi da quelli supposti in queste prove, quando naturalmente le grandezze contenute nella (12) siano sufficienti a definire tutte le dimensioni del modello e del magnete, quando cioè rimangano invariati e indipendenti da r i rapporti h/l e a/b .

E' poi possibile servirsi di tali risultati quando si varino i valori di B_0 ed A , col che varia l'inclinazione delle rette rappresentanti le curve di livello della superficie (4); unico limite a queste variazioni è il campo entro il quale è stata rilevata la funzione $K(r, \chi)$.

Seconda serie di prove: dimensioni del traferro: $a=0.05r$; $b=0.025r + 0.02$ m

In questo caso le dimensioni della finestra non sono più costanti al variare di r ; la (6) diviene infatti:

$$(14) NI = \frac{A}{\mu_0} \left(\beta' + \frac{c}{r} \right) \quad \text{dove} \quad \beta' = 0.025 \quad ; \quad c = 0.02 \text{ m}$$

Nelle prove però tali dimensioni sono state mantenute costanti ed uguali a quelle della prima serie di prove; lo scostamento è piccolo entro il campo rilevato (scostamento massimo nella sezione; 10%), e, d'altra parte, la prima serie di prove ha posto in luce che piccole variazioni nella dimensioni della finestra praticamente non influenzano il valore di K .

Nel calcolo del volume del rame si è invece tenuto conto della variazione di NI con r , adottando la formula (vedere formula (9)):

$$(15) Vol_{cu} = 3 \times 2\pi r \times 0.025 \frac{b}{0.03r}$$

Risulta quindi, per piccoli raggi, un volume di rame un poco maggiore di quello trovato nel caso esaminato nella prima serie di prove; il volume di ferro avrebbe dovuto essere maggiorato anch'esso, rispetto a quello calcolabile con la formula (8); l'effetto è però piccolo, ed essendo poi piccola l'influenza del costo del ferro sul costo totale, non si è tenuto conto di questa maggiorazione.

Nella seconda serie di prove sono quindi fissati i seguenti valori:

$$\begin{array}{lll} a = 0.05r & & b = 0.025r + 0.02 \text{ m} \\ \text{per } r = 4\text{m} & h = 0.1 \text{ m} & l \approx 0.16 \text{ m} \\ B_0 = 1.4 \text{ Wb/m} & E = 1.000 \text{ MeV} & A = 3.33 \text{ Wb/m} \end{array}$$

Sono state fatte sette prove, così distribuite:

r_1	= 2m	$\gamma = 3.05$	1 prova
r_2	= 2,5 m	$2.47 < \gamma < 2.95$	2 prove
r_3	= 3 m	$1.67 < \gamma < 2.08$	2 "
r_4	= 3,5 m	$1.42 < \gamma < 1.78$	2 "

Le prove per $r_5 = 4$ m coincidono con quelle della prima serie di prove, poichè, come è facile constatare, coincidono le dimensioni del traferro.

Nella Tabella III si riporta i valori delle grandezze di cui si è già detto parlando della prima serie di prove; uniche differenze:

- il calcolo del volume di rame: se ne è parlato più sopra (vedi la (15)).
- il calcolo dell'energia magnetica immagazzinata: la (11) viene sostituita dalla:

$$(16) \quad W = \frac{\pi}{\mu_0} \alpha' \beta' A^2 \times K \left\{ r + \frac{c}{\beta} \right. = \frac{\pi}{\mu_0} \alpha' \beta' A^2 \times K (r + 0.8m)$$

La fig.3, analogamente alla fig.2, riporta i diagrammi più interessanti relativi a questa seconda serie di prove. Da essi si ricava che la soluzione più conveniente è compresa all'incirca tra $r = 3,20$ ed $r = 4,20$ m.

Poichè a ed h non sono più sufficienti a definire le dimensioni del magnete, ma bisogna anche dare c o r oppure b (oppure si può anche dire: poichè il rapporto a/b dipende da r), non sono più valide le conclusioni tratte dall'espressione (13) sull'utilizzazione dei dati rilevati per valori diversi di h ed α .

Si possono invece variare B_0 ed A , sempre che il campo dei valori rilevati sia sufficientemente ampio.

Ipotesi semplificativa per il calcolo di K.-

Servendosi dei valori rilevati nella prima e nella seconda serie di prove è possibile controllare sperimentalmente una ipotesi a-

vanzata dall'ing. Sacerdoti.

Tale ipotesi dice che il flusso disperso, per una determinata forma di magnete, non varia quando, lasciate immutate tutte le altre dimensioni, si altera la dimensione orizzontale del traferro. Ciò equivale alla seguente relazione, riportata al coefficiente K :

$$(17) \quad K'' = (K' - 1) \frac{a'}{a''} + 1$$

Se si trascura l'effetto dovuto ad una piccola differenza nelle dimensioni della finestra (effetto che abbiamo già detto essere piccolo), si può riportare l'effetto di una variazione di b , tenendo costante a , ad una variazione di a , tenendo costante b , per mezzo di un semplice cambiamento di scala. La (17) diviene allora :

$$(18) \quad K'' = (K' - 1) \frac{b''}{b'} + 1$$

Nella tabella V sono riportati i valori di K' , $\frac{b''}{b'}$, K''_c (calcolati mediante la (18)), K''_r (rilevati), e $e = \frac{K''_c - K''_r}{K''_c}$; le lettere con un apice si riferiscono alla prima serie di prove, quelle con due alla seconda serie.

Si può vedere che per $b''/b' \leq 1.05$ lo scostamento e è trascurabile inferiore agli errori di misura, mentre per valori di $b''/b' > 1.1$ comincia a farsi sensibile.

TABELLA I

prova n.	mod.n.	a' (mm)	b' (mm)	r(m)	J	K
1	11	64	38.4	2	3.31	3.00
2	12	64	38.4	2	3.05	2.94
3	12	64	38.4	2	3.05	2.92
4	13	64	38.4	2	2.44	2.64
5	14	64	38.4	2	2.03	2.50
6	21	80	48	2.5	2.47	2.66
7	21	80	48	2.5	2.47	2.68
8	22	80	48	2.5	2.00	2.37
9	23	80	48	2.5	1.59	2.25
10	24	80	48	2.5	1.24	2.01
11	25	80	48	2.5	2.95	2.99
12	31	96	57.6	3	2.08	2.48
13	31	96	57.6	3	2.08	2.49
14	32	96	57.6	3	1.67	2.17
15	32	96	57.6	3	1.67	2.18
16	33	96	57.6	3	1.40	2.13
17	34	96	57.6	3	1.00	1.91
18	41	112	67.2	3.5	1.78	2.34
19	41	112	67.2	3.5	1.78	2.30
20	42	112	67.2	3.5	1.42	2.07
21	42	112	67.2	3.5	1.42	2.03
22	43	112	67.2	3.5	1.16	1.94
23	51	128	76.8	4	1.24	1.92
24	51	128	76.8	4	1.24	1.90
25	52	128	76.8	4	1.17	(1.94)
26	52	128	76.8	4	1.17	1.87
27	53	128	76.8	4	1.00	1.79
28	53	128	76.8	4	1.00	1.76

TABELLA II

r	(m)	2,5		3		3,5		4	
K		2,74	2,84	2,2	2,3	1,96	2,04	1,78	1,86
g		2,62	2,72	1,75	1,82	1,33	1,38	1,06	1,11
a	(m.)	0,125		0,15		0,175		0,20	
b	(m.)	0,075		0,09		0,105		0,12	
g _a	(m.)	0,327	0,34	0,262	0,271	0,233	0,241	0,212	0,222
m		0,855	0,88	0,725	0,743	0,666	0,683	0,624	0,644
θ		58°20'	59°50'	45°40'	48°10'	31°20'	35°	8°30'	15°10'
Vol. ferro	(m ³)	8,89	9,41	7,61	8,02	7,4	7,84	7,34	7,88
Peso u-	(t)	66,7	70,6	57,1	60,1	55,5	58,8	55	59
Costo u-	(Lit x 10 ⁶)	40	42,4	34,3	36,1	33,3	35,2	33	35,4
Vol. rame	(m ³)	1,175		1,41		1,65		1,885	
Peso u-	(t)	10,45		12,55		14,7		16,75	
Costo u-	(Lit x 10 ⁶)	10,45		12,55		14,7		16,75	
W	(kJ)	286	297	276	289	287	290	296	309,5
Costo Energia	(Lit x 10 ⁶)	200	208	193	202	201	209	207	217
Costo totale	(Lit x 10 ⁶)	250	262	240	251	249	259	257	269

TABELLA III

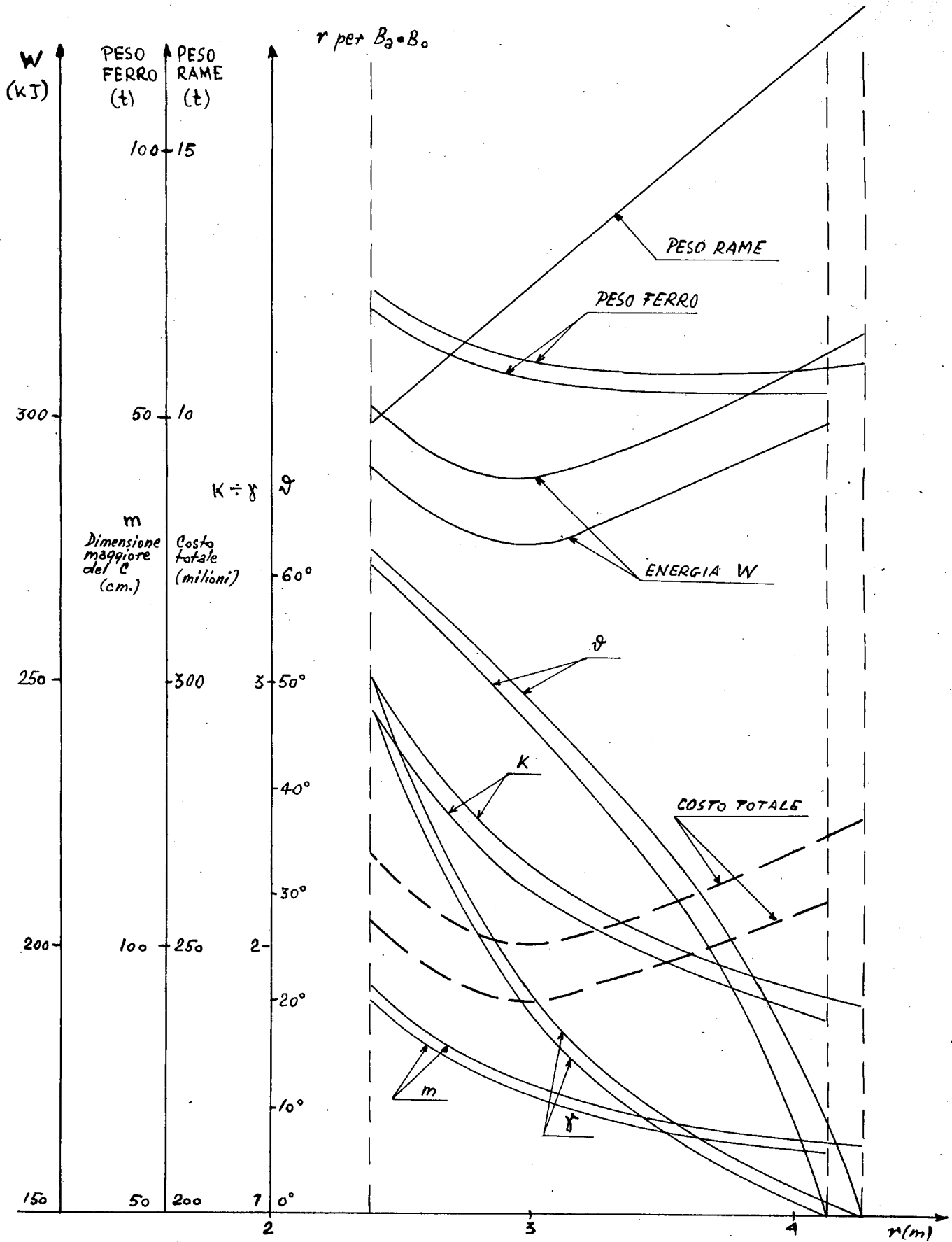
prova n.	mod. n.	a' (mm)	b' (mm)	r(m)	Y	K
1	12	64	44.8	2	3.05	3.11
2	21	80	52.8	2.5	2.47	2.75
3	25	80	52.8	2.5	2.95	3.05
4	31	96	60.8	3	2.08	2.56
5	32	96	60.8	3	1.67	2.22
6	41	112	68.8	3.5	1.78	2.31
7	42	112	68.8	3.5	1.42	2.05

TABELLA IV

α	(m)	2,5		3		3,5		4	
K		2,86	3,06	2,38	2,47	1,88	2,07	1,78	1,86
γ		2,83	2,96	1,88	1,95	1,34	1,38	1,06	1,11
d	(m)	0,125		0,15		0,175		0,20	
b	(m)	0,0825		0,095		0,1075		0,12	
γ_{21}	(m)	0,354	0,37	0,282	0,283	0,285	0,243	0,212	0,222
γ_{22}	(m)	0,988	0,94	0,764	0,786	0,67	0,686	0,624	0,644
β		62° 50'	64° 20'	51° 50'	53° 40'	32° 50'	36° 30'	8° 30'	15° 10'
Vol feno	(m ³)	10,84	10,75	8,51	9,04	7,5	7,9	7,34	7,88
Peso "	(t)	75,3	80,6	63,8	67,8	56,2	59,2	55	59
Costo "	(£ x 10 ⁶)	42,2	48,3	38,3	40,7	34,7	35,5	33	35,4
Vol rami	(m ³)	1,23		1,43		1,635		1,885	
Peso "	(t)	11,5		13,3		15		16,75	
Costo "	(£ x 10 ⁶)	11,5		13,3		15		16,75	
W	(kJ)	333	350,5	313,5	327	295	310	296	309,5
Costo Energia	(£ x 10 ⁶)	237	247	213,5	223	206,5	217	207	217
Costo totali	(£ x 10 ⁶)	294	307	271	283	256	267	257	269

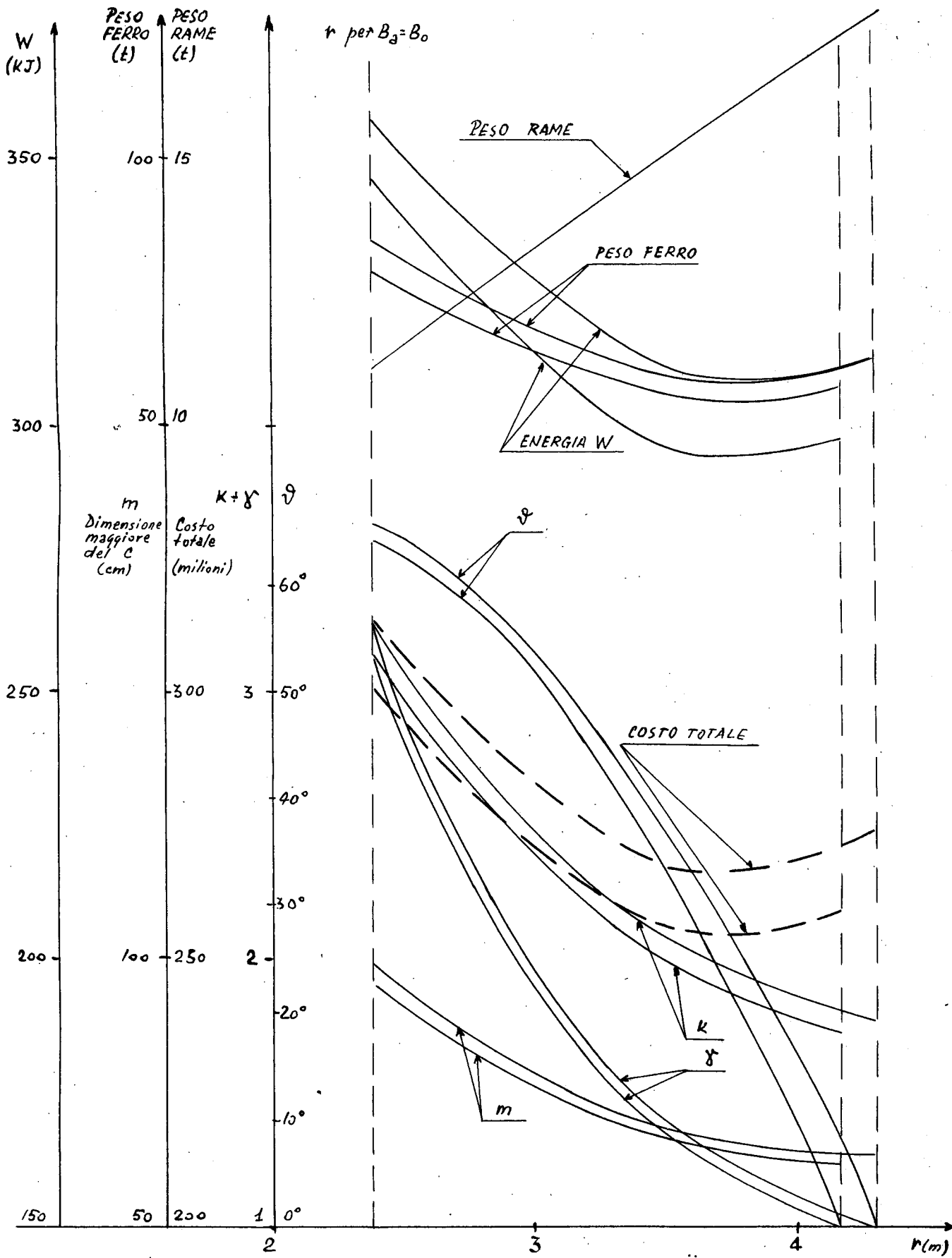
TABELLA V

Modello	K'	$\frac{b''}{b'}$	$\frac{a}{(\text{mm})}$	K''_c	K''_r	$e = \frac{K''_c - K''_r}{K''_r}$
12	2.93	1.166	64	3.25	3.11	4.5%
21	2.67	1.1	80	2.84	2.75	3.3%
25	2.99	1.1	80	3.19	3.05	4.6%
31	2.49	1.055	96	2.58	2.56	0.8%
32	2.18	1.055	96	2.245	2.22	1.1%
41	2.30	1.0238	112	2.33	2.31	0.9%
42	2.03	1.0238	112	2.055	2.05	0.2%



TRAFERRO: $0.05r \times 0.03r$ (m)

FIG. 2



TRAFERRO: $0,058 \times \{0,085 + + 0,02\}$ (m)

FIG. 3