

# FRESATRICI A PORTALE MOBILE “GANTRY”

## Compensazione degli errori di rettilineità mediante misure diagonali di lunghezza

### 1. OGGETTO

L'esperienza ha dimostrato che su una fresatrice a portale mobile (tipo gantry) gli errori di rettilineità nel piano orizzontale degli assi X ed Y (rispettivamente EYX ed EXY) influenzano direttamente gli errori di passo (lunghezza) delle due diagonali orizzontali, misurati con il laser interferometrico.

I due assi interessati sono i seguenti:

asse X (doppio) – movimento del portale sui due banchi, o movimento della traversa sulle due spalle;

asse Y – movimento della slitta orizzontale sulla traversa.

Questa correlazione diretta, confermata da verifiche strumentali, è oggi comunemente sfruttata per compensare gli errori di rettilineità di entrambi gli assi X ed Y.

Il metodo utilizzato ha dimostrato di essere molto utile su assi della lunghezza di 15 ÷ 25 metri, perché su macchine di queste dimensioni le misure interferometriche di lunghezza sono più affidabili delle misure di rettilineità con strumenti ottici.

### 2. PRIMA ESPERIENZA

La correlazione fu scoperta per caso su una macchina in esercizio, come descritto qui di seguito. Gli errori di posizionamento (errori di passo) erano stati compensati in precedenza sui tre assi, e si presentarono come illustrato nella figura 1.

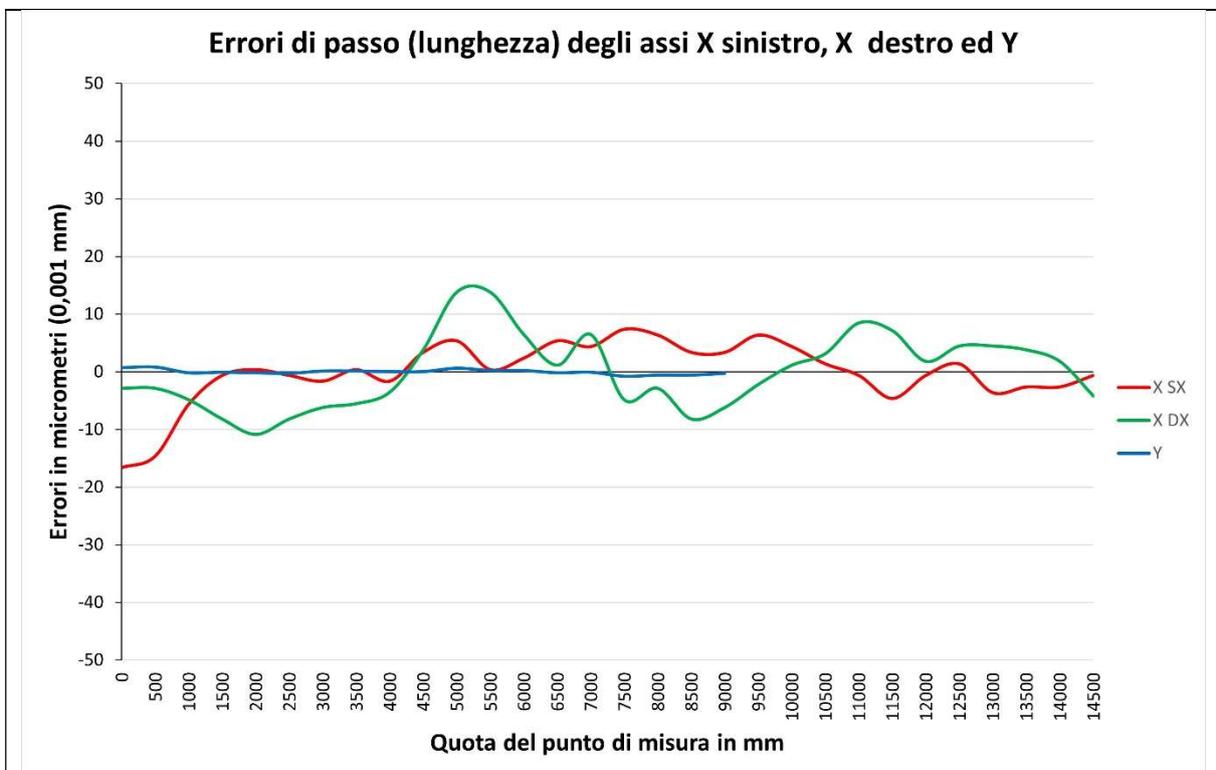


Figura 1 – Errori di passo degli assi orizzontali X1, X2 ed Y

L'errore massimo trovato, su una lunghezza di 14,5 m, era di 0,024 mm per l'asse sinistro X1, 0,025 mm per l'asse destro X2, e molto più basso per l'asse Y, su una lunghezza di 9 m. Furono quindi eseguite misure di lunghezza sulle due diagonali orizzontali, al solo scopo di valutare l'eventuale errore di ortogonalità fra gli assi X ed Y, che avrebbe reso la lunghezza totale di una diagonale maggiore o minore dell'altra.

Il risultato fu una sorpresa (negativa), in quanto molto diverso dalle attese, come illustrato nella figura 2. Le lunghezze totali delle due diagonali erano quasi uguali (le ordinate dei punti estremi dei due grafici) e quindi l'errore di ortogonalità fra gli assi X ed Y era molto limitato, ma lungo la loro corsa le due diagonali presentavano notevoli errori di passo, in punti non corrispondenti, con segno diverso, e di valore molto più elevato degli errori di passo degli stessi assi interpolanti.

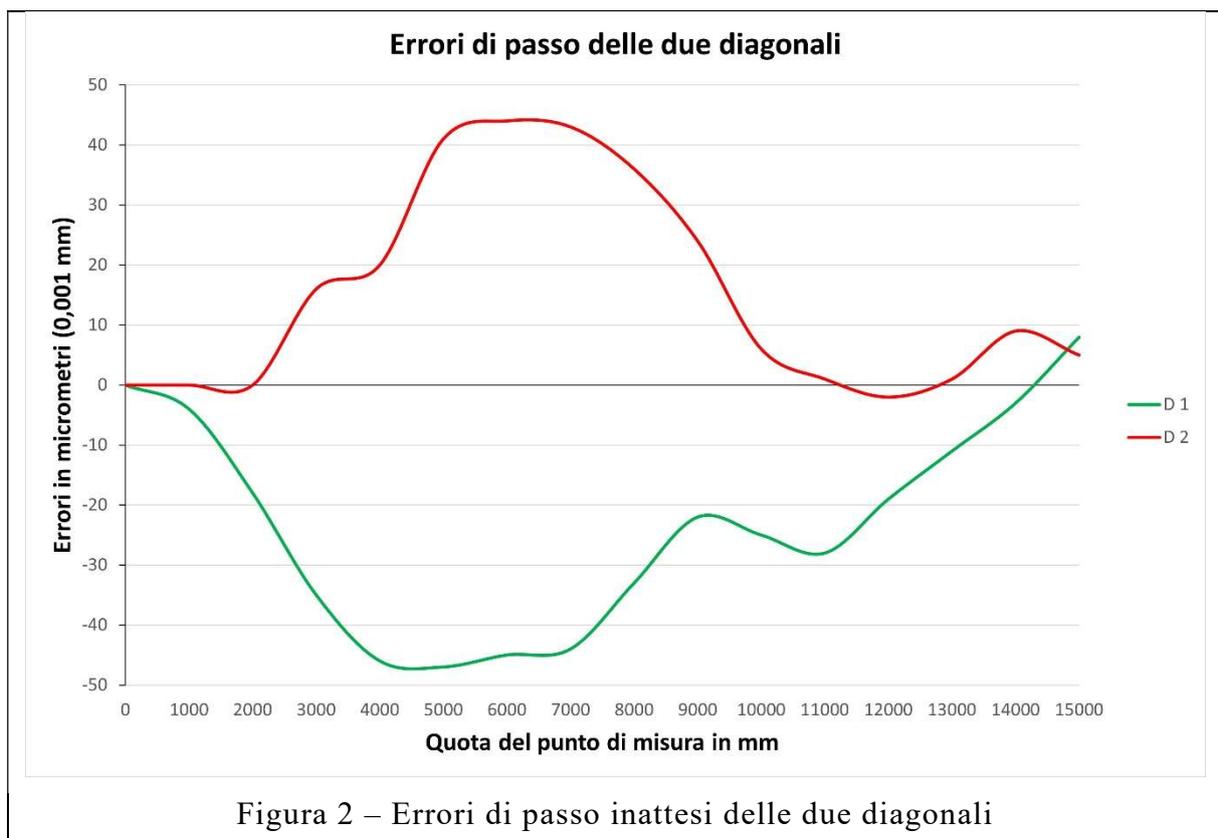


Figura 2 – Errori di passo inattesi delle due diagonali

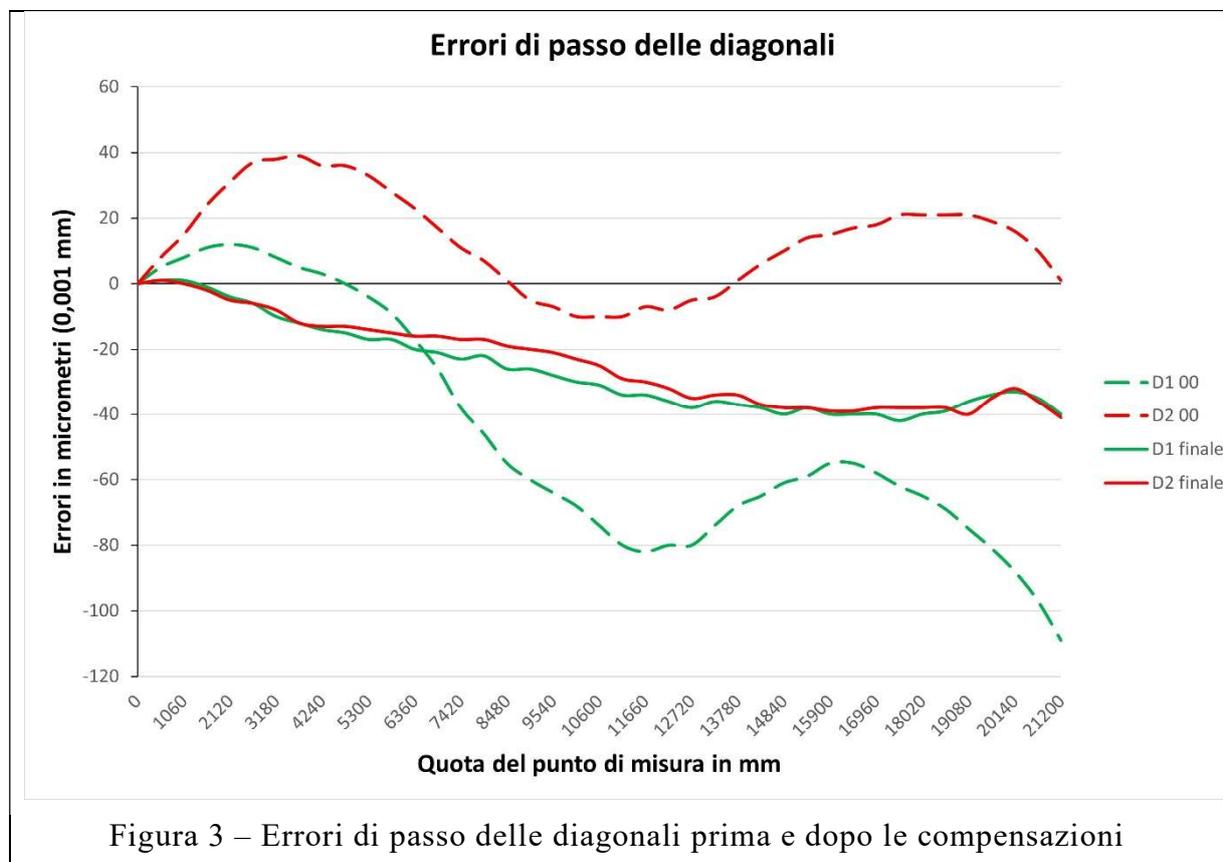
### 3. COMPENSAZIONE DELLA RETTILINEITÀ

Dopo aver identificato la fonte di questi errori, e la relazione matematica fra causa (rettilinearità degli assi) ed effetto (passi delle diagonali), questo tipo di misura divenne rapidamente un metodo semplice e sicuro per compensare gli errori di rettilinearità (degli assi X ed Y), utilizzando misure di lunghezza (delle diagonali).

Un esempio dei risultati ottenuti con questo metodo è descritto qui di seguito.

Su una macchina con un asse X di 20 metri, ed un asse Y di 12 metri (fra il magazzino utensili ed il magazzino teste), dopo una corretta calibrazione degli errori di passo degli assi X-master, X-slave ed Y, fu misurata la lunghezza di entrambe le diagonali, con i seguenti risultati.

Entrambe le diagonali presentavano significativi errori di passo ed un evidente errore di ortogonalità fra l'asse Y e l'asse X, illustrati dai grafici tratteggiati della figura 3 (D1 00 e D2 00). Inizialmente fu corretto l'errore di ortogonalità spostando lo zero dell'asse X-slave, in modo da minimizzare la differenza di lunghezza totale fra le due diagonali.



Dagli errori di passo così aggiornati furono calcolati gli errori di rettilineità di entrambi gli assi X ed Y, ottenendo i grafici tratteggiati delle figure 4 e 5 (EYX 00 ed EXY 00).

Sulla base dei dati ottenuti, gli errori di rettilineità degli assi X ed Y furono corretti mediante le compensazioni software del controllo numerico e, successivamente, con i laser ancora allineati sulle diagonali, si misurarono nuovamente i loro errori di passo, con i risultati illustrati dai tracciati continui della figura 3 (D1 finale e D2 finale).

Dagli errori di passo finali delle diagonali furono nuovamente calcolati per verifica gli errori di rettilineità degli assi X ed Y e si ottennero i risultati illustrati dai tracciati continui delle figure 4 e 5 (EYX finale ed EXY finale).

Essi furono confermati da misure geometriche, a meno delle relative incertezze di misura che, come citato in precedenza, sono molto maggiori su misure ottiche di rettilineità che su misure interferometriche di lunghezza.

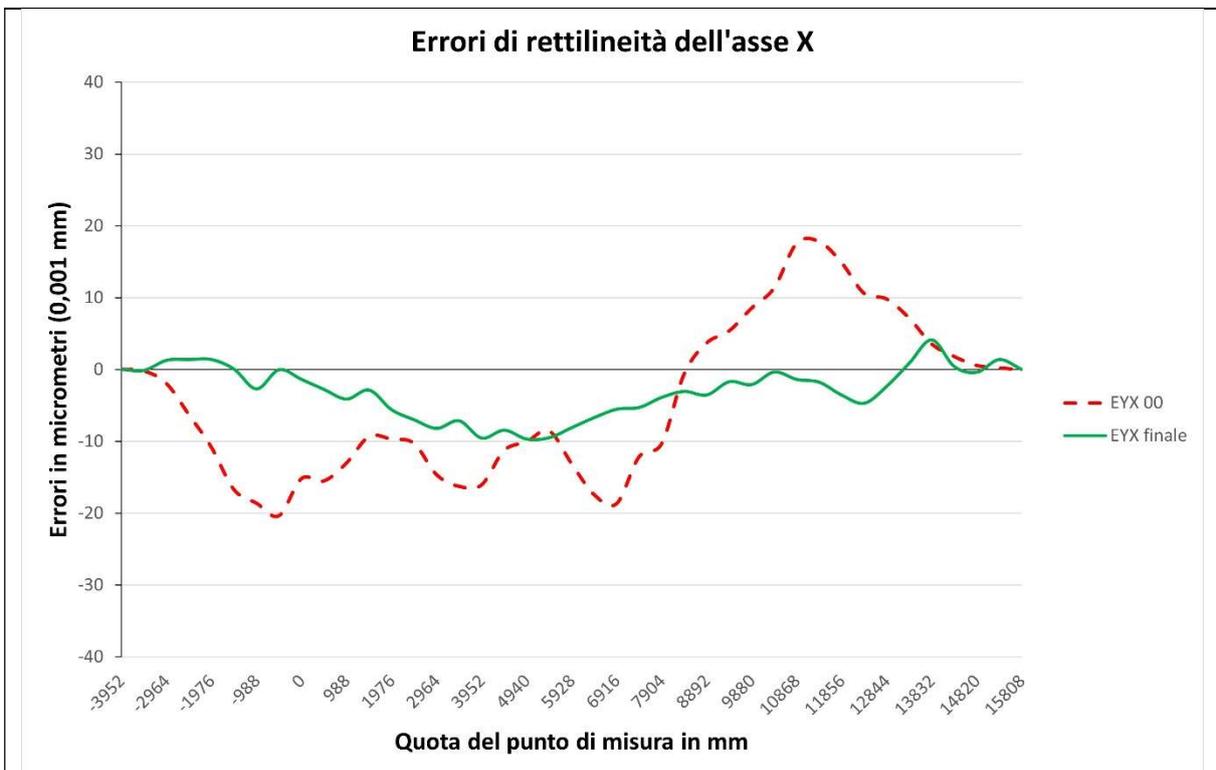


Figura 4 – Errori di rettilineità dell'asse X, prima e dopo le compensazioni

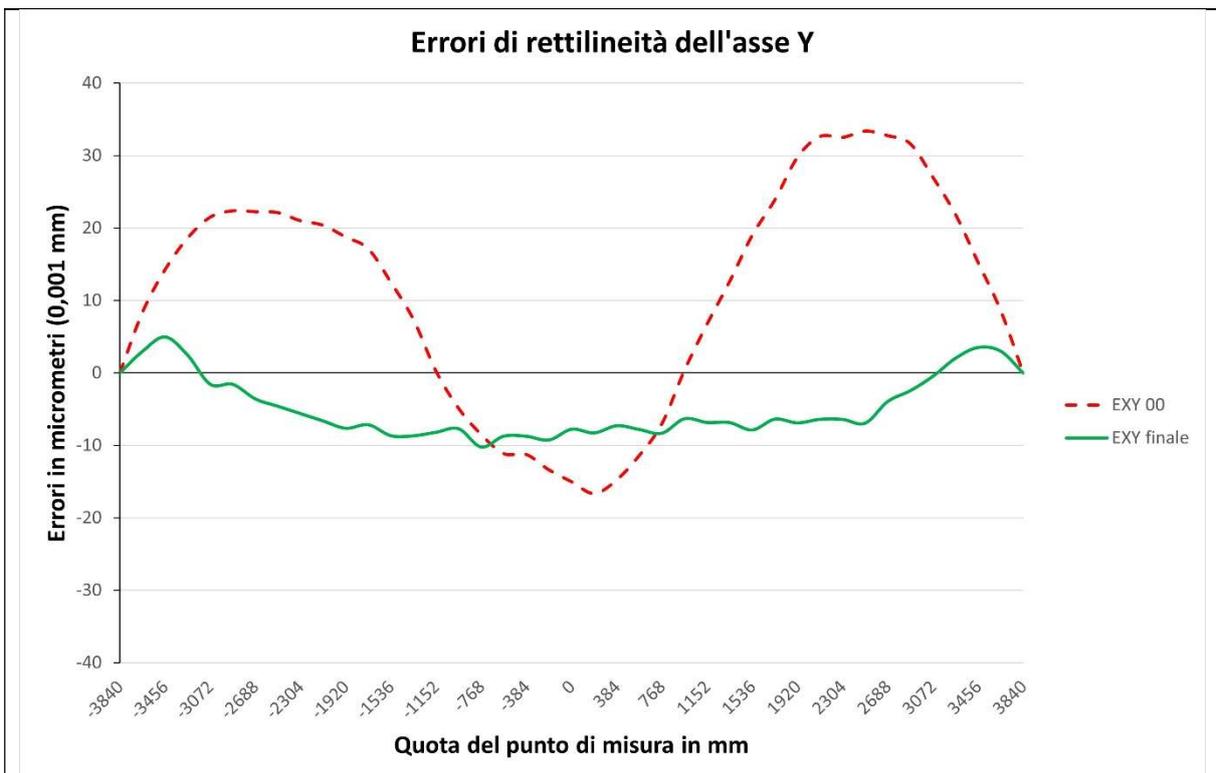


Figura 5 – Errori di rettilineità dell'asse Y, prima e dopo le compensazioni

#### 4. TERNE PITAGORICHE

Uno strumento estremamente pratico per compensare con la medesima tabella sia gli errori di passo sia gli errori di rettilineità di entrambi gli assi X ed Y è l'utilizzo delle terne pitagoriche nella scelta dei passi fra i punti di misura.

Una terna pitagorica è una terna di numeri interi positivi  $a$ ,  $b$  e  $c$  tali da poter costruire un triangolo rettangolo con cateti  $a$  e  $b$  ed ipotenusa  $c$ . Le terne pitagoriche hanno dimostrato di essere molto utili per programmare interpolazioni lineari di assi, utilizzando numeri interi per i passi degli assi interpolanti ed ottenendo numeri interi per la diagonale risultante. Esse permettono di eliminare gli errori di arrotondamento derivanti dagli algoritmi utilizzati dal controllo numerico o dalla risoluzione dei trasduttori di posizione. Una serie di terne pitagoriche note, facilmente reperibile in rete, è elencata nel prospetto 1, in ordine crescente del cateto  $a$ .

**Prospetto 1 - Terne pitagoriche**

Cateto a	Cateto b	Ipotenusa c	Cateto a	Cateto b	Ipotenusa c	Cateto a	Cateto b	Ipotenusa c
3	4	5	24	143	145	69	260	269
5	12	13	28	45	53	84	187	205
7	24	25	28	195	197	85	132	157
8	15	17	32	255	257	88	105	137
9	40	41	33	56	65	95	168	193
11	60	61	36	77	85	96	247	265
12	35	37	39	80	89	104	153	185
13	84	85	44	117	125	105	208	233
15	112	113	48	55	73	115	252	277
16	63	65	51	140	149	119	120	169
17	144	145	52	165	173	120	209	241
19	180	181	57	176	185	133	156	205
20	21	29	60	91	109	140	171	221
20	99	101	60	221	229	160	231	281
21	220	221	65	72	97	161	240	289
23	264	265	68	285	293			

A titolo di esempio, le diagonali della macchina riportate nella figura 2 furono misurate utilizzando la terna 3-4-5, con le lunghezze di misura seguenti: 12 metri di X e 9 metri di Y, ed una diagonale risultante di 15 metri; sugli assi furono impostati passi rispettivamente uguali a 400 e 300 millimetri, ottenendo passi diagonali di 500 millimetri.

Analogamente, gli assi di cui alle figure da 3 a 5 furono misurati utilizzando la terna 96-247-265, con lunghezze di misura di 19760 mm per l'asse X, 7680 mm per l'asse Y, e di 21200 mm sulla diagonale; sugli assi furono impostati passi rispettivamente uguali a 494 e 192 mm, con un passo diagonale di 530 mm.

Le terne pitagoriche dovrebbero sempre essere scelte prima di iniziare qualsiasi compensazione, perché sui controlli numerici ogni asse dispone di tre colonne per introdurre i valori, una per gli errori longitudinali (passo) e due per gli errori trasversali (rettilineità), ma i punti di misura e di compensazione sulle tre colonne devono essere gli stessi, sia per gli errori di passo, sia per gli errori geometrici di rettilineità.

## 5. SCELTA DELLA TERNA

Nel prospetto 2 le terne pitagoriche sono ordinate secondo un criterio diverso da quello del prospetto 1. La prima colonna mostra il rapporto fra i due cateti  $b$  ed  $a$ . L'ipotenusa risultante  $c$  è indicata nella quarta colonna.

**Prospetto 2. Terne pitagoriche ordinate in funzione del rapporto  $b/a$  fra i cateti**

$b/a$	$a$	$b$	$c$	$b/a$	$a$	$b$	$c$	$b/a$	$a$	$b$	$c$
1,008	119	120	169	1,768	95	168	193	3,768	69	260	269
1,050	20	21	29	1,875	8	15	17	3,938	16	63	65
1,108	65	72	97	1,981	105	208	233	4,191	68	285	293
1,146	48	55	73	2,051	39	80	89	4,444	9	40	41
1,173	133	156	205	2,139	36	77	85	4,950	20	99	101
1,193	88	105	137	2,191	115	252	277	5,455	11	60	61
1,221	140	171	221	2,226	84	187	205	5,958	24	143	145
1,333	3	4	5	2,400	5	12	13	6,462	13	84	85
1,444	160	231	281	2,573	96	247	265	6,964	28	195	197
1,471	104	153	185	2,659	44	117	125	7,467	15	112	113
1,491	161	240	289	2,745	51	140	149	7,969	32	255	257
1,517	60	91	109	2,917	12	35	37	8,471	17	144	145
1,553	85	132	157	3,088	57	176	185	9,474	19	180	181
1,607	28	45	53	3,173	52	165	173	10,476	21	220	221
1,697	33	56	65	3,429	7	24	25	11,478	23	264	265
1,742	120	209	241	3,683	60	221	229				

Per determinare la diagonale più adatta per un caso specifico si può adottare la procedura seguente. Conoscendo la lunghezza utile di misura dei due assi (escludendo i tratti extra-corsa per le inversioni), si calcola il loro rapporto. Scegliendo nella prima colonna del prospetto il rapporto più simile a quello calcolato, le lunghezze di misura dei due assi si suddividono in multipli o sottomultipli dei valori  $a$  e  $b$  corrispondenti al rapporto scelto. L'ipotenusa risultante sarà un multiplo o sottomultiplo del valore della quarta colonna.

A titolo di esempio, nel caso di due cateti  $a$  e  $b$  uguali, la lunghezza  $c$  della diagonale è un numero irrazionale, con un numero infinito di decimali dopo la virgola. Per utilizzare numeri interi, la terna il cui rapporto  $b/a$  è il più prossimo ad 1 è la prima terna (119-120-169), in cui il rapporto è 1,008.

Se una macchina avesse due assi uguali, ipoteticamente lunghi 4 metri, le lunghezze di misura da adottare potrebbero essere 3927 mm (= 119 mm x 33) e 3960 (= 120 mm x 33), con una diagonale risultante di 5577 mm (= 169 mm x 33). Questo è solo un esempio, per dimostrare come il principio possa essere agevolmente utilizzato con qualsiasi rapporto fra gli assi X ed Y, per individuare la terna più adatta.

Con questo semplice metodo la matematica dà un sostanziale contributo alla geometria.

## **6. PERCHÉ SOLO GANTRY**

Tutti i ragionamenti sviluppati sopra sono validi per macchine a portale (o traversa) mobile, dove l'asse X si muove su due guide, ed il presupposto indispensabile è che gli errori di passo dei due assi X (X-master ed X-slave, o X ed U, o X1 ed X2, comunque si chiamino) siano stati calibrati decentemente, con la conseguenza di produrre scostamenti angolari di imbardata dell'asse X minimi, e quindi con un'influenza trascurabile sugli errori di passo sulle diagonali.

Se i due assi X e l'asse Y presentano errori di passo residui molto bassi, gli errori di passo delle diagonali dipendono in massima parte dagli errori geometrici di rettilineità, che possono essere calcolati e compensati.

Diverso è il caso delle macchine con un unico montante mobile, dove gli errori di rettilineità dell'asse X comportano scostamenti angolari di imbardata non trascurabili, che influiscono in modo diretto ma complesso sugli errori di passo delle diagonali, complicando i calcoli necessari per discriminare le diverse cause.

Per questi motivi la relazione diretta fra cause ed effetti, la semplicità degli algoritmi, la conseguente precisione dei risultati, ed i benefici geometrici immediati e verificabili, sono argomenti validi solo per macchine con due assi X.