



# Il controllo numerico



# La lavorazione ed il controllo

- Le prime macchine a controllo numerico CN furono costruite nella metà circa degli anni '50 ma la loro diffusione su larga scala ebbe inizio negli anni '70.
- Con il Controllo Numerico si sfrutta l'informatica e l'elettronica per migliorare prestazioni, automazione e flessibilità delle macchine utensili



# Il controllo numerico

- Le macchine dotate di controllo numerico necessitano di un'operatività da parte dell'uomo completamente diversa rispetto alla macchina tradizionale
- Il controllo numerico (CN) consente di trasmettere informazioni alla macchina utensile sotto forma di numeri contenuti in un programma e di determinarne di conseguenza tutti i movimenti
- La prima macchina in assoluto è stata costruita negli USA nel 1947 per l'industria aeronautica per la necessità di ottenere superfici complesse in tempi ragionevoli. La soluzione consistette nel controllo continuo degli utensili secondo movimenti coordinati e contemporanei nei tre assi cartesiani (assi controllati)



# Evoluzione tecnologica

## ■ Macchina tradizionale

- Alta manualità
- Tempi di fermo macchina consistenti
- Possibilità di errori
- Elevata dipendenza di produttività e qualità dall'abilità dell'operatore

## ■ Macchina CN

- Tempi passivi ridotti
- Errori possibili solo in fase di programmazione
- Produttività molto elevata
- Qualità sostanzialmente svincolata dalle capacità operative dell'uomo



# Interfaccia uomo-macchina

## ■ Macchina tradizionale

- Analisi del disegno
- Attività mnemoniche  
Individuazione sequenza  
operazioni
- Fissaggio pezzo
- Fissaggio utensili
- Impostazione dei parametri  
di lavorazione
- Esecuzione delle  
operazioni

## ■ Macchina CN

- Preparazione del  
programma su PC
- Trasferimento del  
programma alla macchina
- Fissaggio pezzo
- Caricamento utensili
- Supervisione delle  
operazioni



# Opportunità e problemi

## ■ Opportunità

- Elevata automazione
- Elevata flessibilità
- Riduzione tempi passivi
- Aumento produttività
- Miglioramento della qualità
- Riduzione scarti
- Riduzione manodopera
- Aumento versatilità  
(*machining center*)

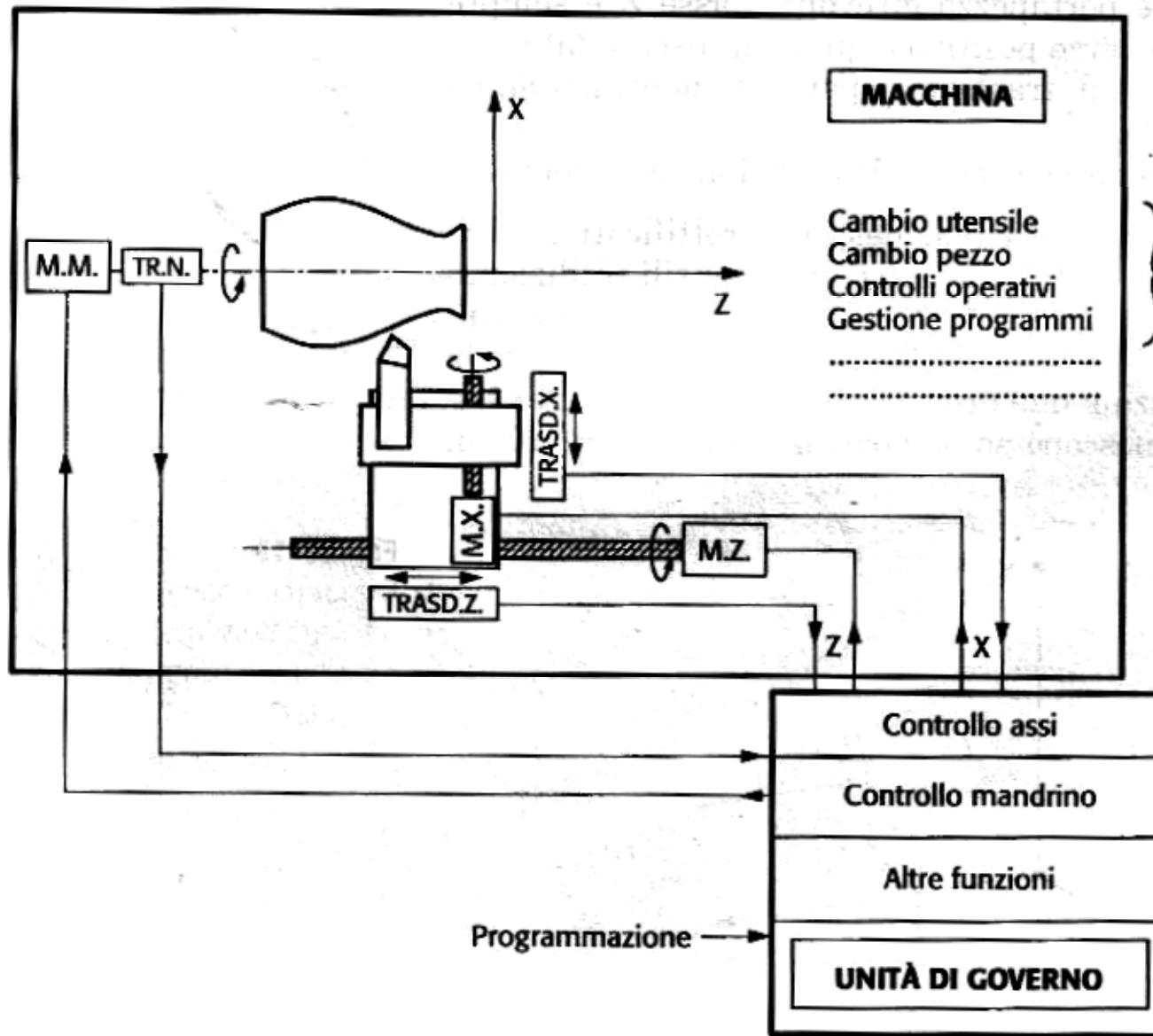
## ■ Problemi

- Costi elevati connessi con:
  - La programmazione dei cicli di lavorazione
  - Gli investimenti di acquisto
  - La manutenzione
  - L'assistenza



# Caratteristiche macchine CN

- Un motore per ogni asse controllato
- Organi in movimento dotati di trasduttori per individuarne continuamente la posizione
- Moti rettilinei guidati da viti a ricircolo di sfere
- Movimenti sincronizzati e simultanei
- Potenze installate mediamente superiori rispetto alle macchine tradizionali
- Velocità dei movimenti superiori rispetto alle macchine tradizionali
- Meccanismi portautensili per *set-up* e il cambio veloci degli utensili
- Dispositivi portapallet per la sostituzione rapida dei pezzi in lavorazione
- Convogliatori tali da facilitare la raccolta e l'evacuazione dei trucioli
- Barriere scorrevoli a delimitare l'area di lavoro per la sicurezza degli operatori



**Fig. 10-12** Schema esemplificativo di una macchina a controllo numerico a due assi (tomio).  
 MM = motore mandrino  
 TR.N = trasduttore velocità angolare mandrino  
 TRASD X, TRASD Z = trasduttori di posizione assi X e Z  
 M.Z, M.X = motori assi Z e X.





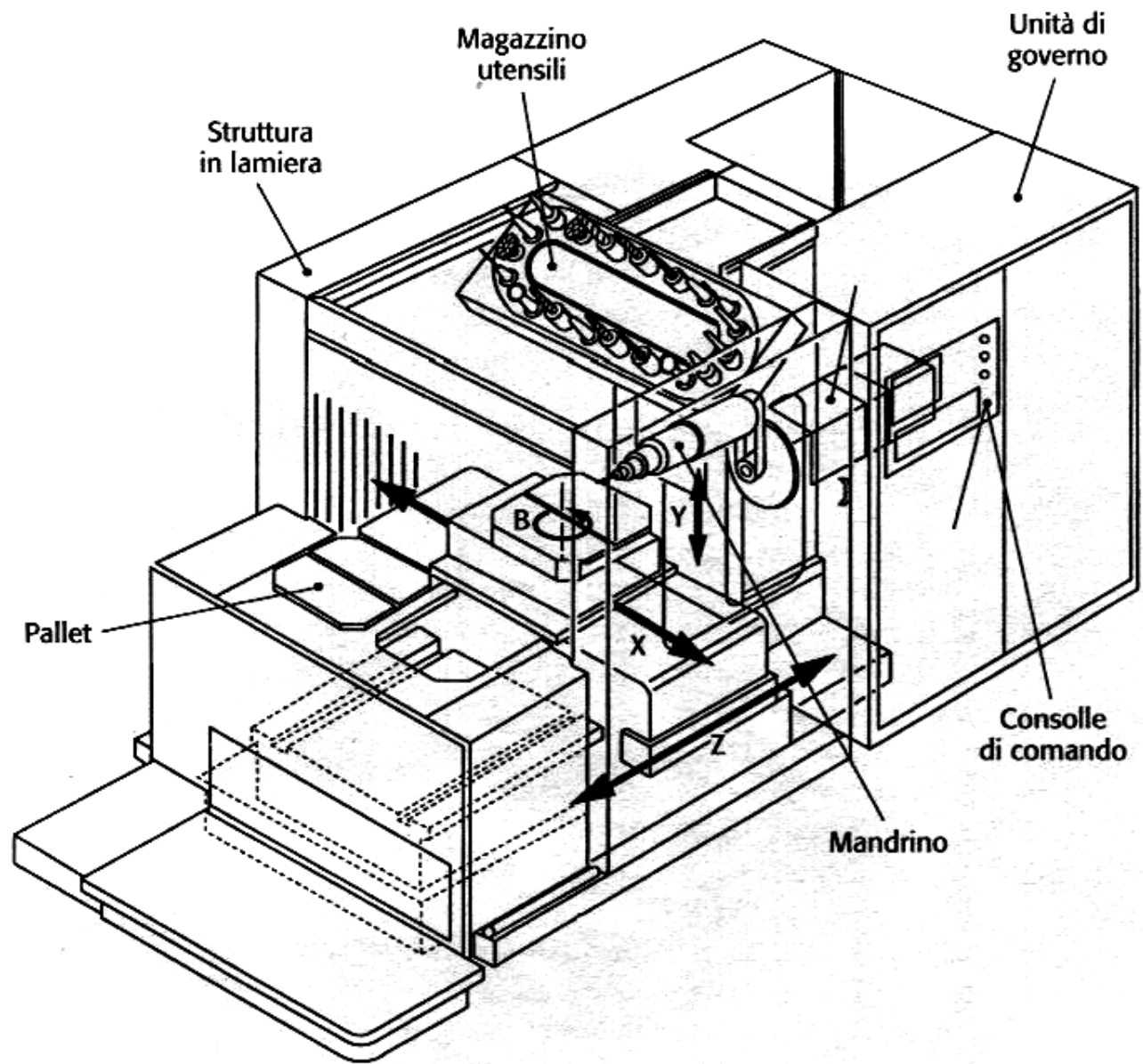
# Assi di riferimento

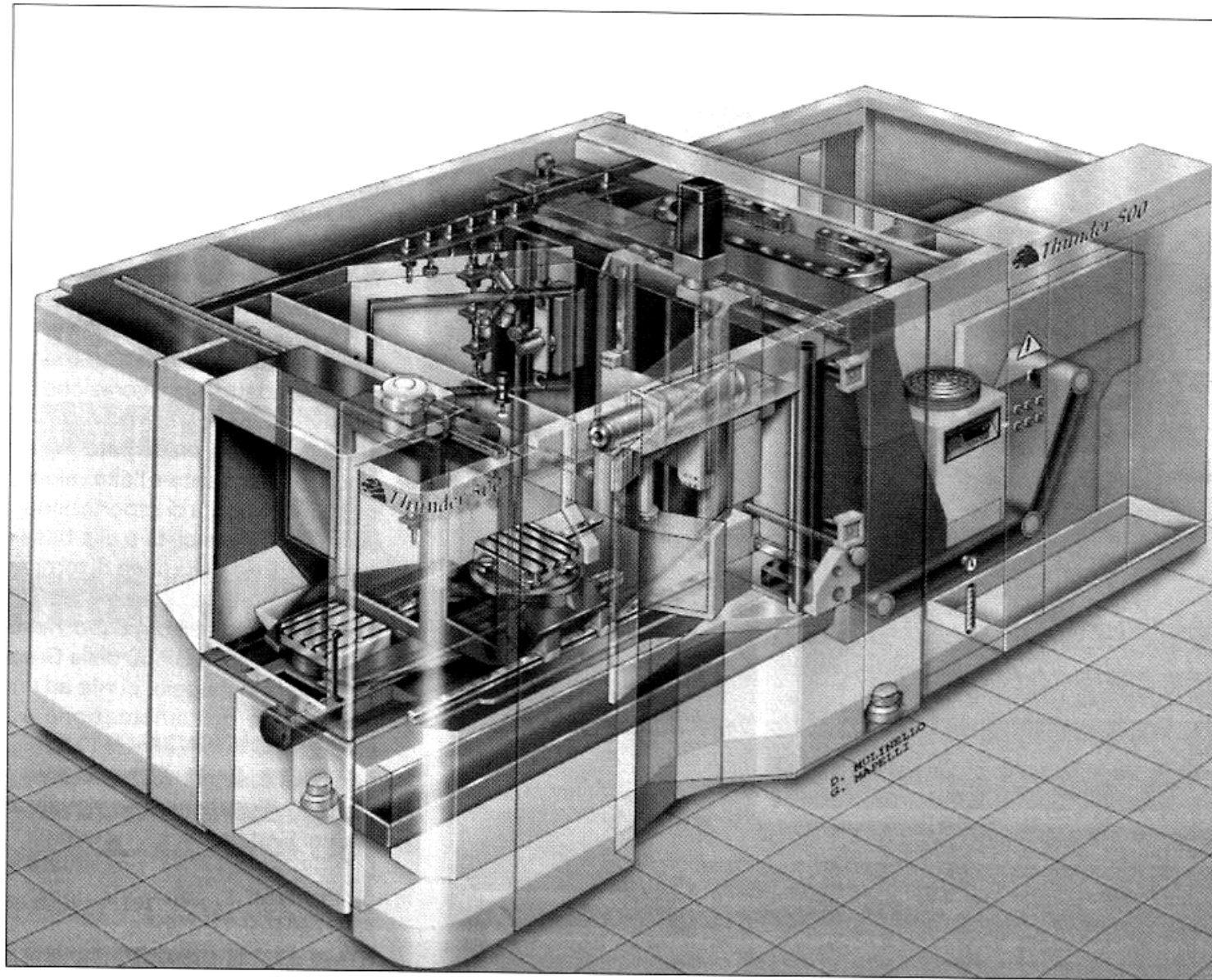
- Esistono elementi di riferimento comuni a tutte le macchine CN:
  - Il pezzo viene considerato sempre fermo
  - Sono gli utensili che sono dotati di movimento
  - Il movimento è individuato attraverso un sistema di tre assi cartesiani X, Y, Z secondo la regola della “mano destra”
  - Le rotazioni attorno a detti assi sono convenzionalmente indicate con A, B, C
  - Ulteriori assi di riferimento paralleli agli assi principali vengono detti U, V, W e quindi P, Q, R

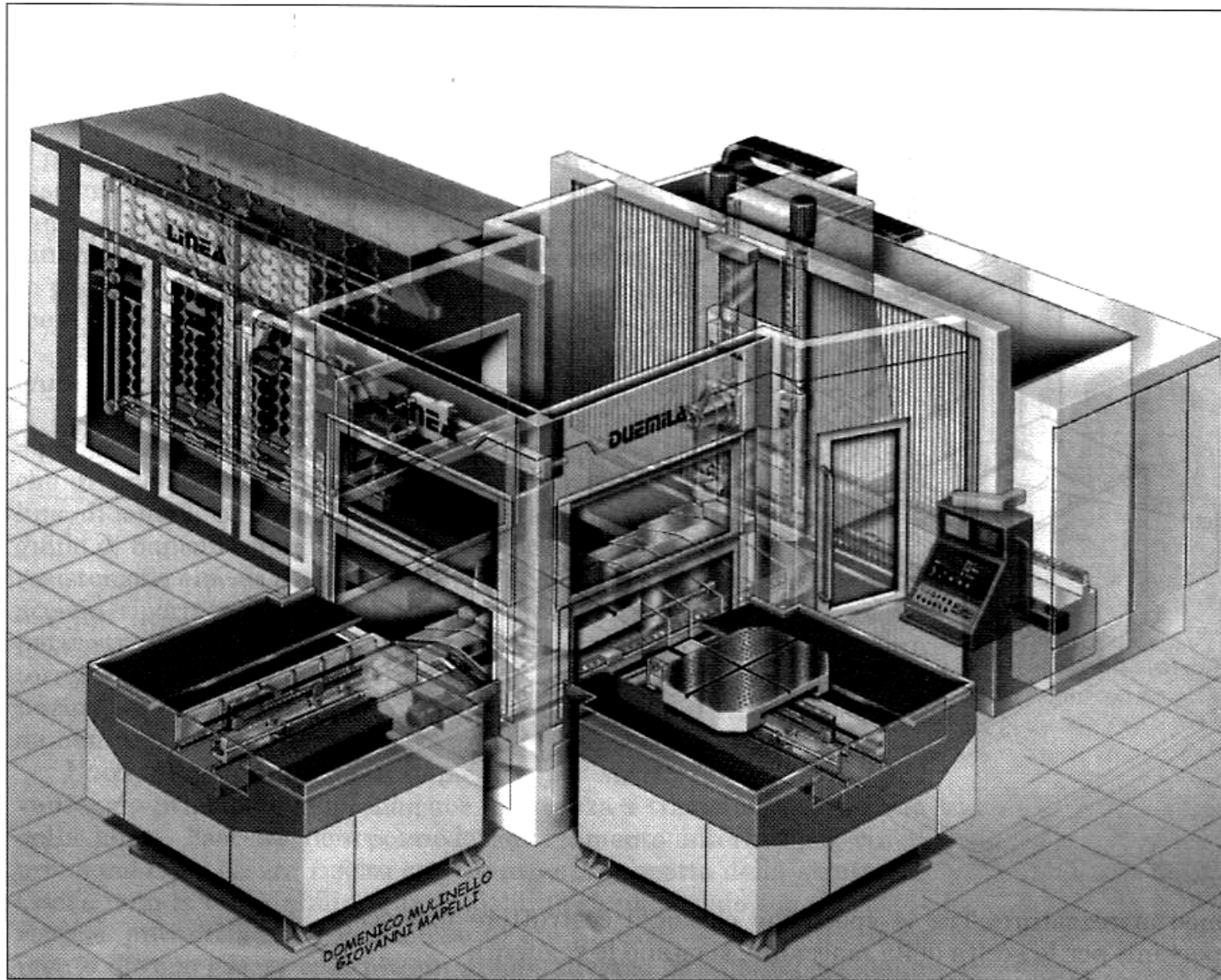


# Centri di lavoro

- Sono macchine multiscopo altamente flessibili sulle quali è possibile effettuare un elevato numero di operazioni (alesatura, foratura, fresatura, filettatura, ....)
- Specifiche per la scelta della macchina:
  - Campo operativo o cubo di lavoro
  - Posizione orizzontale e verticale del mandrino
  - Numero di assi controllati e massima velocità
  - Potenza del mandrino e regimi di rotazione
  - Tipo e dimensioni di attacco portautensile
  - Tipo di magazzino e caratteristiche tecniche
    - Presenza del dispositivo per cambio pallet



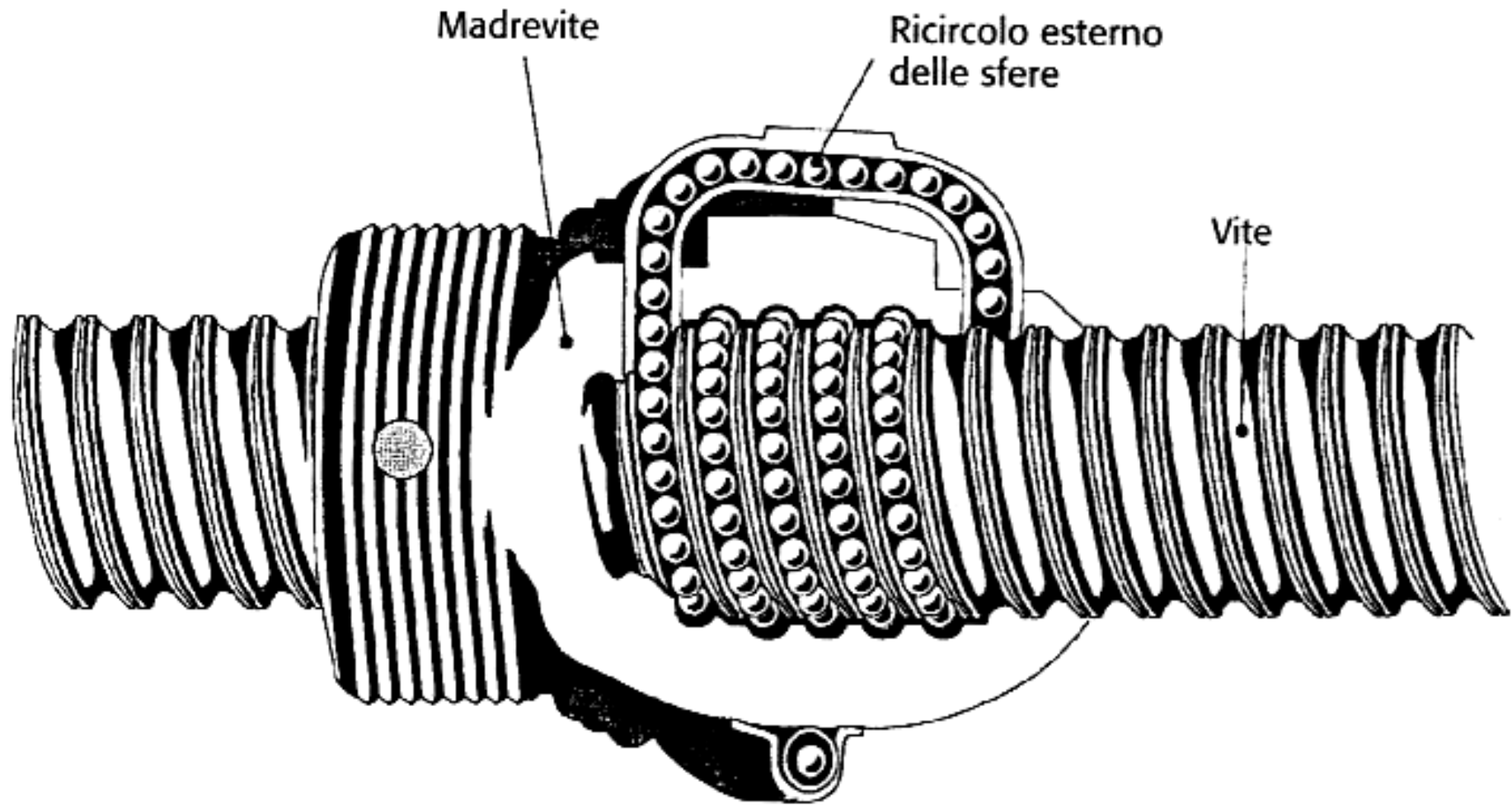






# Struttura meccanica

- Date le velocità e le potenze in gioco, superiori rispetto alle macchine tradizionali, tali macchine devono avere strutture (bancali, teste, montanti, guide) e meccanismi (mandrini, cambi di velocità e di avanzamento) molto più robusti
- Materiali utilizzati: acciaio (resistente) e ghisa (smorzante), ma anche particolari in composti polimerici (o addirittura in calcestruzzo) laddove sussistono problemi di smorzamenti o di attrito
- Problema delle guide in acciaio temperato soggette ad elevati fenomeni di usura per attrito specie alle basse velocità (*stick-slip*):
  - Guide lineari rivestite con materiali polimerici
  - Viti a ricircolo di sfere per la trasmissione e il controllo dei movimenti
  - Sistema di sostentamento idrostatico



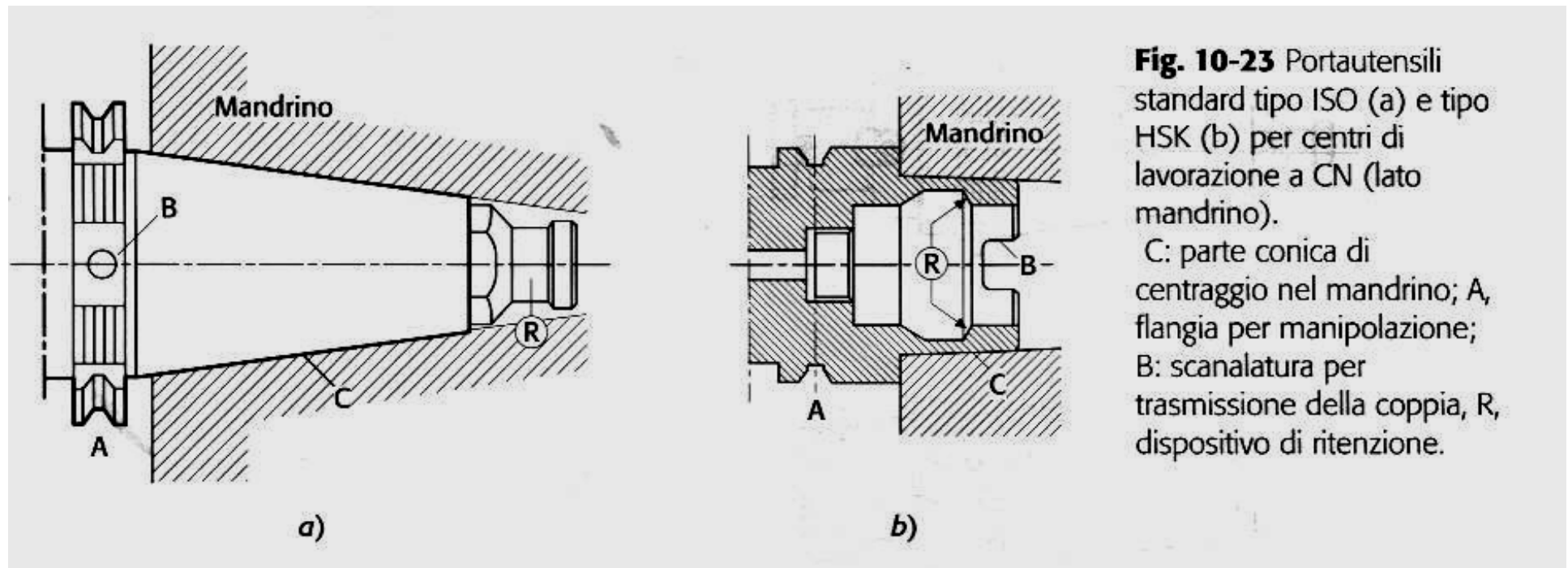


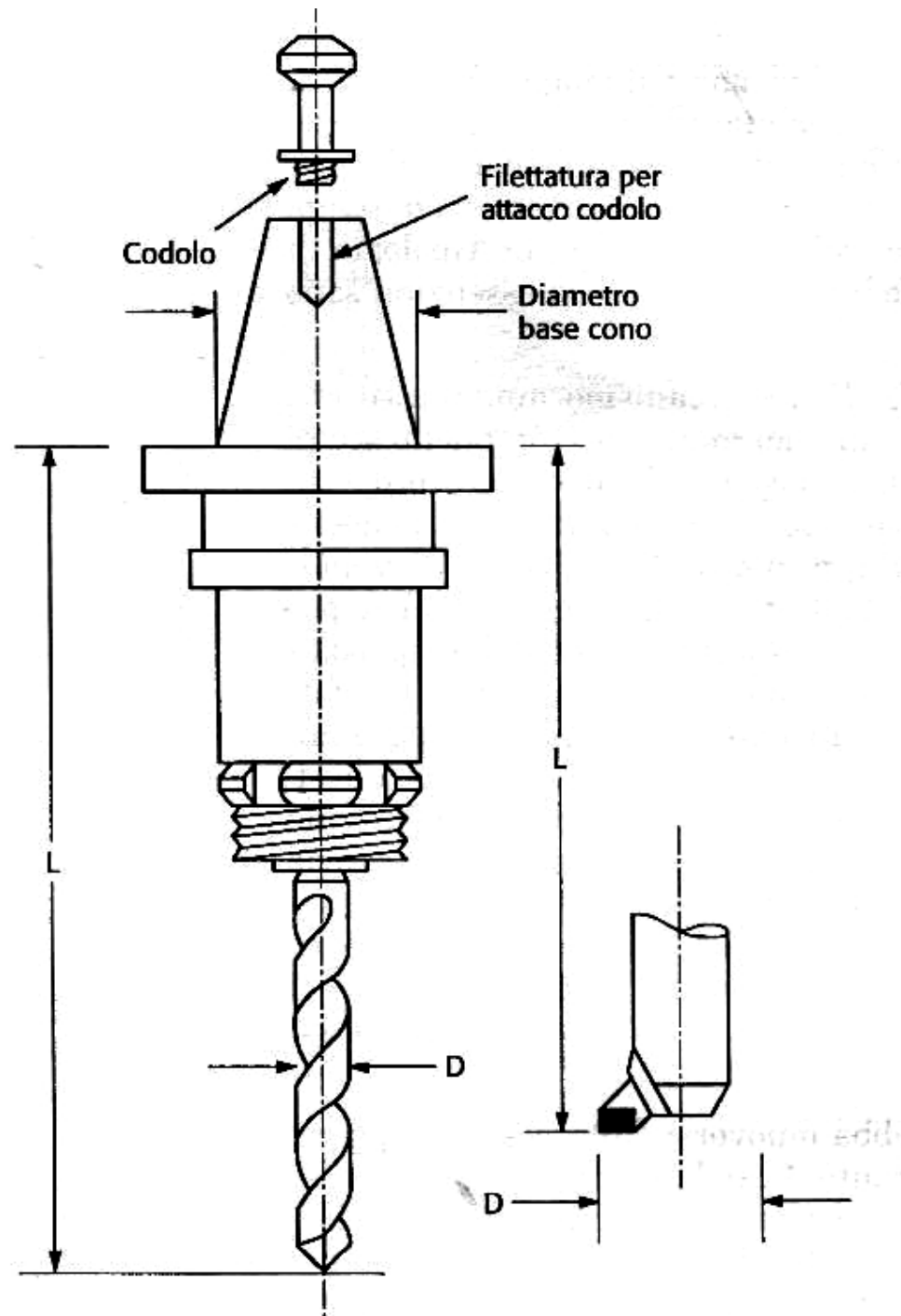
# Utensili e portautensili

- La necessità di cambio automatico di utensili comporta l'utilizzo di portautensili, ovvero interfacce mandrino-utensili di tipo standardizzato
- Le elevate velocità (fino a 20.000-40.000 giri/min) comportano sistemi di fissaggio assolutamente precisi.



# Schema di portautensili







# Magazzini utensili

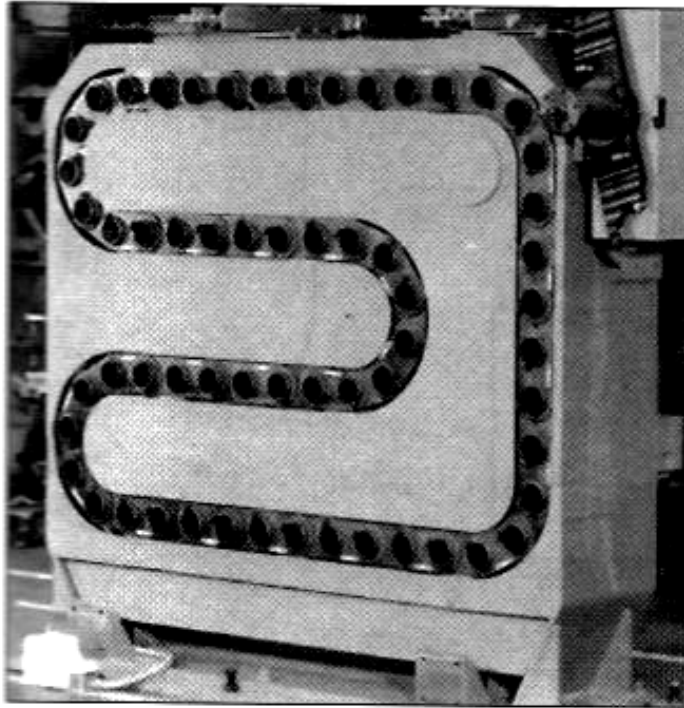
- Tutti gli utensili da impiegarsi per la lavorazione di un pezzo e di un *set* di pezzi devono essere posizionati nel magazzino portautensili della macchina utensile
- Prima di esservi posizionati, *off-line*, sono controllati e ne viene eseguito il *presetting* (determinazione delle loro dimensioni rispetto a un punto di riferimento fisso). Si definiscono così i correttori delle dimensioni di ciascun utensile rispetto alle quote programmate. I correttori devono essere memorizzati nell'unità di governo in modo da poter eseguire correttamente le lavorazioni.
- La capacità dei magazzini utensili può arrivare a qualche centinaio di utensili presenti contemporaneamente



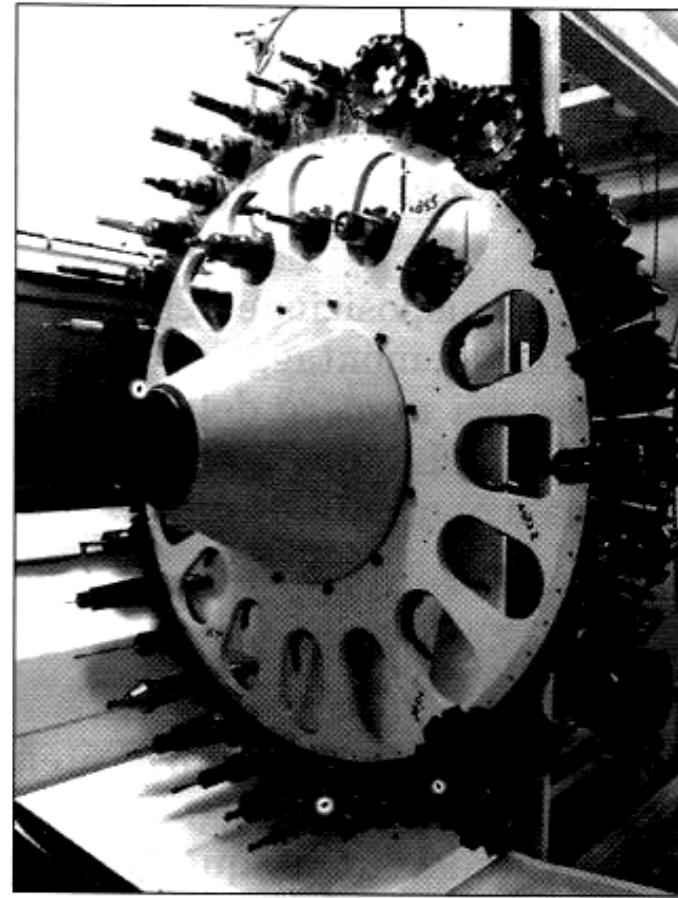
# Magazzini utensili

- Il dispositivo di cambio utensile (ATC – *Automatic Tool Changer*) deve evitare perdite di tempo durante i cambi, ragione per la quale è importante che possa posizionarsi vicino al mandrino quando necessario. I cambi utensile necessitano di qualche secondo (tempo truciolo-truciolo)
  - Sistemi a tamburo rotante, a rastrelliera, a catena
  
- Il sistema di selezione utensili può utilizzare diversi sistemi di gestione:
  - A stazione codificata: con posti precisi assegnati a ciascun utensile
  - A utensile codificato: con lettura grazie ad un *chip* magnetico
  - A utensile programmato: con disposizione iniziale e successiva gestione *random*
  
- Per guadagnare tempo
  - Effettuare la procedura di sostituzione in tempi quanto più possibile mascherati
  - Evitare spostamenti del mandrino che oltretutto potrebbero comportare errori
  - Garantire una sistemazione *random* per ridurre i tempi di sostituzione

# Esempi di magazzini utensili



b)

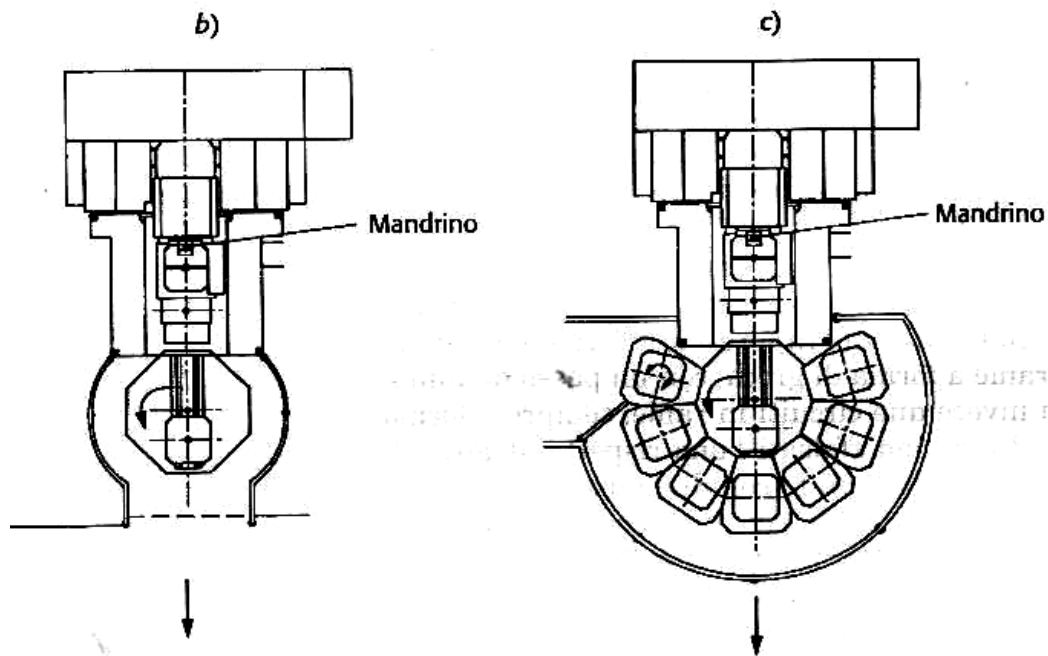
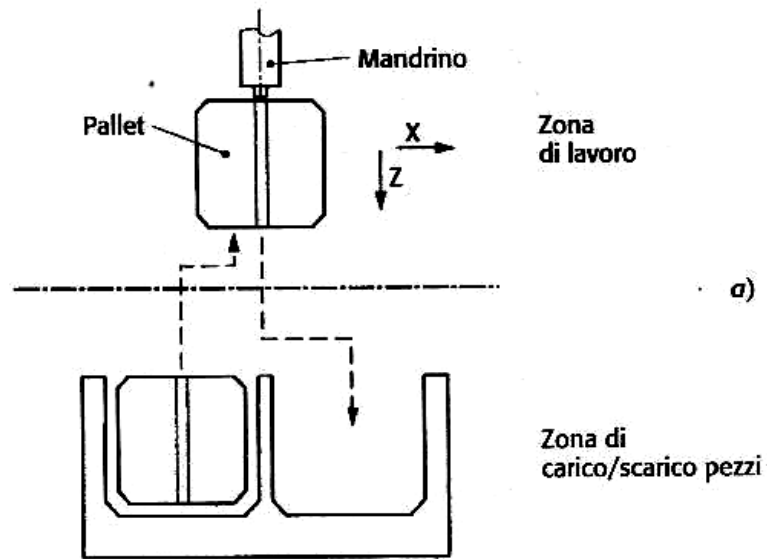


c)



# Sistemi di cambio pezzo

- Il cambio del pezzo deve risultare il più rapido possibile per poter evitare perdite di tempo nelle fasi di lavorazione.
- Viene utilizzata una tavola porta-pezzo (pallet) manipolata da un sistema automatico di movimentazione
- Diversi centri CN possono essere collegati tra loro e prevedere sistemi di trasporto di pallet portapezzo tra un centro e l'altro (*shuttle*)



**Fig. 10-27** Schema di alcuni sistemi di cambio pallet.

a) sistema lineare;  
 b) sistema girevole a 2 stazioni;  
 c) sistema girevole con magazzino pallet.



# Sistema di controllo

- Sistema di controllo degli assi
  - È un sistema ad anello chiuso ove vengono verificati continuamente posizione e velocità di ogni movimento relativo all'asse
  - Il trasduttore di velocità è costituito da una dinamo tachimetrica che fornisce un valore di tensione proporzionale alla velocità angolare dell'albero motore
  - Il trasduttore di posizione dell'asse può essere invece:
    - Diretto se misura linearmente la posizione della tavola
    - Indiretto se misura l'angolo di rotazione della vite di movimentazione rispetto alla madre vite





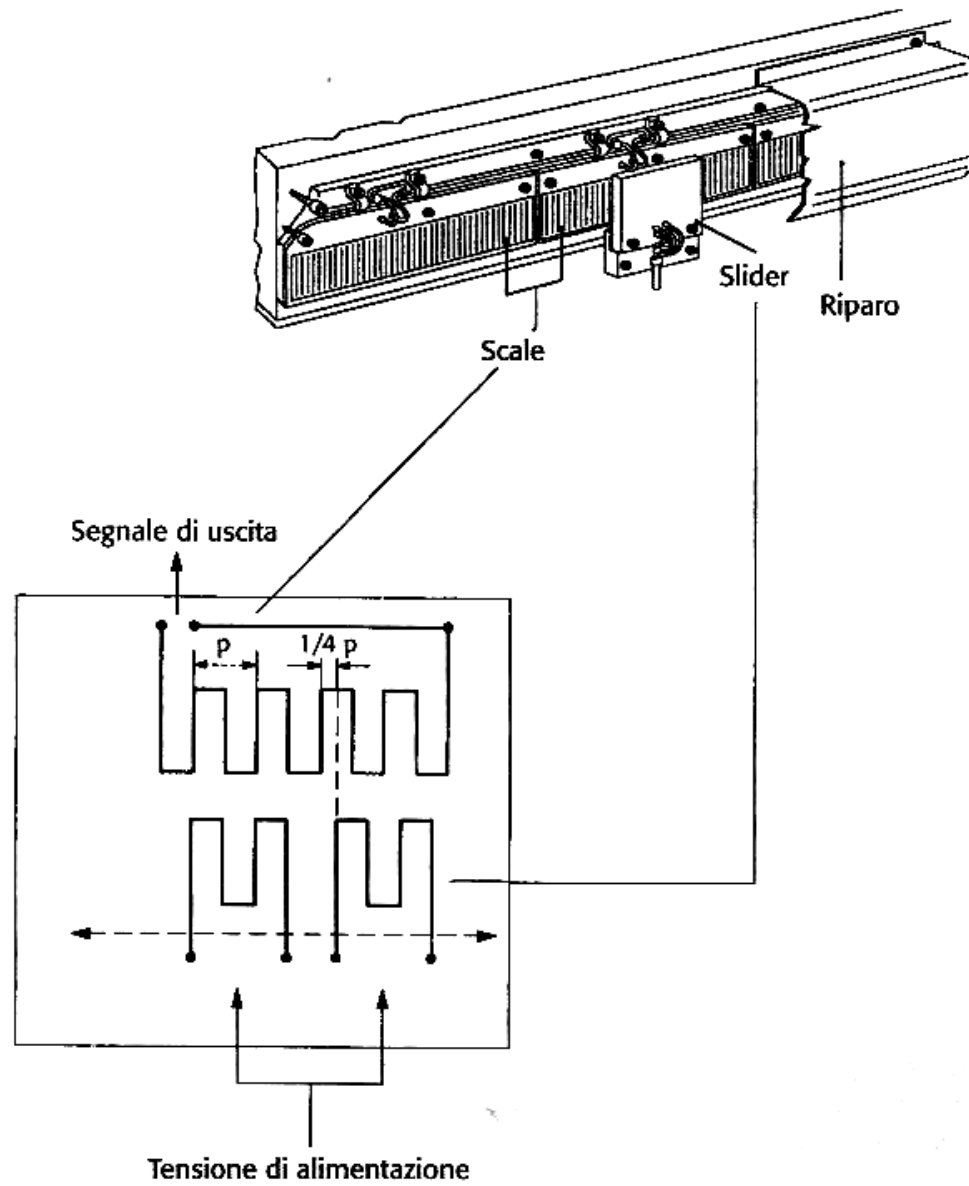
# Tipi di controllo

- Esistono diversi sistemi di controllo per le macchine CN che sono comunque tutti ad anello chiuso, ovvero il segnale elettrico inviato al trasduttore è sempre il risultato di un confronto tra un valore programmato ed uno misurato:
  - Punto a punto: quando è garantito il movimento da un punto all'altro senza però avere controllo sulla traiettoria
  - Parassiale; quando il movimento è realizzato parallelamente ad un asse prefissato
  - Continuo: quando è garantito il controllo della traiettoria voluta istante per istante

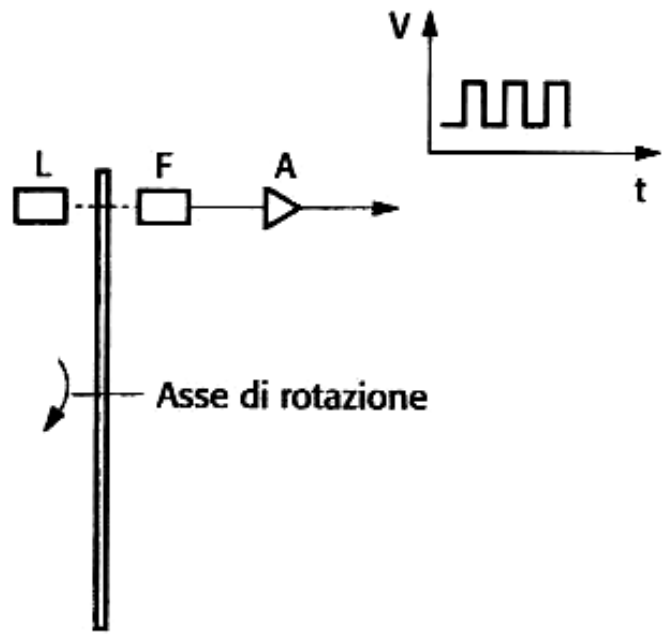
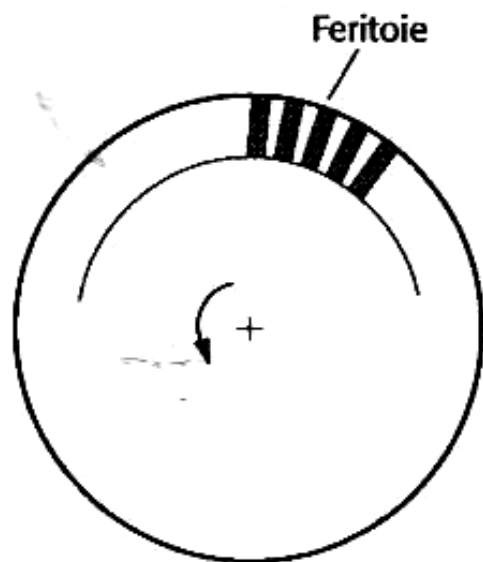


# Trasduttori

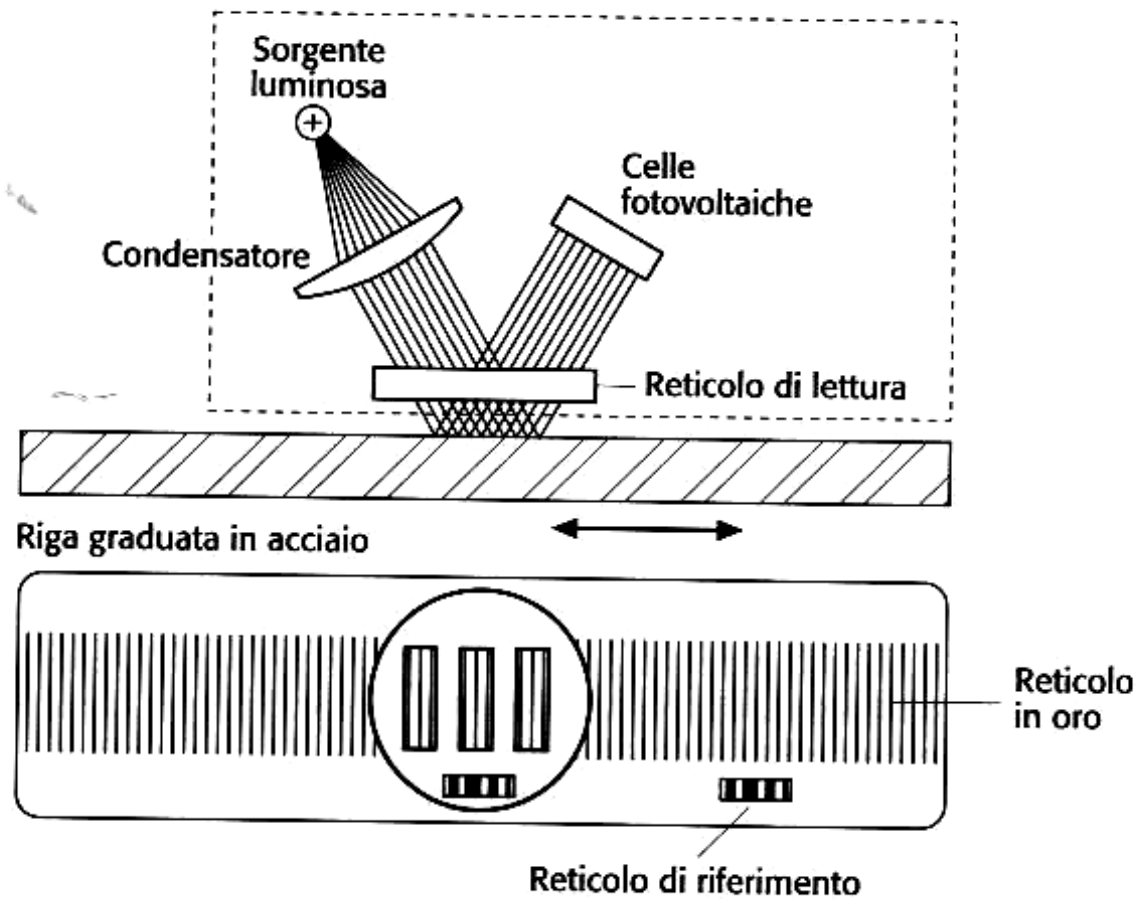
- Sono dispositivi che consentono di passare da una grandezza fisica a un'altra. Per esempio da una misura di tensione a:
  - Una lunghezza (trasduttore di posizione)
  - Una velocità (trasduttori di velocità)
- Possono essere inoltre:
  - Analogici (se il segnale varia con continuità)
  - Digitali (se il segnale varia a scatti predefiniti)
- Oppure:
  - Incrementali (se ogni misura è riferita alla precedente)
  - Assoluti (se ogni misura è riferita ad un'origine)
- Tipi di trasduttori più diffusi:
  - “*Encoder*”: basato su un disco munito di feritoie attraversate da un fascio LED (*Light Emitted Diode*) ricevuto da un fotodiode. È di tipo indiretto, digitale e incrementale
  - “*Inductosyn*”: basato su due circuiti in tensione che si sfiorano (*slider* e *scala*) e che si trasferiscono di conseguenza corrente. È di tipo diretto, analogico e incrementale o assoluto



**Fig. 10-29** Schema di un trasduttore di posizione tipo inductosyn.



**Fig. 10-31** Schema semplificato di un trasduttore tipo encoder incrementale.  
 L: LED (*light emitting diode*); F: fotodiodo; A: amplificatore.

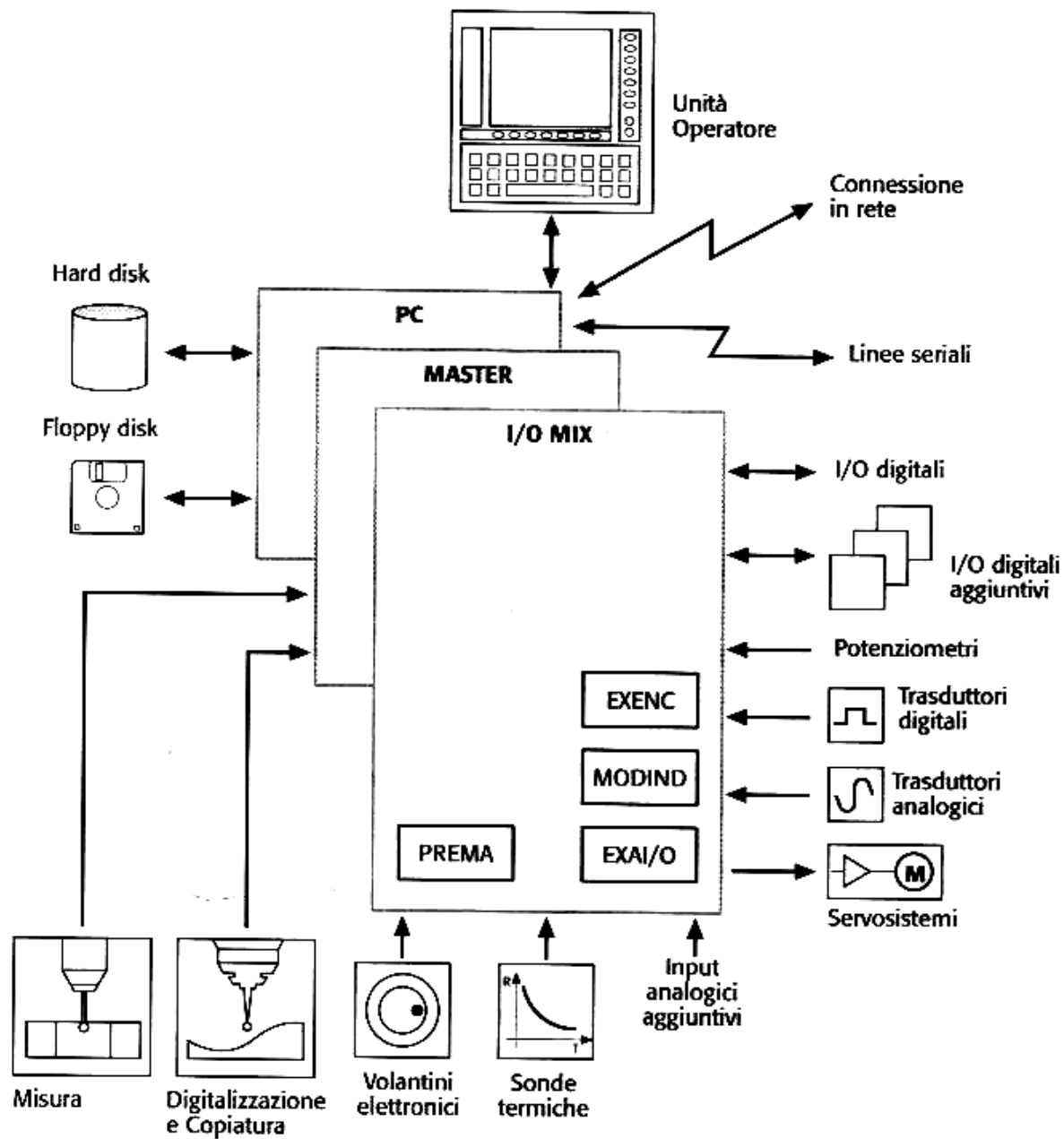


**Fig. 10-30** Principio di funzionamento semplificato di un trasduttore a righe ottiche.



# Unità di governo

- L'unità di governo è l'*hardware* che controlla completamente il funzionamento della macchina e nella versione CNC (*Computerized Numerical Control*) è del tutto simile ad un comune *computer*
- Elementi dell'unità di governo:
  - Scheda Microprocessore che gestisce le interfacce con tutte le periferiche ammissibili
  - Scheda Master che:
    - Smista i comandi ai diversi organi , motori, servomotori, ...
    - Gestisce gli interpolatori che controllano le traiettorie (velocità ed accelerazioni) degli organi in movimento
    - Controlla i comparatori che segnalano lo scostamento tra quota raggiunta e da raggiungere
    - Effettua i controlli delle funzioni ausiliarie (fluido da taglio, cambio utensili, ...)
  - Schede input-output quali servosistemi, trasduttori, microinterruttori, ...
- Fondamentale, prima di cominciare qualunque lavorazione è individuare lo "zero" che costituirà l'origine di partenza di tutte le istruzioni di movimento



**Fig. 10-33** Struttura hardware di un controllo numerico CNC (cortesia ditta SELCA, Ivrea).



# Prestazioni di un sistema CNC

- Funzionamento sia in automatico che in semiautomatico
- Caricamento programmi durante la lavorazione
- Numero di assi controllabili
- Funzione “*look ahead*” di pre-esame dinamico dei parametri di lavorazione
- Compensazione dinamica degli errori di inversione del moto
- Compensazione degli errori di misura dei trasduttori
- Compensazione degli errori di deformazione termica
- Gestione vita utensile





# La programmazione

- Grazie alla loro programmabilità possono adattarsi a produzioni molto variabili
- Le unità di governo consentono di eseguire i programmi per la maggior parte delle lavorazioni con una grande semplicità
- I linguaggi di programmazione dei vari CN seguono abbastanza fedelmente le raccomandazioni ISO. I linguaggi sono dunque praticamente standardizzati



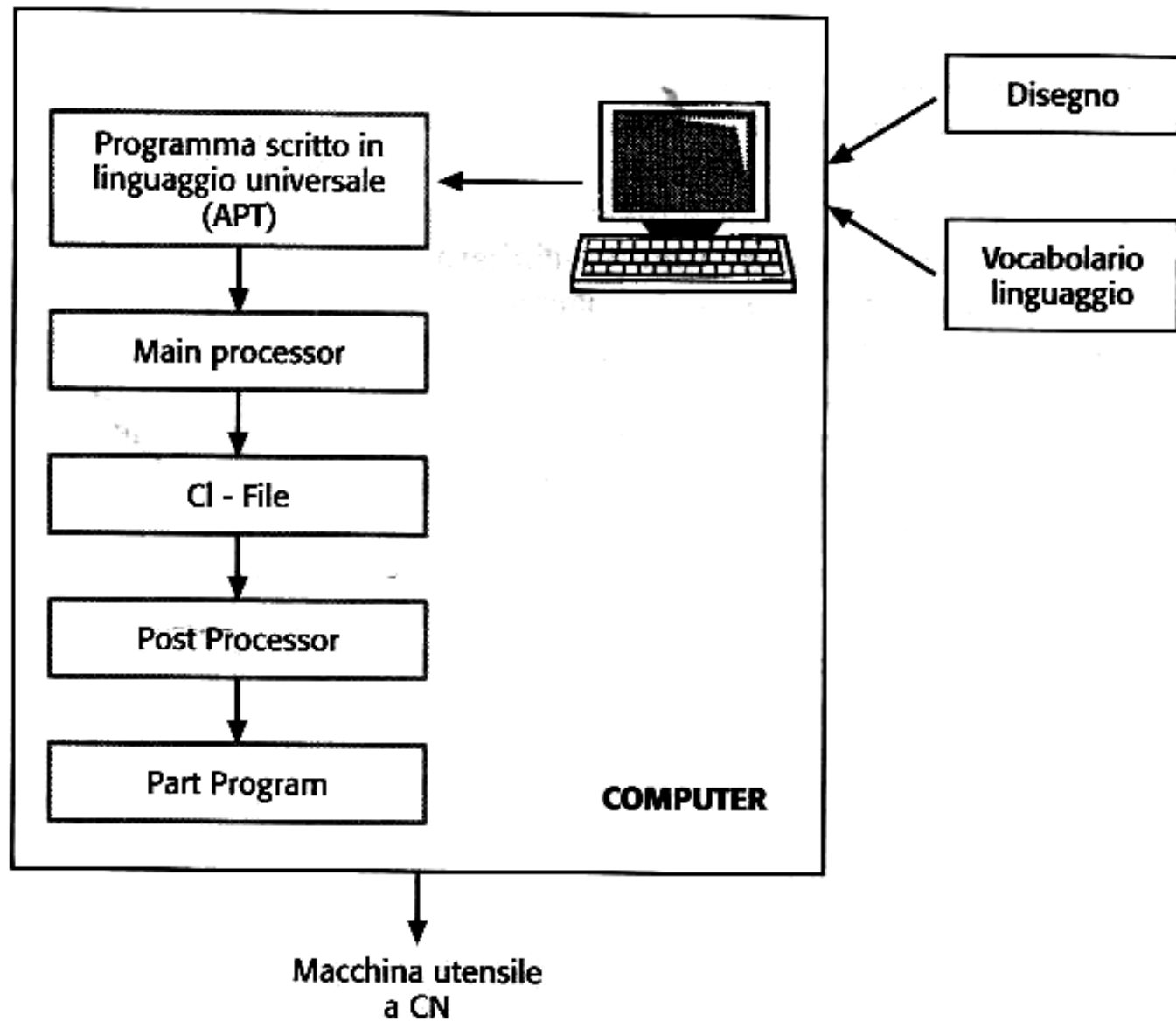
# Elementi della programmazione

- Nel *part program* devono essere contenute tutte le informazioni necessarie per l'esecuzione delle lavorazioni, ovvero:
  - la traiettoria dell'utensile rispetto al pezzo nonché le modalità di movimento (rapido, continuo, punto a punto, ...)
  - i parametri tecnologici (velocità, avanzamento, ....)
  - Altre informazioni ausiliarie quali:
    - Selezione dell'utensile
    - Uso di fluidi di taglio
    - Carico/scarico dei pallet
    - .....



# La programmazione

- La programmazione può essere:
  - Manuale: quando l'operatore mediante il linguaggio della macchina scrive la sequenza delle operazioni dopo aver analizzato il disegno direttamente sull'interfaccia conversazionale della macchina stessa. Tale programmazione è detta appunto anche conversazionale o interattiva in quanto è il *software* stesso che interroga l'operatore circa le sue esigenze e realizza successivamente il *part program*. Può peraltro essere eseguita *off-line* con l'ausilio di simulatori
  - Automatica: quando l'operatore, scrivendo un programma in un linguaggio apposito (ad es. APT - *Automatically Programmed Tools*), descrive la sequenza delle operazioni. Il *computer* genera il *CL-file* (*Cutter Location file*) che contiene le traiettorie degli utensili. Un post-processor traduce i dati generati nel programma per il CN specifico della macchina utensile





# La norma ISO

- Le istruzioni previste sono di diverso tipo:
  - “N” per identificare progressivamente ogni singolo blocco
  - “Gxx” per predisporre il controllo a particolari modalità operative
  - “YxxxAxxx” per definire il percorso relativo utensile-pezzo
  - “Sxxxx” per definire la velocità di taglio
  - “Fxxxx” per definire l’avanzamento
  - “Tx.x” per definire il tipo di utensile da utilizzare ed i relativi correttori
  - “Mxx2 per impartire operazioni preimpostate sulla macchina



### Programma

T101M6  
G95G97S1500F0.2M3  
GX125Z2  
G1Z  
X150  
Z-250  
GX200Z20  
.....  
.....

### Blocco

G95 G97 S1500 F0.2 M3

S 1500 Istruzione

S

Indirizzo

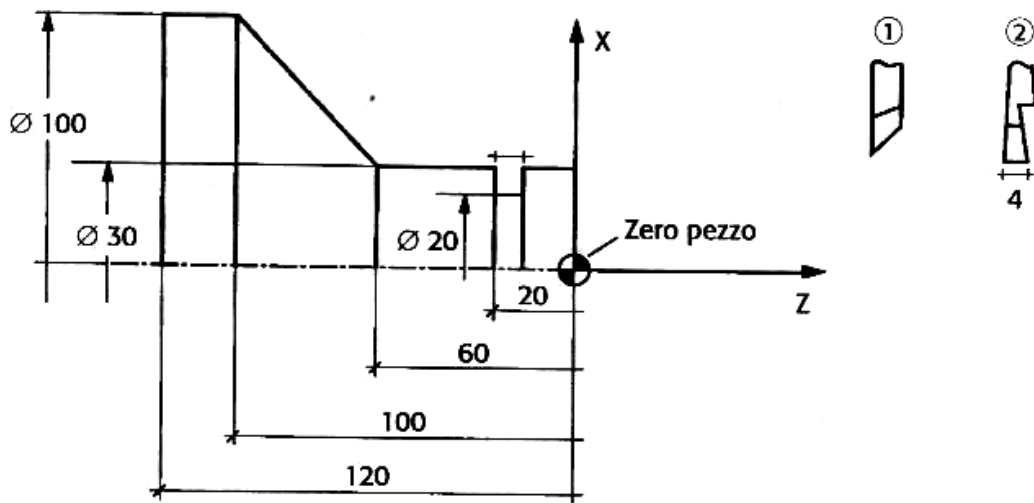
1500

Valore numerico

I  
F

<b>Codice</b>	<b>Funzione</b>
G00	Posizionamento rapido assi
G01	Interpolazione lineare
G02	Interpolazione circolare oraria
G03	Interpolazione circolare antioraria
G04	Sosta a fine operazione
G16	Piano di interpolazione definito
G17	Interpolazione circolare e compensazione utensile nel piano XY
G18	Interpolazione circolare e compensazione utensile nel piano ZX
G19	Interpolazione circolare e compensazione utensile nel piano YZ
G27	Lavorazione in sequenza continua con riduzione automatica della velocità agli angoli
G28	Lavorazione in sequenza continua senza riduzione automatica della velocità agli angoli
G29	Lavorazione punto a punto
G33	Filetto a passo costante o variabile
G40	Compensazione utensile disabilitata
G41	Compensazione utensile - sinistra
G42	Compensazione utensile - destra
G70	Programmazione in pollici
G71	Programmazione in millimetri
G79	Programmazione riferita allo zero macchina
G80	Cicli fissi disabilitati
G81	Ciclo di foratura
G82	Ciclo di lamatura
G83	Ciclo di foratura profonda
G84	Ciclo di maschiatura
G85	Ciclo di alesatura
G86	Ciclo di barenatura
G89	Ciclo di barenatura con sosta
G90	Programmazione assoluta
G91	Programmazione incrementale
G94	Programmazione avanzamento in pollici/minuto o mm/minuto
G95	Programmazione avanzamento in pollici/giro o mm/giro
G96	Velocità costante di superficie in piedi/min o m/min
G97	Programmazione velocità mandrino in giri/min


<b>Codice</b>	<b>Funzione</b>
M0	Stop programma
M3	Rotazione mandrino in senso orario
M4	Rotazione mandrino in senso antiorario
M5	Arresto mandrino
M6	Cambio utensile
M8	Inserimento refrigerante utensile
M9	Esclusione refrigerante
M13	Ragguppa le funzioni M3 e M8
M14	Ragguppa le funzioni M4 e M8



**Fig. 10-40** Esempio di programmazione di una lavorazione al tornio (si suppone che il soprametallo sulla superficie del pezzo sia costante).

T 101 M 6	Chiamata utensile 1
G 96 S 100 M4 F2	Impostazione parametri di taglio
G 0 X Z 1	Avvicinamento rapido
G 1 Z	Tornitura profilo
X 30	
Z - 60	
X 100 Z - 100	
Z - 120	
G 0 X 150 Z 150	Allontanamento rapido
T 202 M 6	Chiamata utensile 2
G 97 S 300 M 4 F.08 M 08	Impostazioni parametri di taglio e apertura refrigerante
G 0 X 31 Z - 20	Avvicinamento rapido
G 1 X 20	Esecuzione gola
G 0 X 31	Allontanamento rapido e stop refrigerante
Z 150 M 09	
M 30	Stop programma e reset





# Sistemi CAM – *Computer Aided Manufacturing*

- I sistemi CAD possono essere integrati con il relativo pacchetto CAM che permette di creare, a partire dal disegno, il *part program* con i percorsi utensile da passare direttamente alla macchina CN per realizzare le operazioni di lavorazione
- Fasi della sessione di lavoro:
  - Richiamo di un modello di lavorazione contenente le informazioni geometriche del pezzo finito e del grezzo con i relativi sovrametalli
  - Utilizzo di un database tecnologico con le macchine da utilizzare e le attrezzature necessarie
  - Definire le macchine da utilizzare, la sequenza di lavorazione, la scelta degli utensili
  - Simulazione a video della lavorazione e quindi delle scelte effettuate
  - Memorizzazione del *file* così realizzato e traduzione in linguaggio macchina
- Tali sistemi non hanno comunque quelle caratteristiche di intelligenza tecnologica che consentono di prescindere dall'esperienza di un operatore esperto: solo i sistemi CAPP consentono di superare tale fase



# Sistemi CAPP – *Computer Aided Process Planning*

- I sistemi CAPP generano automaticamente i cicli di lavorazione sulla base delle informazioni ricavate dal disegno, delle indicazioni sui metodi di lavorazioni scelti e delle macchine utensili a disposizione. I sistemi CAPP operano tradizionalmente secondo due approcci
  - Approccio variante: generato un ciclo di lavorazione base che contenga tutte le lavorazioni possibili per un famiglia di pezzi. Si procede tenendolo sempre come riferimento e adattandolo di volta in volta con variazioni al pezzo da mettere in lavorazione
  - Approccio generativo: le informazioni sono tratte dal disegno del pezzo da lavorare. Ne viene generato il ciclo di lavorazione in funzione di algoritmi decisionali che tengono conto di tutte le caratteristiche geometriche del pezzo e dei processi di lavorazione disponibili.



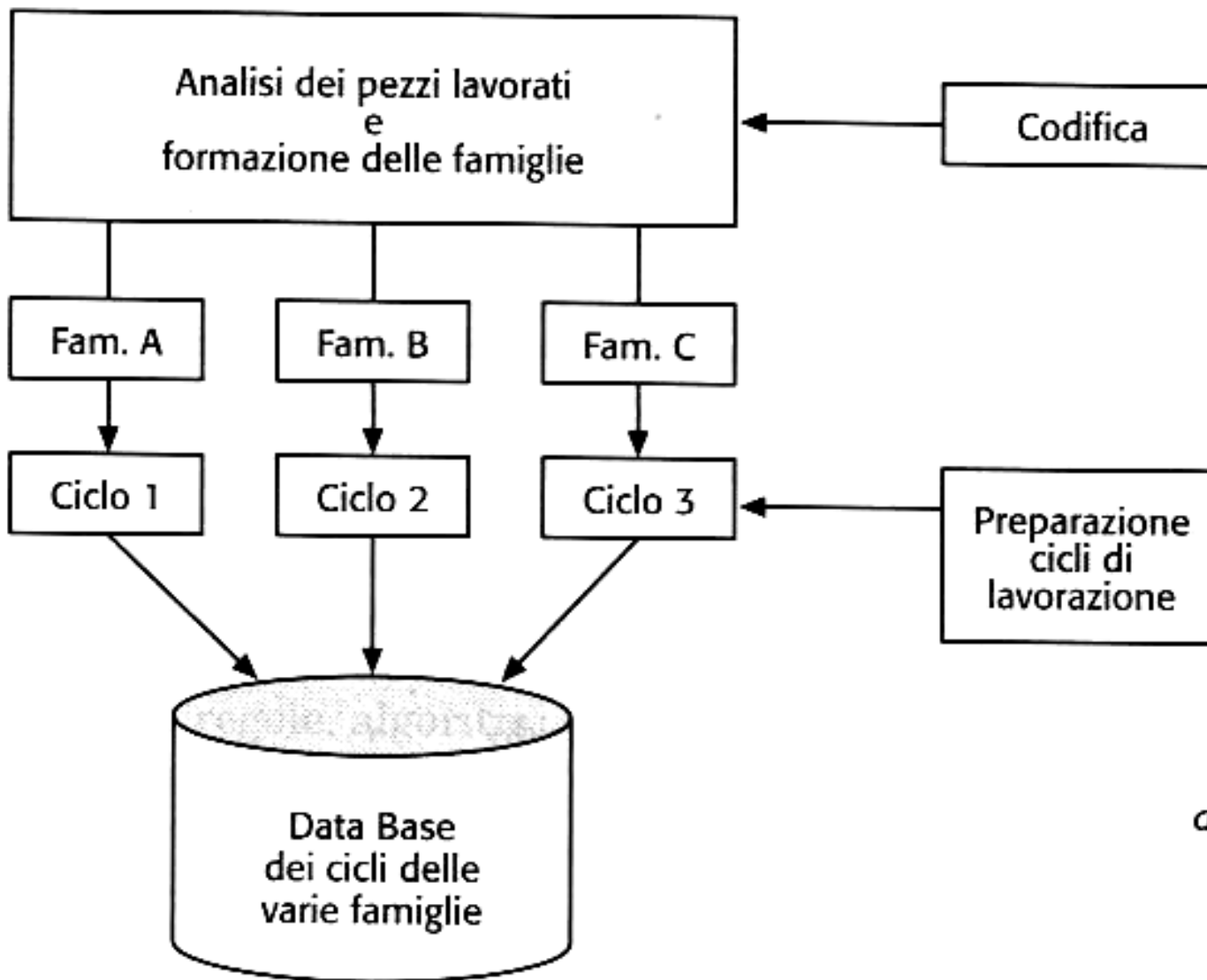
# Approccio variante

- Si basa sul concetto che pezzi tecnologicamente simili comportano anche macchine, cicli, utensili simili
- Di conseguenza gli aspetti fondamentali di tale approccio sono:
  - La generazione di un database di varianti
  - L'individuazione di pezzi "simili". A tal proposito diventa fondamentale la *Group Technology*, ovvero i metodi utilizzati per raggruppare in famiglie i pezzi in funzione delle loro similitudini geometriche e tecnologiche.

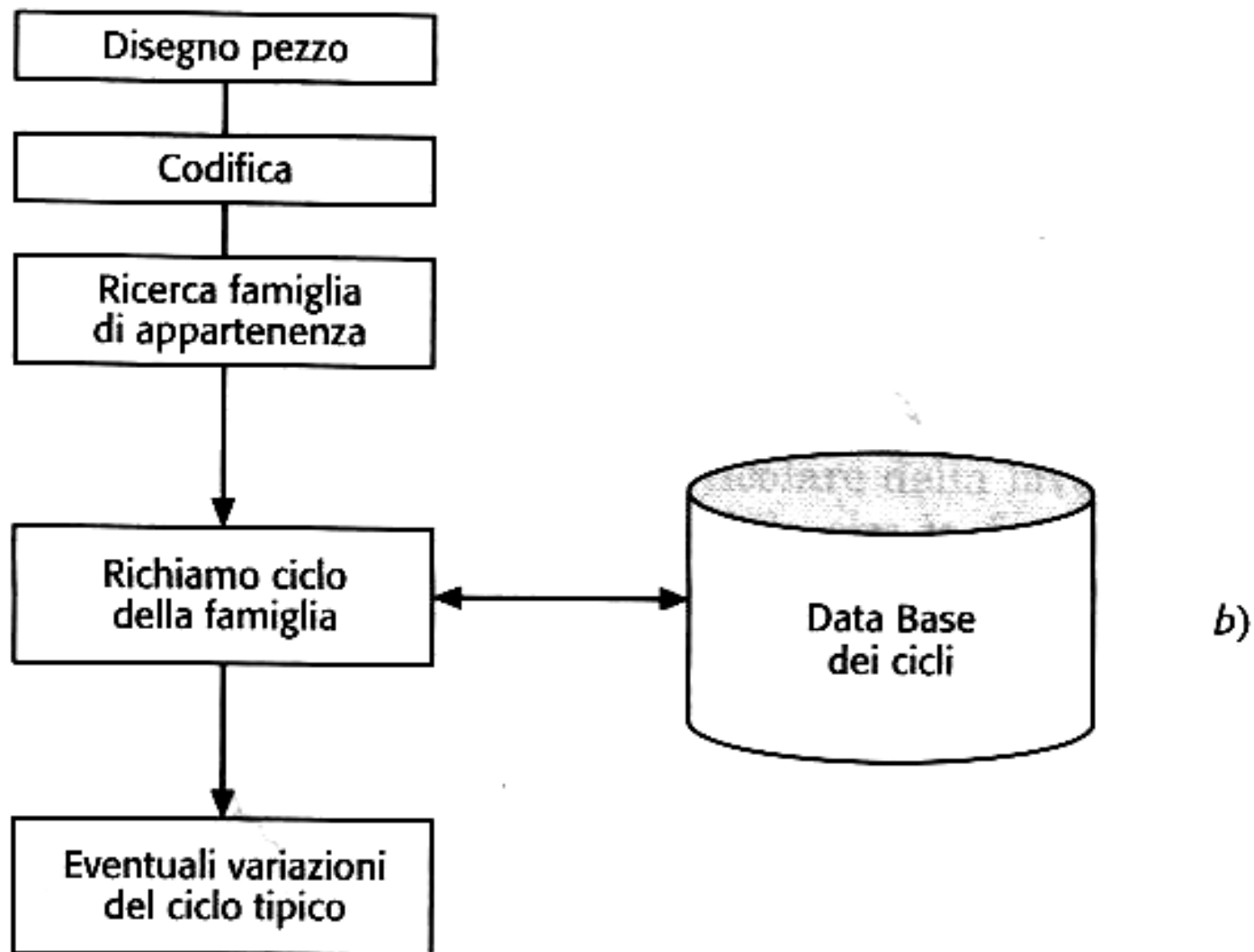


# Approccio variante

- L'implementazione si basa su due fasi:
  - Fase preparatoria: è quella più onerosa nella quale i pezzi vengono classificati e raggruppati in famiglie
    - Per ogni famiglia, rappresentabile dal “pezzo complesso” si prepara il ciclo tipo
    - Si lasciano le dimensioni geometriche in forma parametrica
  - Fase operativa: per ogni pezzo da lavorare si estraggono le informazioni archiviate per la lavorazione. Si operano quindi manualmente pochi ritocchi specifici
- Tale sistema è adatto quando si tratta di poche famiglie composte da molti pezzi simili



a)





# Approccio generativo

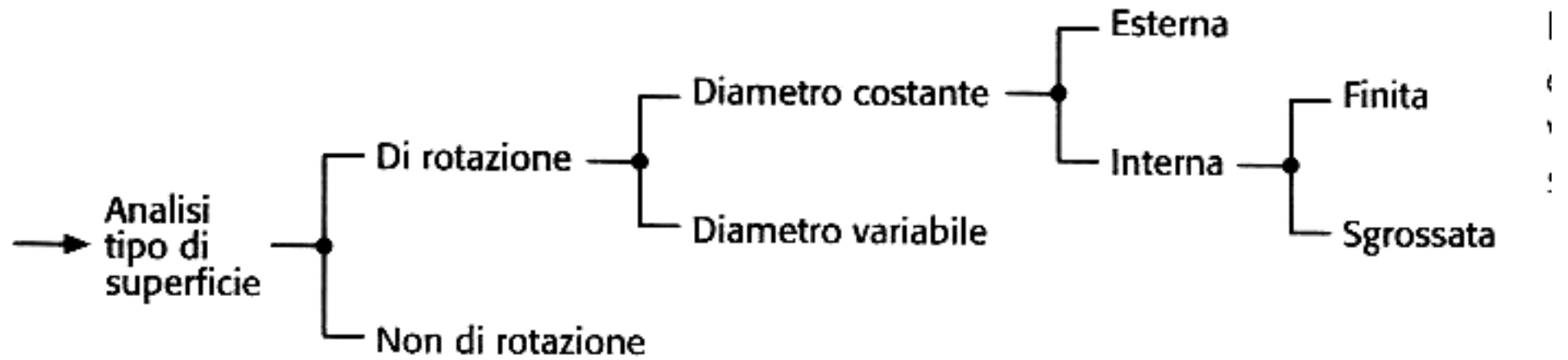
- Il ciclo di lavorazione viene generato automaticamente per ogni nuovo pezzo basandosi sulle conoscenze tecnologiche proprie dell'azienda informatizzate e gestite per mezzo di *software* appositi.
- Vi sono due sistemi di logica decisionale per operare le scelte :
  - Tecnica degli alberi decisionali
  - Sistema *Knowledge Based*



# Tecnica degli alberi decisionali

- La tecnica prevede come riferimento una struttura ad albero fisso organizzata in modo tale che le varie alternative si scelga sulla base dei criteri effettivamente adottati in ambito aziendale.
- Consente di procedere in modo spedito e sicuro per casi semplici. In casi complessi i *software* per l'implementazione sono molto articolati e costosi







# Sistema *Knowledge Based*

- Il sistema opera delle scelte sulla base di regole del tipo IF-THEN sempre secondo le conoscenze e le esperienze dei tecnici
- Il *software* per l'implementazione deve essere tale da poter integrare facilmente su di una base le conoscenze che vai via vi si vogliono aggiungere
- Si presenta quindi decisamente più flessibile rispetto alla tecnica degli alberi decisionali
- In generale un sistema generativo è conveniente quando si tratta di un numero elevato di famiglie composte da molti pezzi



## KAPLAN KNOWLEDGE BASE

### Regola di afferraggio

<b>IF</b>	La superficie cilindrica	<b>AND</b>
	La superficie non è filettata	<b>AND</b>
	Il diametro $\geq 20$ mm	<b>AND</b>
	La lunghezza $\geq 8$ mm	
<b>THEN</b>	La superficie può essere afferrata con piattaforma autocentrante	



# Sistemi semigenerativi

- Sono nati dall'esperienza realizzata con gli altri due sistemi
- Prevedono le tecniche generative ma applicate a famiglie di prodotti con un'ampia possibilità di introduzione di modifiche
- Sono meno flessibili e veloci ma certamente più capaci di adattarsi effettivamente alle specifiche realtà



# Controllo numerico: conclusioni

- I due parametri fondamentali e qualificanti di qualunque sistema produttivo sono le caratteristiche contrastanti di:
  - Produttività: ovvero capacità di lavorare una quantità elevata di pezzi in un tempo assegnato rispettando livelli prefissati di qualità e di costo
  - Flessibilità: ovvero capacità di adattarsi velocemente a lavorare un gran numero di pezzi dalle caratteristiche diverse e mutevoli
- Le macchine CN offrono un buon compromesso delle caratteristiche citate in quanto garantiscono:
  - Tempi ridotti di esecuzione (produttività)
  - Tempi passivi minimi (flessibilità)



# Controllo numerico: conclusioni

- Lavorazioni ove offrono particolari vantaggi:
  - Realizzazione di pezzi di forma complessa
  - Esecuzione di pezzi con tolleranza ristretta
  - Lavorazioni di leghe leggere con elevate velocità di taglio
  - Operazioni ripetitive e di breve durata
  - Realizzazione di pezzi simili ma non esattamente uguali
  - Realizzazione di pezzi in lotti periodici (creazione di archivio)
  - Realizzazione di lavorazioni difficili anche con operatori non qualificati
- Oltre all'applicazione principe del CN nell'ambito dell'asportazione di truciolo, esistono altri ambiti applicativi, quali:
  - I robot
  - Le macchine di misura
  - I centri per la lavorazione della lamiera
  - I sistemi di taglio anche non convenzionali (laser, *water jet*, ....)
- L'insieme di più macchine a CN compongono i sistemi FMS – *Flexible Manufacturing Systems* basati sul collegamento informatico delle singole unità con un PC centrale che gestisce lo smistamento dei lavori da svolgere tra le diverse macchine