

*Ettore Funaioli\**

## L'Istituto di Meccanica applicata alle macchine dell'Università di Bologna\*\*

I Colleghi che hanno voluto onorarmi organizzando questo incontro, e soprattutto dedicandomi un volume con i loro scritti, mi hanno affettuosamente invitato ad intervenire su argomenti di mia scelta. Eccomi così a tenere questa conversazione, con la quale mi propongo di esporre un panorama della evoluzione della ricerca e della didattica nel campo della Meccanica applicata alle macchine negli ultimi cinquanta anni, con qualche richiamo personale e con qualche previsione sugli sviluppi che la ricerca in questa materia potrà avere in futuro.

Come molti fra i presenti sanno, la mia formazione scientifica è in gran parte avvenuta in seno alla Facoltà di Ingegneria di Pisa, dove ho iniziato la mia attività di ricercatore nel 1946. A Pisa ho avuto la fortuna di vivere e lavorare in un ambiente di grande fermento intellettuale, sotto la guida di Maestri di altissimo livello come Renato Giovannozzi, Lucio Lazzarino, Lorenzo Poggi e, soprattutto, Enrico Pistolesi, di cui sono stato assistente, scienziato di fama internazionale ed uomo di grande rigore morale, un vero Maestro di scienza e di vita.

A Pisa l'Istituto di Meccanica applicata era, per quei tempi, ben fornito di mezzi per la ricerca; un punto di forza era la biblioteca, molto ricca e continuamente aggiornata specie per quanto riguardava le riviste scientifiche, che ci tenevano in contatto con gran parte del Mondo, anche nei durissimi anni del dopoguerra. Mi sono quindi trovato, all'inizio della mia carriera, in un osservatorio privilegiato.

Allorché iniziai la mia attività di ricercatore, la struttura del corso di Meccanica applicata alle macchine aveva già avuto la sua sistemazione che, con le varianti richieste dall'evolversi della ricerca e della tecnica, rimane sostanzialmente valida ancor oggi. Alla sistemazione del corso di Meccanica applicata alle macchine avevano dato importanti contributi professori della generazione precedente la mia: basti citare Pistolesi a Pisa e Prosciutto a Bologna. Ma il padre fondatore del corso di Meccanica applicata alle macchine era stato, in Italia, Modesto Panetti, che aveva dato al corso vera dignità universitaria e solide basi scientifiche. Panetti, nato nel 1875, era di quasi una generazione più anziano dei Pistolesi e dei Prosciutto e fu direttamente o indirettamente loro Maestro.

Il corso di Meccanica applicata alle macchine secondo Panetti (ed anche la ricerca nel campo della Meccanica applicata che, come argomenti di studio, era al corso molto

\* Accademico benedettino.

\*\* Seduta accademica del 29 Aprile 1998.



vicina) affondava a sua volta le proprie radici nella opera di alcuni pionieri, che avevano posto le basi teoriche della ricerca in tutti, o quasi, i settori della Ingegneria Meccanica (o almeno di quella parte della Ingegneria Meccanica che si è poi sviluppata nei corsi di Meccanica applicata alle macchine, di Costruzione di Macchine, di Aerodinamica, di Macchine e derivati). Intendo dire di scienziati come: Sir Horace Lamb, autore del «*Treatise of the Mathematical Theory of the Motion of Fluids*» pubblicato nel 1879; August Edward Hough Love, autore di «*A Treatise of the Mathematical Theory of the Elasticity*», pubblicato nel 1892; John William Strutt Rayleigh, autore di «*The Theory of Sound*», pubblicato nel 1879; Franz Reuleaux, autore di «*Theorische Kinematik*», pubblicato nel 1875, ed altri notissimi come i Timoshenko, gli Stodola, i Grammel, i Krall. Sono costoro i padri della Ingegneria Meccanica, e non solo Meccanica, che hanno dissodato il campo nel quale i successori hanno lavorato talvolta in modo incisivo, molto più spesso con opera di rifinitura.

In definitiva, allorché iniziai la mia attività di ricerca, il campo della Meccanica applicata alle macchine era ben inquadrato e poggiava su salde basi teoriche.

Da allora la ricerca nel campo della Meccanica applicata alle macchine è divenuta più specializzata, acquistando in profondità in molte direzioni perdendo, nello stesso tempo, dei rami che hanno acquistato dignità propria e sviluppi propri, talvolta imponenti. Infatti, allorché iniziai la mia attività di ricercatore, la ricerca nel campo della Meccanica applicata alle macchine si estendeva comunemente ad argomenti di discipline come l'Aerodinamica e la Costruzione di macchine, che solamente in epoca successiva acquistarono una completa indipendenza e vita autonoma.

La didattica risentiva di questo stato di cose, tanto che i docenti di Costruzione di macchine e di Aerodinamica erano comunemente dei professori incaricati, titolari di cattedra o liberi docenti di Meccanica applicata alle macchine.

In molti casi i corsi di Costruzione di macchine risentivano profondamente della formazione scientifica dei docenti, cultori di Meccanica applicata alle macchine; gli argomenti del corso di Costruzione di macchine erano molto spesso argomenti costruttivi visti nell'ottica dello studioso di Meccanica applicata, che curava particolarmente problemi di statica, di dinamica, di fenomeni vibratorii, anche di resistenza dei materiali, ma che dava poco spazio all'architettura della macchina, alla scelta dei materiali, ai costi delle soluzioni costruttive.

Per l'Aerodinamica le cose andavano diversamente. I cattedratici di meccanica applicata alle macchine, professori incaricati di Aerodinamica, erano in realtà cultori di Aerodinamica prestati alla Meccanica applicata. Così i primi corsi di insegnamento di Aerodinamica avevano già avuto una impostazione per quell'epoca definitiva.

Il distacco della Aerodinamica e della Costruzione di macchine dalla Meccanica applicata alle macchine cominciò a manifestarsi con la creazione di cattedre destinate a quelle discipline. Ciò accadde alla fine degli anni quaranta per la Costruzione di macchine; poco dopo per l'Aerodinamica, il cui distacco dalla Meccanica applicata alle macchine fu peraltro assai più lento, databile a cavallo fra gli anni cinquanta e gli anni sessanta.

La creazione di cattedre di Costruzione di macchine e di Aerodinamica portò come conseguenza anche la nascita di ricercatori che, dedicandosi esclusivamente alla ricerca in quelle discipline, finirono con lo svincolarsi dalla influenza della Meccanica applicata. Ormai la Aerodinamica e la Costruzione di macchine sono materie completamente autonome.

Per molti anni dopo la seconda guerra mondiale la ricerca nel campo della Meccanica applicata alle macchine è stata quasi esclusivamente teorica. I laboratori degli Istituti di Meccanica applicata non erano certo tali da invogliare giovani studiosi alla ricerca speri-



mentale. Anche in famose Università il laboratorio di Meccanica applicata alle macchine aveva attrezzature risibili. In alcune sedi le attrezzature si riducevano a qualche modello didattico ed a qualche esemplare di viscosimetro. Già la presenza di una macchina equilibratrice, di un vibrometro meccanico, di una macchina fotografica per fotografie scientifiche erano segno di distinzione. Il punto di forza di alcuni laboratori era la presenza di una galleria aerodinamica (naturalmente subsonica), strumento di ricerca fondamentale per esperienze di aerodinamica. Il laboratorio dell'Istituto di Meccanica applicata di Pisa era uno dei più attrezzati, grazie soprattutto alla galleria aerodinamica che, danneggiata nel corso delle vicende belliche, era stata rimessa in pristino anche con il mio contributo.

Questa situazione è durata a lungo, almeno fino agli anni sessanta. Fino a quell'epoca lavori sperimentali di Meccanica applicata alle macchine erano in Italia rarissimi, a differenza di quanto avveniva per discipline non lontane come quelle di Macchine, di Fisica tecnica, oltre che per le due discipline «cugine» della Meccanica applicata, l'Aerodinamica e la Costruzione di macchine.

Anche il modo di lavorare dei ricercatori era molto diverso da quello di oggi. I mezzi di calcolo erano, rispetto a quelli odierni, enormemente più lenti e di norma in grado di eseguire solamente le quattro operazioni fondamentali. Lo strumento principe era peraltro il regolo calcolatore, che fino all'arrivo sul mercato delle piccole calcolatrici elettroniche, ha costituito il simbolo dell'ingegnere. Il regolo calcolatore permetteva di eseguire operazioni più elaborate della moltiplicazione e della divisione; spesso era dotato di scale per le funzioni trigonometriche e per l'elevazione a potenza, senza il passaggio attraverso i logaritmi. Era uno strumento veramente straordinario anche per un altro motivo, che ho sempre considerato importante: come per tutte le macchine analogiche anche per il regolo l'introduzione dei dati e l'estrazione dei risultati numerici richiedevano un certo sforzo interpretativo e non permettevano di ottenere risultati esatti; comunemente non si potevano impostare numeri con più di tre cifre significative ed i risultati erano attendibili entro le prime due, al massimo entro le prime tre cifre significative. Ciò contribuiva a formare la mentalità dell'ingegnere che sa, o almeno dovrebbe sapere, di non poter contare, di norma, su risultati più dettagliati. Per calcoli scientifici, quando era necessario lavorare su più di due o tre cifre significative, si utilizzava la macchina calcolatrice e per le funzioni trigonometriche, logaritmiche, funzioni speciali, si faceva ricorso a testi appositi contenenti tabelle adeguatamente dettagliate.

Per questi motivi il ricercatore era portato a cercare soluzioni generali, non numeriche, dei problemi affrontati. Se non si era in grado di trovare soluzioni in forma chiusa, rinunciando alla generalità della soluzione e limitando allo stretto indispensabile il numero delle equazioni algebriche risolutive, si tentavano soluzioni a mezzo di sviluppo in serie, o mediante altri metodi numerici, come quello di Ritz, particolarmente utile per la soluzione di problemi agli autovalori nella teoria delle vibrazioni. In casi estremi si faceva ricorso a metodi grafici (ne erano esempio tipico i procedimenti di calcolo delle prime velocità critiche di un albero).

Adesso i potentissimi mezzi di calcolo hanno profondamente modificato il modo di lavorare. Allorché si sia trovato un idoneo algoritmo, la soluzione numerica è spesso un problema di routine. Ma il modo di lavorare era diverso da quello odierno anche per un altro motivo. Tutti coloro, fra gli studiosi di Meccanica applicata, che abbiano superato la cinquantina, sanno bene che solamente da una ventina di anni nel campo della Meccanica applicata è entrato nell'uso lavorare in collaborazione. Prima di allora di norma il ricercatore era il solo responsabile, nel bene e nel male, di quanto pubblicava. La collaborazione era rara e quando si aveva era motivata da una ben marcata distinzione di ruoli; così, ad



esempio, un ricercatore aveva la responsabilità dell'aspetto teorico, un altro quello dell'aspetto sperimentale. E si usava precisare a chi spettavano i singoli contributi. Oggi è norma comune la collaborazione fra due o più coautori. Questa moda, che ha più di una giustificazione, presenta aspetti positivi rispetto alla vecchia moda: un lavoro a cui abbiano collaborato più persone è verosimilmente più collaudato e più credibile del lavoro di un solo autore. C'è naturalmente il rovescio della medaglia, soprattutto dal punto vista della valutazione del contributo dei singoli autori, valutazione che è richiesta allorché uno degli autori si presenta dinanzi ad una commissione giudicatrice.

Per questi e per altri motivi (come gli ormai cronici ritardi dei bandi di concorso), i candidati ad un concorso a cattedra sono portati a presentare un numero rilevante di pubblicazioni; se un candidato si presenta non meno di quaranta-cinquanta lavori rischia di non essere preso in considerazione. E viene dato ai commissari un facile alibi per giudizi talvolta discutibili: la impossibilità pratica di leggere, con la dovuta attenzione, più di una piccola parte della valanga di lavori inviata dai candidati.

Si è così arrivati, nel campo della Meccanica applicata, vicini alla situazione cui erano arrivate materie di altre Facoltà già quaranta e più anni fa. È un fenomeno, temo, destinato a permanere e ad aggravarsi.

I nuovi mezzi di calcolo hanno, naturalmente, inciso anche sulla didattica, portando innovazioni sostanziali per i corsi di carattere professionale, meno consistenti per i corsi come quello di Meccanica applicata alle macchine, per il quale l'impiego del calcolatore è riservato prevalentemente allo svolgimento di alcune esercitazioni. È certo che alcuni capitoli della Meccanica applicata alle macchine (in particolare l'analisi dei sistemi articolari, lo studio dei fenomeni vibratorii di sistemi a più gradi di libertà, o la dinamica di sistemi complessi) non possono sottrarsi all'impiego di mezzi di carattere numerico per la soluzione di problemi che non siano banali. Ma, soffermandoci in particolare sull'analisi dei sistemi articolati, a mio parere (e so di essere in buona compagnia, almeno in campo nazionale), è necessario che non vengano taciuti i procedimenti di calcolo tradizionale, basati soprattutto su semplici procedimenti grafici. E ciò per più motivi: intanto, ed è il motivo più importante, per far sì che l'allievo si renda ben conto dell'aspetto fisico del problema studiato (il calcolatore viene spesso usato in modo acritico; stiamo attenti a coltivare il senso fisico degli allievi!); poi anche per dare all'allievo un mezzo semplice per verificare, in qualche significativo caso particolare, o per qualche particolare posizione, il risultato fornito dal programma di calcolo (verifica che è sempre opportuna se l'utente del calcolatore non ha una adeguata esperienza).

Come ho osservato all'inizio di questa mia conversazione, a mio parere la struttura del corso di Meccanica applicata alle macchine, sistemata dai Maestri miei predecessori, il corso ha subito nel tempo alcune modifiche, anche come organizzazione degli argomenti trattati; modifiche variabili da sede a sede, che peraltro, almeno per ora, non hanno inciso sostanzialmente sui contenuti. E mi auguro che si continui così.

Gli approfondimenti di alcuni argomenti, imposti dallo sviluppo della ricerca e della tecnica, non dovrebbero togliere al corso quell'ampio spettro di argomenti che lo caratterizza; dovrebbero, invece, trovare la propria sede, come avviene nella nostra Facoltà, in corsi specialistici, affiancati al corso base di Meccanica applicata alle macchine. A supporto di questa mia opinione osservo che il corso di Meccanica applicata alle macchine ha egregiamente contribuito alla formazione di generazioni di ingegneri; e gli ingegneri sono anzitutto dei professionisti, che possono, ma solo eventualmente ed in un secondo tempo, divenire dei ricercatori. Mi conforta in questa opinione l'esperienza fatta nel corso della mia attività professionale, svolta quasi esclusivamente nell'ambito di un ufficio tecnico di una grossa azienda e quindi a contatto con la realtà industriale.



Fino all'avvento dei calcolatori elettronici la ricerca nella Meccanica applicata alle macchine ha avuto i settori portanti nella dinamica delle macchine (in particolare la dinamica dei rotori), nella teoria, e nelle esperienze relative, della lubrificazione, nella cinematica dei meccanismi, in particolare di camme e sistemi articolati, nello studio dei servosistemi e dei loro componenti. L'avvento dei calcolatori ha portato nuova linfa a questi campi di ricerca, permettendo la soluzione numerica di problemi prima insolubili, o risolvibili solamente con grande dispendio di energia. Negli ultimi dieci-quindici anni ha così preso vigore lo studio della cinematica di sistemi articolati spaziali, lo studio di problemi di dinamica di sistemi a molti gradi di libertà, lo studio con la tecnica degli elementi finiti di problemi relativi a mezzi continui.

Permettetemi di ricordare che venti anni fa, in occasione del Congresso AIMETA che si tenne a Cagliari, ebbi modo di presentare una relazione sullo stato della ricerca nel campo della Meccanica applicata alle macchine. In quella occasione cercai di dare anche dei suggerimenti su temi di ricerca che, a mio parere, meritavano di essere affrontati o approfonditi, per dare supporto a nuovi sviluppi ed a nuove esigenze della tecnologia. In particolare suggerivo ai giovani ricercatori di guardare con interesse a ricerche sulla cinematica, sul controllo, sulla sensoristica dei robot; ed anche ad occuparsi dello studio di vibrazioni meccaniche, considerate come fonte di inquinamento da rumore.

Ho avuto la soddisfazione di constatare che, in questi ultimi quindici anni, numerosi ricercatori di Meccanica applicata si sono dedicati allo studio sistematico dei robot, sia pure limitandosi, prevalentemente, ad affrontare problemi di cinematica.

Anche l'altro settore di ricerca, da me proposto nella relazione di Cagliari, ha molto progredito, seppure in direzioni alquanto diverse da quelle da me indicate. Alla ricerca nel campo dei fenomeni vibratorii delle macchine, sia da punto di vista teorico, sia da quello sperimentale, si sono ormai dedicati numerosi ricercatori di Meccanica applicata alle macchine.

Mi piace ricordare che anche a Bologna, nel nostro Dipartimento, sono molto attive le ricerche nei due settori sopra ricordati (robotica e vibrazioni). Nel campo della robotica si è lavorato molto e molto bene anche al di fuori del gruppo dei meccanici applicati (tutti noi conosciamo ed apprezziamo i bei risultati ottenuti, con la collaborazione fra DIEM e DEIS, per la mano ad elevata destrezza). Restando nell'ambito dei meccanici applicati mi piace ricordare i difficili lavori di cinematica dei meccanismi spaziali, tra i quali numerosi lavori di manipolatori seriali e paralleli, che hanno portato a risultati originali, talvolta davvero inattesi. Nell'ambito degli studi sui fenomeni vibratorii, ricercatori del Dipartimento stanno lavorando teoricamente e sperimentalmente, con incoraggianti risultati, sul difficile problema della individuazione, nella fase iniziale, di anomalie di funzionamento di componenti di macchine automatiche, e sul problema della integrità strutturale. Rientrano nello stesso ambito anche alcune raffinate ricerche sulla modellazione elastodinamica dei sistemi meccanici.

Per il futuro che cosa si può dire? Certamente rimarranno aperti i grandi temi di ricerca oggi attivi, sui quali c'è ancora molto da fare. A me pare, peraltro, che dovrebbero trovare particolare impulso ricerche rientranti nei moderni grandi temi della ricerca applicata dell'industria meccanica. Fra questi hanno particolare interesse ricerche su componenti, sistemi meccanici, criteri di progettazione e metodi di indagine innovativi; come hanno particolare interesse studi attinenti alla automazione; tutti studi orientati in definitiva alla ricerca della qualità. Così penso che nel campo delle vibrazioni potrà essere svolto molto lavoro teorico oltre che sperimentale, utilizzando tecniche moderne come la tecnica dell'analisi modale, per il contenimento dei danni e del rumore prodotti da fenomeni vibratorii e potranno essere sviluppate le difficili ma importanti ricerche sul



monitoraggio e la diagnostica delle macchine, che ne permettano una manutenzione predittiva.

Nel campo dell'automazione, poi, ritengo che dovrà essere ampliato lo spettro delle ricerche sui robot, oggi prevalentemente dedicato a studi di cinematica. Un problema serio sui robot è costituito dalla loro limitata affidabilità. In buona parte questa scarsa affidabilità è dovuta alle condizioni in cui il robot opera; nell'ambiente di lavoro il manipolatore sopporta carichi variabili, non facilmente valutabili, i sensori e gli attuatori hanno limiti operativi e di precisione, l'ambiente è naturalmente sporco. D'altra parte aumentano continuamente le prestazioni che si richiedono a un robot, sia in termini di precisione, sia in termini di velocità. È chiaro che la ricerca di una maggiore affidabilità, di una maggiore precisione, di prestazioni più veloci comporta molto lavoro teorico, ma anche, ed in gran parte, lavoro sperimentale; lavoro che, nell'ambito della Meccanica applicata, potrebbe essere opportunamente orientato allo studio di problemi di cinetoelastodinamica e di controllo.

In chiusura di questa conversazione dovrei forse volgermi indietro per un rapidissimo consuntivo della mia presenza cinquantennale nella Università.

Ma non desidero parlare del mio lavoro scientifico, né della mia attività didattica. Sono convinto di aver fatto cose buone e cose meno buone; ma non sta a me giudicarmi. Sono anche convinto di aver avuto una buona dose di fortuna. Ho avuto la fortuna di sposare, giovanissimo, una donna che mi ha sempre incoraggiato nel mio lavoro, ho avuto la fortuna di entrare in carriera molto presto, la fortuna di essere chiamato a coprire una cattedra prestigiosa nella Università più prestigiosa dell'Italia; ho avuto soprattutto la fortuna di trovare di collaboratori validissimi, a cominciare dagli amici Fausto Caboni e Gustavo Favretti, che purtroppo ci hanno ormai lasciati, per giungere agli attuali cattedratici e ricercatori di Meccanica applicata alle macchine e di materie a questa strettamente legate.

Se, come talvolta si afferma, anche la fortuna è un merito, ebbene mi riconosco il merito di lasciare alla Facoltà di Ingegneria di Bologna, e non soltanto di Bologna, un gruppo di studiosi e di docenti di grande valore.