

Giuseppe Giudice

Appunti di  
Costruzione  
di Macchine

2014

## Ringraziamenti

Questi appunti sono stati riprodotti per molti anni a cura e spese del Dipartimento di Progettazione e Gestione Industriale (fondi didattici prof. Giudice); poi, scomparsi i fondi medesimi, gli studenti hanno dovuto arrangiarsi.

Per questo si ringrazia il Libero Mercato.

Ringrazio il sig. Paolo Mazza per l'assistenza alla stampa di parecchie edizioni.

Ringrazio il Dipartimento di Progettazione Aeronautiche, e in particolare il carissimo prof. Renato Tognaccini, per la stampa di molte edizioni precedenti.

Ringrazio gli allievi degli anni scorsi per gli utilissimi suggerimenti.

## Dove trovarmi

Ufficio: 081-7682471 (dall'interno del Politecnico solo 82471)

Telefonino: (meglio lasciare il numero alla tradizione orale, comunque lo uso solo per chiamare, quindi di solito risponde la segreteria...; in compenso richiamo io appena posso.)

Posta elettronica: [giudice@unina.it](mailto:giudice@unina.it)



Figura 1: L'autore sulla spiaggia di Montecito, California, il 18 III 1990.

## Presentazione

Questi appunti nascono dalla mia esperienza didattica nei corsi di Costruzione di Macchine per i Corsi di Laurea di Ingegneria Chimica e, più di recente, di Ingegneria dei Materiali e di Ingegneria navale.

Sono stati concepiti solo *a servizio* e non come *sostitutivi* della lezione; di fatto, l'esposizione in aula degli argomenti è sempre molto più ampia di quanto qui riportato (per non parlare dei miei intermezzi culturali); ciò nasce sia dalla mancanza di tempo per la redazione di dispense più complete, sia dalla difficoltà di procurarsi materiale iconografico, tabelle e dati tecnici, sia dalla necessità di contenere i costi di stampa, e quindi di non produrre troppe pagine.

Le parti scritte in carattere piccolo sono complementari e vengono di solito tralasciate; lo svolgimento del corso suggerirà delle integrazioni, e magari di trattare più sinteticamente alcune parti.

Il capitolo sull'analisi dinamica, e sulle sue applicazioni (analisi sismica di serbatoi alti) è ancora allo stato di abbozzo.

Conto di apportare altre modifiche nel prossimo futuro, sia ampliando alcuni argomenti, sia trattandone altri più sinteticamente, man mano che se ne presenterà l'esigenza. In particolare sto preparando del materiale sulla termodinamica della deformazione e sull'applicazione della meccanica dei continui alle problematiche della Costruzione di Macchine. Anche la parte calcolativa-progettuale merita di essere ampliata, compatibilmente con il ridotto numero di ore di quelle che è pur sempre un corso 'complementare'.

Forse già da quest'anno presenterò in maniera più organica l'instabilità dell'equilibrio elastico.

# Indice

<b>1</b>	<b>Prove sui materiali</b>	<b>1-1</b>
1.1	Prova di trazione . . . . .	1-1
1.1.1	Diagramma $\sigma$ - $\epsilon$ . . . . .	1-2
1.2	La tensione ammissibile . . . . .	1-3
1.3	Altre prove . . . . .	1-4
1.3.1	Prova di flessione . . . . .	1-5
1.3.2	Prova di resilienza . . . . .	1-5
1.3.3	Prova di durezza . . . . .	1-5
1.4	Macchine di prova . . . . .	1-7
<b>2</b>	<b>Deformazione</b>	<b>2-1</b>
2.1	Teoria della deformazione . . . . .	2-1
2.2	Misura della deformazione . . . . .	2-2
2.2.1	Estensimetri elettrici . . . . .	2-2
2.2.2	Fotoelasticità . . . . .	2-3
<b>3</b>	<b>Richiami di Resistenza dei Materiali</b>	<b>3-1</b>
3.1	Analisi della tensione . . . . .	3-1
3.2	Legame tensione-deformazione . . . . .	3-3
3.3	Termodinamica della deformazione . . . . .	3-6
3.4	Criteri di resistenza . . . . .	3-7
3.5	Formule di verifica e di progetto . . . . .	3-8
3.6	Solido del De Saint Venant . . . . .	3-8
3.7	Deformazioni laterali di travi inflesse . . . . .	3-11
<b>4</b>	<b>Metodo degli elementi finiti</b>	<b>4-1</b>
4.1	Il problema generale dell'equilibrio elastico . . . . .	4-1
4.2	Spostamento e sua approssimazione . . . . .	4-1
4.3	Lineamenti generali . . . . .	4-2
4.4	Proprietà e significato fisico della matrice $\mathbf{K}$ . . . . .	4-4
4.5	Complementi e complicazioni . . . . .	4-4
4.6	Analisi dinamica . . . . .	4-8
<b>5</b>	<b>Effetto d'intaglio</b>	<b>5-1</b>
5.1	Introduzione . . . . .	5-1
5.2	Analoga idrodinamica . . . . .	5-2
5.3	Soluzione del Neuber . . . . .	5-3
5.4	Foro circolare in lastra di larghezza finita, in trazione . . . . .	5-4
5.5	Piastra di larghezza finita con intagli laterali semicircolari, in trazione . . . . .	5-5
5.6	Piastra di larghezza finita con intagli laterali generici, in trazione . . . . .	5-6
5.7	Aste a sezione circolare . . . . .	5-8
<b>6</b>	<b>Instabilità dell'equilibrio elastico</b>	<b>6-1</b>
6.1	Introduzione . . . . .	6-1
6.1.1	Definizione di instabilità . . . . .	6-1
6.1.2	Un semplice esempio . . . . .	6-1
6.1.3	Postulato fondamentale . . . . .	6-3
6.2	Metodi per lo studio della stabilità . . . . .	6-3
6.2.1	Metodo statico . . . . .	6-3

6.2.2	Metodo energetico . . . . .	6-10
6.3	Applicazioni . . . . .	6-13
6.3.1	Travi snelle caricate di punta . . . . .	6-13
6.3.2	Travi tozze caricate di punta . . . . .	6-14
6.3.3	Metodo omega . . . . .	6-15
6.3.4	Altre applicazioni . . . . .	6-18
<b>7</b>	<b>Plasticità</b> . . . . .	<b>7-1</b>
7.1	Fenomenologia della plasticità . . . . .	7-1
7.2	Cause della plasticità . . . . .	7-2
7.3	Teorie matematiche della plasticità . . . . .	7-4
7.4	Tensioni residue . . . . .	7-5
<b>8</b>	<b>Scorrimento viscoso</b> . . . . .	<b>8-1</b>
8.1	Definizioni . . . . .	8-1
8.2	Prove di creep . . . . .	8-1
8.3	Meccanismi del creep . . . . .	8-4
8.4	Estrapolazione dei dati sperimentali . . . . .	8-5
8.5	Parametro di Larson-Miller . . . . .	8-6
8.6	Calcolo di strutture soggette a scorrimento viscoso . . . . .	8-6
8.7	Altri parametri per l'estrapolazione dei dati sperimentali . . . . .	8-10
8.7.1	Tempo compensato . . . . .	8-10
8.7.2	Parametri di Dorn . . . . .	8-10
8.7.3	Parametro di Manson-Haferd . . . . .	8-11
<b>9</b>	<b>Meccanica della frattura</b> . . . . .	<b>9-1</b>
9.1	Trattazione energetica . . . . .	9-2
9.2	Prove di tenacità alla frattura . . . . .	9-7
9.2.1	Tipi e proporzioni dei provini . . . . .	9-7
9.2.2	Appoggi e afferraggi . . . . .	9-7
9.2.3	Dimensioni dei provini . . . . .	9-7
9.2.4	Formazione a fatica della cricca . . . . .	9-8
9.2.5	Strumentazione . . . . .	9-10
9.2.6	Interpretazione della prova . . . . .	9-10
9.2.7	Calcolo di $K_{Ic}$ . . . . .	9-10
9.3	Materiali per basse temperature . . . . .	9-12
<b>10</b>	<b>La rilevazione delle cricche</b> . . . . .	<b>10-1</b>
10.1	Liquidi penetranti . . . . .	10-1
10.2	Raggi X e gamma . . . . .	10-2
10.3	Ultrasuoni . . . . .	10-2
10.4	Metodi elettromagnetici . . . . .	10-2
<b>11</b>	<b>Fatica dei materiali</b> . . . . .	<b>11-1</b>
11.1	Generalità . . . . .	11-1
11.1.1	Prove di fatica . . . . .	11-1
11.1.2	Aspetto della rottura per fatica . . . . .	11-2
11.1.3	Studio del comportamento a fatica . . . . .	11-2
11.1.4	Metodo Staircase . . . . .	11-6
11.1.5	Fattori che influenzano la fatica . . . . .	11-8
11.1.6	Trattamenti di rullatura e di pallinatura . . . . .	11-11
11.2	Resistenza a limite di fatica . . . . .	11-11

11.2.1	Determinazione del coefficiente di sicurezza . . . . .	11-11
11.2.2	Osservazioni critiche . . . . .	11-14
11.3	Resistenza a fatica (vita finita) . . . . .	11-16
11.3.1	Determinazione dl numero di cicli a rottura . . . . .	11-16
11.3.2	Esercizio: albero in flessione rotante . . . . .	11-18
11.3.3	Fatica cumulativa . . . . .	11-18
11.4	Propagazione delle cricche di fatica . . . . .	11-19
<b>12</b>	<b>Recipienti a parete sottile</b> . . . . .	<b>12-1</b>
12.1	L'elemento di membrana . . . . .	12-1
12.2	Geometria dei recipienti di rivoluzione . . . . .	12-2
12.3	Equazioni di equilibrio . . . . .	12-2
12.3.1	Prima equazione di equilibrio (equilibrio locale) . . . . .	12-2
12.3.2	Seconda equazione di equilibrio (equilibrio globale) . . . . .	12-5
12.4	Applicazioni . . . . .	12-6
12.4.1	Recipienti per gas . . . . .	12-6
12.4.2	Sfera di raggio $R$ . . . . .	12-6
12.4.3	Cilindro di raggio $R$ con fondi di pezzo . . . . .	12-6
12.4.4	Recipiente torico . . . . .	12-7
12.4.5	Serbatoio conico per liquidi . . . . .	12-7
<b>13</b>	<b>Recipienti a parete spessa</b> . . . . .	<b>13-1</b>
13.1	Equazioni di Lamé . . . . .	13-1
13.1.1	Equazione di equilibrio . . . . .	13-1
13.1.2	Equazioni di congruenza . . . . .	13-1
13.1.3	Equazioni di Navier (legame tensione-deformazione) . . . . .	13-2
13.1.4	Equazione differenziale della tensione . . . . .	13-2
13.2	Formule di progetto e di verifica . . . . .	13-4
13.3	Appendice al capitolo . . . . .	13-7
<b>14</b>	<b>Recipienti per altissime pressioni</b> . . . . .	<b>14-1</b>
14.1	Recipienti cerchiati . . . . .	14-1
14.2	Recipienti nastrati . . . . .	14-2
14.3	Recipienti autocerchiati . . . . .	14-3
<b>15</b>	<b>La costruzione dei recipienti</b> . . . . .	<b>15-1</b>
15.1	Spessori minimi delle pareti . . . . .	15-1
15.2	Recipienti sferici . . . . .	15-1
15.3	Cilindri soggetti a pressione interna . . . . .	15-2
15.4	Cilindri soggetti a pressione esterna . . . . .	15-4
15.5	Cilindri verticali snelli . . . . .	15-5
15.5.1	Pressione . . . . .	15-6
15.5.2	Carichi statici . . . . .	15-6
15.5.3	Spinta del vento . . . . .	15-7
15.5.4	Carico sismico . . . . .	15-8
15.6	Cilindri orizzontali snelli . . . . .	15-8
15.7	Fondi . . . . .	15-11
15.7.1	Fondi sferici . . . . .	15-11
15.7.2	Fondi ellittici . . . . .	15-11
15.7.3	Fondi torosferici . . . . .	15-13
15.7.4	Costruzioni grafiche per fondi torosferici . . . . .	15-13

15.7.5	Aspetti normativi . . . . .	15-15
15.8	Serbatoi di stoccaggio . . . . .	15-17
15.8.1	Serbatoi per liquidi . . . . .	15-17
15.8.2	Serbatoi per gas . . . . .	15-18
15.9	Strutture di sostegno . . . . .	15-18
15.9.1	Fondazioni . . . . .	15-18
15.9.2	Sostegni . . . . .	15-19
15.10	Tecnologie per la costruzione dei recipienti . . . . .	15-21
<b>16</b>	<b>Collegamenti filettati, flange e guarnizioni</b>	<b>16-1</b>
16.1	Chiusura dei coperchi . . . . .	16-1
16.2	Formule per le rigidzze . . . . .	16-6
16.3	Momento di serraggio . . . . .	16-7
16.4	Verifica della vite . . . . .	16-7
16.5	Distanze tra i bulloni . . . . .	16-10
16.6	Collegamento a flangia per attrito . . . . .	16-11
16.7	Tabelle dell'unificazione . . . . .	16-12
16.8	Guarnizioni . . . . .	16-16
16.8.1	Guarnizioni tra superfici fisse . . . . .	16-16
16.8.2	Guarnizioni tra superfici mobili . . . . .	16-16
16.9	Flange . . . . .	16-19
<b>17</b>	<b>Trasmissioni</b>	<b>17-1</b>
17.1	Generalità . . . . .	17-1
17.2	Ruote di frizione . . . . .	17-4
<b>18</b>	<b>Ruote dentate</b>	<b>18-1</b>
18.1	Generalità . . . . .	18-1
18.2	Classificazione . . . . .	18-3
18.3	Profili dei denti . . . . .	18-3
18.3.1	Profilo cicloidale . . . . .	18-4
18.3.2	Profilo ad evolvente . . . . .	18-7
18.4	La forma della dentatura . . . . .	18-8
18.4.1	Ruote a denti diritti . . . . .	18-8
18.4.2	Ruote a denti elicoidali . . . . .	18-9
18.5	Angolo di spinta . . . . .	18-15
18.6	La costruzione delle ruote dentate ad evolvente . . . . .	18-15
18.7	Verifica delle ruote dentate . . . . .	18-16
18.7.1	Simboli . . . . .	18-17
18.7.2	Condizione di resistenza al pitting . . . . .	18-17
18.7.3	Condizione di resistenza alla fatica . . . . .	18-20
18.7.4	Progetto a flessione del dente . . . . .	18-22
<b>19</b>	<b>Cuscinetti a strisciamento</b>	<b>19-1</b>
19.1	Generalità . . . . .	19-1
19.2	Lubrificanti e viscosità . . . . .	19-3
19.3	Teoria della lubrificazione perfetta . . . . .	19-5
19.4	Progettazione speditiva dei cuscinetti a strisciamento . . . . .	19-11
19.5	Verifica e progettazione dei cuscinetti a strisciamento . . . . .	19-11
19.6	Un esempio . . . . .	19-17
19.7	Materiali per cuscinetti a strisciamento . . . . .	19-19

<b>A</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>A-1</b>
A.1	Manuali ed enciclopedie . . . . .	A-1
A.2	Opere generali . . . . .	A-1
A.3	Articoli . . . . .	A-2
A.4	Opere su comportamento meccanico e scelta dei materiali . . . . .	A-2
A.5	Periodici . . . . .	A-3
A.6	Norme . . . . .	A-3
A.6.1	Norme per progetto ed il calcolo di componenti a strutture . . . . .	A-3
A.6.2	Principali norme circa le prove sui materiali metallici . . . . .	A-4
A.6.3	Principali norme circa le prove sui materiali non metallici . . . . .	A-4
A.6.4	Raccolte di norme tecniche europee . . . . .	A-5
A.6.5	Manuali UNI . . . . .	A-6
A.6.6	ISO Standards Handbooks . . . . .	A-6
A.6.7	Altre pubblicazioni . . . . .	A-6
<b>B</b>	<b>Alfabeto greco</b>	<b>B-1</b>