

*guide ai programmi dei corsi 1996/97*



**INGEGNERIA DEI MATERIALI**

**POLITECNICO  
DI TORINO**

Le *Guide* sono predisposte sulla base dei testi forniti dai Consigli di settore e di corso di laurea.

## **I Facoltà di ingegneria**

*Presidente:* prof. Pietro Appendino

### *Corso di laurea*

Ingegneria aeronautica  
Ingegneria per l'ambiente e il territorio  
Ingegneria chimica  
*Settore civile/edile:*  
    Ingegneria civile  
    Ingegneria edile  
Ingegneria elettrica  
Ingegneria gestionale  
*Settore dell'informazione:*  
    Ingegneria delle telecomunicazioni  
    Ingegneria elettronica  
    Ingegneria informatica  
Ingegneria dei materiali  
Ingegneria meccanica  
Ingegneria nucleare

### *Presidente*

*(coordinatore)*

Prof. Gianfranco Chiocchia  
Prof. Antonio Di Molfetta  
Prof. Vito Specchia  
Prof. Giovanni Barla  
    Prof. Giovanni Barla  
    Prof. Secondino Coppo  
Prof. Roberto Napoli  
Prof. Agostino Villa  
Prof. Paolo Prinetto  
    Prof. Mario Pent  
    Prof. Carlo Naldi  
    Prof. Paolo Prinetto  
Prof. Carlo Gianoglio  
Prof. Rosolino Ippolito  
Prof. Evasio Lavagno

## **II Facoltà di ingegneria (sede di Vercelli)**

*Presidente:* prof. Antonio Gugliotta

### *Corso di laurea*

Ingegneria civile  
Ingegneria elettronica  
Ingegneria meccanica

### *Coordinatore*

Prof. Riccardo Nelva  
Prof. Luigi Ciminiera  
Prof. Maurizio Orlando

**Edito a cura del SERVIZIO STUDENTI**

**Politecnico di Torino**

**Corso Duca degli Abruzzi 24 - 10129 Torino - Tel. 564.6250**

**Stampato nel mese di giugno 1996**

**CASA EDITRICE CELID, Via Lodi, 27 - Torino - Tel. 248.93.26**

**Libreria: C.so Duca degli Abruzzi, 24 - Torino - Tel. 540.875**

**SOMMARIO**

<b>CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI</b>	<b>5</b>
<b>PROGRAMMI DEGLI INSEGNAMENTI OBBLIGATORI</b>	<b>13</b>
<b>PROGRAMMI DEGLI INSEGNAMENTI D'ORIENTAMENTO</b>	<b>74</b>
<b>INDICI ALFABETICI PER INSEGNAMENTO E PER DOCENTE</b>	<b>105</b>

**Le Guide ai programmi dei corsi di laurea in ingegneria.** Scopo fondamentale dei presenti opuscoli è quello di orientare gli studenti nella scelta dei piani di studio. In un momento particolarmente arduo di riforma e di scelte di sviluppo dell'assetto universitario, gli studenti devono poter decidere con il massimo della chiarezza, per potersi adeguare alle innovazioni, ed eventualmente anno per anno farsi ragione e modificare le scelte a seguito delle più specifiche verifiche attitudinali.

Nel 1996/97 sono attivati a Torino tredici *corsi di laurea* (elenco alla pagina a fronte). Per permettere l'approfondimento di competenze metodologiche e di tecniche progettuali realizzative e di gestione in particolari campi, i corsi di laurea possono essere articolati in indirizzi ed orientamenti. Dell'*indirizzo* eventualmente seguito viene fatta menzione nel certificato di laurea, mentre gli *orientamenti* corrispondono a differenziazioni culturali, di cui invece non si fa menzione nel certificato di laurea; gli orientamenti vengono definiti annualmente dai competenti *Consigli dei corsi di laurea*, e ne viene data informazione ufficiale mediante il *Manifesto degli studi*. Nelle pagine di queste *Guide*, di ciascun corso di laurea viene data una breve descrizione, e viene illustrato il programma di attuazione degli orientamenti previsti per ogni indirizzo.

**Gli insegnamenti.** Il nuovo ordinamento didattico<sup>1</sup> prevede diversi tipi di insegnamenti, distinti in monodisciplinari, monodisciplinari a durata ridotta (nel seguito indicati come corsi ridotti), e integrati. Un *insegnamento monodisciplinare* è costituito da 80–120 ore di attività didattiche (lezioni, esercitazioni, laboratori, seminari ecc.) e corrisponde ad una unità didattica o annualità. Un *corso ridotto* è costituito da 40–60 ore di attività didattiche e corrisponde a mezza annualità. Un *corso integrato* è costituito da 80–120 ore di attività didattiche e corrisponde ad una annualità; esso è svolto – in moduli coordinati di almeno 20 ore ciascuno – da due o, al massimo, tre professori che fanno tutti parte della commissione d'esame.

<sup>1</sup> Decreto Ministeriale del 22.05.1995, pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 166 del 18.07.1995.

Ogni corso di laurea corrisponde a 29 annualità complessive, ripartite, in ognuno dei cinque anni di corso, su due *periodi didattici* (detti anche impropriamente semestri); ogni periodo didattico è di durata pari ad almeno 13 settimane effettive di attività. Un'altra novità introdotta dal DPR 20 maggio 1989<sup>2</sup> è costituita dal fatto che non sono prescritti specifici insegnamenti (almeno a livello nazionale) per il conseguimento della laurea in un determinato corso di laurea in Ingegneria, ma sono prescritti i numeri minimi di unità didattiche da scegliere in determinati raggruppamenti disciplinari consistenti in *gruppi*<sup>3</sup> di discipline affini. Lo stesso nuovo Statuto stabilisce l'articolazione dei vari corsi di laurea in termini di *gruppi* e di *unità didattiche*, cosicché ogni Consiglio di corso di laurea può più facilmente adeguare annualmente il piano degli studi alle nuove esigenze richieste dal rapido evolversi delle conoscenze e degli sviluppi tecnologici. Perciò ogni anno i vari Consigli dei corsi di laurea stabiliscono gli insegnamenti ufficiali, obbligatori e non obbligatori, che costituiscono le singole annualità, e le norme per l'inserimento degli insegnamenti non obbligatori, eventualmente organizzati in orientamenti.

Tutte queste informazioni e norme vengono pubblicate ogni anno nel *Manifesto degli Studi* (v. *Guida dello studente*, pubblicata a cura del Servizio studenti).

**Finalità e organizzazione didattica dei vari corsi di laurea.** Le pagine di queste *Guide* illustrano per ognuno dei corsi di laurea attivati – ed eventualmente per ognuno dei rispettivi indirizzi attivati – le professionalità acquisibili dai laureati, nonché il concetto ispiratore dell'organizzazione didattica, fornendo tracce schematiche di articolazione delle discipline obbligatorie ed esemplificazioni relative ai corsi facoltativi, organicamente inquadrabili nei vari *curricula* accademici.

Ogni corso di laurea (tranne rarissime eccezioni) ha previsto in prima attuazione l'organizzazione di tutti i corsi in periodi didattici. Per quanto concerne l'organizzazione didattica e l'attribuzione dei docenti agli insegnamenti, si segnala ancora che:

- alcuni corsi di laurea introducono già al terzo anno una scelta di corsi di indirizzo o di orientamento, che richiedono la formulazione di un'opzione fra le scelte segnalate: tali opzioni vanno esercitate all'atto dell'iscrizione;
- in relazione a talune difficoltà, che possono verificarsi all'atto dell'accorpamento di taluni CL per le discipline di carattere propedeutico (del primo e secondo anno), non è assicurata la corrispondenza dei docenti indicati con gli effettivi titolari di dette discipline. In alcuni casi, non essendo noto al momento della stampa delle *Guide*, il nome del docente è stato lasciato indeterminato ("Docente da nominare").

<sup>2</sup> Pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 186 del 10.08.1989.

<sup>3</sup> Questi *gruppi* coincidono con quelli dei raggruppamenti concorsuali per i professori universitari.

# Corso di laurea in Ingegneria dei Materiali

## Profilo professionale

Il corso di laurea in *Ingegneria dei materiali* è quello di più recente attivazione presso il Politecnico di Torino ed è sorto per consentire di soddisfare crescenti richieste provenienti dal mondo industriale delle tecnologie avanzate, con particolare riferimento a quello operante nell'Italia nord-occidentale. Le motivazioni sono di carattere generale e specifico.

Fra le prime deve essere annoverata la constatazione che gli ultimi decenni hanno visto uno straordinario aumento nel numero dei materiali di nuova concezione resisi disponibili per le più svariate applicazioni tecnologiche e un netto miglioramento generale delle conoscenze, e quindi delle caratteristiche di impiego, di quelli affermatasi in tempi più lontani.

La scelta del materiale per la soluzione di un determinato problema è ora più ampia che non nel passato e spesso si assiste ad una vera e propria competizione fra materiali, o combinazioni di materiali, assai dissimili tra di loro. Scelta più ampia, ma anche più difficile, che può essere adeguatamente sfruttata solo in presenza di un quadro di conoscenze non riscontrabile in alcuno degli indirizzi dei corsi di laurea in ingegneria del Politecnico di Torino. Questi ultimi formano infatti, nei diversi campi, tecnici utilizzatori di materiali che, per le crescenti necessità di specializzazione e il dilatarsi dello scibile nei settori specifici, non possono però che ricevere informazioni non approfondite su di essi.

Occorre invece che l'ingegnere dei materiali sia in grado di garantire una adeguata competenza ingegneristica e tecnologica non solo per la scelta e la realizzazione di materiali estremamente affidabili in condizioni di impiego molto severe, ottenuti eventualmente con tecnologie appositamente concepite, ma anche per consentire la messa a punto di nuovi materiali e l'estensione dei campi di applicazione di quelli noti. Nella sua attività dovrebbe inoltre aver presenti le implicanze di carattere economico, sociale, ecologico, quali la disponibilità delle materie prime, gli apporti energetici necessari per la loro trasformazione, i riflessi sull'ambiente della loro produzione e utilizzazione e del loro smaltimento, gli aspetti relativi alla sicurezza, ecc.

La formazione di personale idoneo ad affrontare le problematiche connesse con la utilizzazione e la produzione dei materiali non può che afferire alle Facoltà di ingegneria, essendo indispensabile una solida mentalità ingegneristica non solo per gli aspetti legati alla fabbricazione dei materiali, ma anche e principalmente per quanto attiene alla loro capacità di risolvere problemi ingegneristici, ivi compresi quelli afferenti alla messa a punto di componenti destinati alle più varie applicazioni. Solo in queste facoltà esistono le condizioni che consentono, sulla base di adeguate conoscenze delle materie di base, delle discipline ingegneristiche fondamentali e dell'uso dei mezzi informatici, di sviluppare in modo approfondito argomenti di carattere chimico, fisico, meccanico ed elettronico sulla natura dei materiali e sulla interdipendenza fra proprietà e microstruttura, sui fenomeni che regolano i processi di produzione e la conduzione degli impianti, sulle possibilità di modificare le proprietà dei materiali con opportuni trattamenti termici, meccanici o di altra natura.

Nonostante questa situazione potenzialmente favorevole occorre sottolineare che in Italia, a differenza di tutti i paesi più industrializzati nei quali la ricerca e la didattica relative ai materiali si sono notevolmente sviluppate, vi è stata finora una scarsa attenzione a questi problemi. Solo in tempi relativamente recenti sono stati infatti attivati presso alcune Facoltà di ingegneria corsi di laurea in *Ingegneria dei materiali*.

Per quanto concerne l'attivazione del nuovo corso di laurea preso il Politecnico di Torino occorre rilevare che in tale ambito sono presenti spettri di competenze specifiche assai ampi, specie se confrontati con quelli di altre sedi universitarie dell'Italia nord-occidentale. Il territorio di riferimento è dunque assai esteso e caratterizzato dalla presenza del più importante e complesso tessuto di industrie che utilizzano o producono i migliori materiali tradizionali e quelli più avanzati di tutto il territorio nazionale. In esso già esiste un mercato del lavoro che deve essere occupato e che è destinato ad espandersi, ed è presente una forte domanda di formazione altamente qualificata nell'area dei materiali, per garantire l'indispensabile competitività delle industrie anche in questo fondamentale settore.

Con riferimento anche a quanto testè esposto, e avendo presente, in ordine al nuovo corso di laurea, anche la situazione esistente presso gli altri paesi della Comunità Europea, è possibile precisare ulteriormente la nuova figura professionale che, pur potendo operare in modo autonomo, sembra trovare la collocazione più idonea nell'ambito di *team* di progettazione operanti presso le industrie dei trasporti su strada e su rotaia e presso quelle aeronautiche, chimiche, meccaniche ed elettroniche.

Nell'ambito del settore del trasporto terrestre, così importante nell'area nord-occidentale del Paese, è certamente indispensabile la presenza di competenze tali da consentire l'ottimizzazione della progettazione di componenti basata su una conoscenza delle correlazioni fra struttura e proprietà che consenta di influire sulla scelta dei materiali e sulle tecnologie di elaborazione, valutando con competenza le possibilità offerte dai nuovi materiali, quali ad es. i materiali compositi a matrice polimerica o metallica, i tecnopolimeri, le leghe altoresistenziali e quelle leggere, i materiali ceramici non tradizionali, ecc., per poter affidare loro un ruolo significativo nella competizione tecnologica.

Considerazioni analoghe possono essere formulate per quanto concerne il settore aeronautico e aerospaziale, anch'esso presente in modo significativo in ambito regionale. I materiali sono uno dei fattori strategici per lo sviluppo delle specifiche attività produttive e per la presenza del Paese in consorzi internazionali: si tratta di materiali ad alta resistenza e bassa densità per impieghi strutturali, di materiali ceramici o metallici per alte temperature, di materiali resistenti agli *shock* termici o con proprietà idonee ad essere assemblati in condizioni di microgravità. In questo caso, più che in ogni altro, occorre che la qualità dei materiali offra la massima garanzia per poter assicurare un'analogha caratteristica ai componenti.

Per quanto concerne l'ambito dell'industria chimica ogni innovazione di processo richiede per gli impianti la disponibilità di materiali adeguati, in grado spesso di lavorare con grande affidabilità in condizioni estreme per quanto concerne la temperatura, la pressione, l'aggressività dei sistemi da elaborare. La scelta dei materiali è in questo caso particolarmente basata sulla conoscenza dei fenomeni chimico-fisici che regolano e condizionano i processi tecnologici e la disponibilità di laureati che accomunino conoscenze ingegneristiche e quelle sui materiali risulta altamente appetibile dalle numerose industrie del settore attive sul territorio.

Nel settore di vitale importanza per l'innovazione tecnologica dell'elettronica, i materiali e le tecnologie realizzative costituiscono un fattore di importanza strategica per gli sviluppi futuri di industrie e di laboratori di ricerca che hanno conquistato o desiderano acquisire una dimensione europea. In settori quali la microelettronica, le microonde, la conversione diretta dell'energia, la componentistica nell'infrarosso e in generale l'optoelettronica, che vedono nell'area nord-occidentale del paese la maggiore concentrazione di industrie manifatturiere nel campo sia delle applicazioni informatiche che in quello delle telecomunicazioni, l'elemento innovativo tecnologico sempre più si basa sullo sfruttamento delle caratteristiche fisiche dei materiali, dai semiconduttori composti, ai materiali amorfi, ai ceramici avanzati, e sulla conoscenza e sull'impiego delle loro "anomalie". Diventa perciò vitale per industrie e laboratori di ricerca poter disporre di una formazione universitaria "di eccellenza" nel campo dei nuovi materiali, accompagnata da una profonda sensibilità (ingegneristica) ai problemi dei campi di applicazione dei dispositivi moderni (integrati ibridi e monolitici, componenti per onde millimetriche, ottica integrata, ...).

Molti altri settori, alcuni consolidati ed altri in fase di decollo, quali quelli afferenti all'industria meccanica in generale, alla produzione e alla conversione dell'energia, alla bioingegneria, alla industria delle costruzioni, etc., tutti presenti nelle aree ad alto sviluppo industriale, riconoscono nella scelta dei materiali più idonei per la soluzione di ciascun problema la chiave di volta per presentarsi in modo competitivo sui mercati. Le competenze presenti nel Politecnico, spesso di rilevanza internazionale, nel campo della chimica, della fisica e dell'elettronica, della scienza dei materiali e della metallurgia, sono in grado di assicurare, in stretta collaborazione con gli enti esterni interessati, un processo formativo volto alla preparazione di tecnici in grado di operare, a livello direttivo, sia in laboratori e sezioni di ricerca e sviluppo di aziende private e in centri di ricerca pubblici (CNR), sia in industrie dove sia strategica la scelta dei materiali e delle tecnologie per la realizzazione di componenti o dispositivi.

## Insegnamenti obbligatori

La scelta proposta per gli insegnamenti obbligatori, globalmente considerati, è mirata a fornire una preparazione, sia di base, sia specifica tecnico-professionale, congruente con le indicazioni di profilo professionale precedentemente esposte.

Per quanto riguarda la formazione matematica di base, oltre al *corpus* tradizionalmente impartito negli attuali insegnamenti del biennio (*Analisi matematica*, *Geometria*), seppur parzialmente rivisti al fine di meglio rispondere a nuove esigenze emerse, si pone l'esigenza di trovare lo spazio per tematiche che si ritengono indispensabili per la formazione di un ingegnere dei materiali. Per soddisfare tale esigenza si introduce, a mezza annualità, il corso di analisi superiore (*Analisi 3*), cui si riserva il compito primario di insegnare le funzioni di variabile complessa e le trasformate integrali (soprattutto Fourier) e si introduce mezza annualità di *Calcolo numerico*, cui si richiede una trattazione dei concetti usualmente proposti affrontati con un preciso taglio applicativo. Per quanto concerne l'aspetto dell'informatica di base un insegnamento di *Fondamenti di informatica* fornisce le prime nozioni relative all'architettura dei sistemi di elaborazione ed alla loro programmazione.

La preparazione di base è completata da un corso di *Chimica*, due di *Fisica* e uno di *Elettrotecnica*, secondo i requisiti richiesti dall'ordinamento degli studi di ingegneria. In particolare i corsi di *Fisica* hanno soprattutto il compito di svolgere un ruolo formativo sugli aspetti unificanti della metodologia interpretativa propria della fisica. Punti significativi, sono rispettivamente, nella *Fisica 1*, nozioni generali sulle unità dimensionali, una trattazione unificata dei campi e lo studio congiunto del campo gravitazionale e di quello coulombiano, e, nella *Fisica 2*, una trattazione della termodinamica, non solo di tipo classico, ma anche statistico. Tali conoscenze consentono una descrizione microscopica del magnetismo e in particolare del ferromagnetismo e del ferrimagnetismo. Per quanto concerne l'*Elettrotecnica* la teoria dei circuiti viene fatta derivare dai modelli della trattazione dei campi elettromagnetici. La sua presenza nel primo periodo del secondo anno consente inoltre a un maggior numero di corsi di avvalersi delle metodologie rappresentative messe a punto da tale corso. Il fatto però che esso preceda *Analisi 3*, ove vengono introdotte le trasformate di Laplace, comporta che il calcolo simbolico generalizzato venga poi trattato in quest'ultimo corso.

Occorre qui sottolineare come i cinque insegnamenti previsti per il primo anno siano comuni agli altri corsi di laurea; questo facilita l'eventuale cambio di corso di laurea a quegli studenti che, al termine del primo anno, si accorgessero di aver operato una scelta non conforme alle proprie aspettative.

Il corso di laurea in *Ingegneria dei materiali* prevede come propedeuticità specifiche le tematiche presenti nei tre insegnamenti di *Struttura della materia*, *Scienza dei materiali* e *Fisica tecnica*:

– *Struttura della materia* completa la formazione fisica fornendo alcuni cenni di meccanica quantistica e di fisica dello stato solido con una particolare trattazione della struttura cristallina regolare e difettiva e delle proprietà di trasporto.

- *Scienza dei materiali* costituisce, a completamento dei principi chimico-fisici acquisiti dagli altri corsi, la base teorica delle discipline specialistiche a maggior carattere ingegneristico del corso di laurea. In particolare tratta dei diagrammi di stato, dei fenomeni di diffusione, dei processi di nucleazione, crescita e trasformazione delle fasi e infine dei meccanismi di rafforzamento.
- *Fisica tecnica* svolge il compito di completare le conoscenze dei materiali per quanto concerne gli aspetti della termodinamica, della termocinetica e della fluidodinamica.

La cultura ingegneristica di base è completata da cinque corsi a spettro ampio, ed in particolare da:

- un corso di *Scienza delle costruzioni*, nel quale sono presenti elementi teorici di base di tale disciplina e aspetti applicativi sulle problematiche tecniche legate alla resistenza dei materiali;
- un corso di *Elettronica applicata*, che fornisce gli elementi di base dell'elettronica circuitale, dedicando una particolare attenzione alla descrizione dei sottosistemi di maggiore impiego e alla loro corretta utilizzazione, piuttosto che a uno studio approfondito di ogni singolo circuito;
- un corso di *Elementi di meccanica teorica e applicata*, che sviluppa le principali nozioni di meccanica razionale e tratta ampiamente i temi tradizionali della meccanica applicata;
- un corso di *Economia e organizzazione aziendale*, nel quale i principi di economia e di gestione aziendale vengono ampliati con cenni di microeconomia;
- un corso di *Misure elettroniche*, che è organizzato in quattro moduli: metrologia, strumenti, misure particolari sui materiali e sistemi automatici di misura, nozioni sulla affidabilità e sugli enti normativi.

La preparazione professionale specifica nel campo dell'ingegneria dei materiali e delle loro tecnologie è fornita da quattro insegnamenti:

- *Materiali metallici*, dove, oltre a descrivere le principali proprietà dei metalli ferrosi e non ferrosi e le loro tecnologie, sono forniti criteri razionali di scelta e di controllo.
- *Scienza e tecnologia dei materiali polimerici*, dove viene presentato un quadro generale sui principali tipi di polimeri, sulla loro sintesi, sulle loro proprietà fisiche e tecnologiche e sui loro impieghi.
- *Scienza e tecnologia dei materiali ceramici*, dove sono sviluppate adeguate conoscenze sulle caratteristiche, sulla produzione e sull'uso dei materiali ceramici tradizionali e speciali.
- *Dispositivi elettronici*, nel quale, partendo dai concetti fondamentali della fisica dei solidi, si derivano le caratteristiche dei materiali semiconduttori. Successivamente vengono descritti i principi dei dispositivi a semiconduttore fornendo nozioni di base sugli aspetti tecnologici.

La preparazione professionale nel campo della meccanica delle macchine è data oltre a quella fornita nell'ambito del corso di *Elementi di meccanica teorica e applicata*, dagli insegnamenti di *Macchine*. La preparazione professionale nel campo degli impianti si concretizza con un corso di *Impianti metallurgici*.

## Orientamenti

Tra i rimanenti corsi necessari a completare il *curriculum*, quattro almeno sono obbligati dall'orientamento prescelto. Gli orientamenti sono:

- *Materiali metallici e metallurgia*
- *Materiali ceramici e polimerici*
- *Materiali per elettronica e optoelettronica*

Gli orientamenti sono stati individuati separando per filoni di applicazione la formazione dell'ingegnere e si basano inoltre sulle precise competenze scientifiche e didattiche consolidate presso il Politecnico di Torino.

Gli insegnamenti per ogni orientamento dovranno essere scelti nell'ambito delle discipline elencate nel seguito. Alla tavola dei corsi comuni seguono le tavole che elencano le scelte possibili all'interno degli orientamenti.

## Quadri riassuntivi degli insegnamenti

### Corsi comuni ai diversi indirizzi

<i>Anno</i>	<i>1° periodo didattico</i>	<i>2° periodo didattico</i>
1	<b>E0231</b> Analisi Matematica I <b>E0620</b> Chimica	<b>E2300</b> Geometria <b>E1901</b> Fisica I <b>E2170</b> Fondamenti di Informatica
2	<b>E0232</b> Analisi Matematica II <b>E1902</b> Fisica II <b>E1790</b> Elettrotecnica	<b>E5340</b> Struttura della Materia <b>E0234</b> Analisi Matematica III (r) <b>E0514</b> Calcolo Numerico (r) <b>E1660</b> Elementi di Meccanica Teorica e Applicata
3	<b>E4600</b> Scienza delle Costruzioni <b>E4590</b> Scienza dei Materiali <b>E1710</b> Elettronica Applicata	<b>E4681</b> Scienza e Tecnologia dei Materiali Polimerici I <b>E2060</b> Fisica Tecnica <b>E1441</b> Dispositivi Elettronici I
4	<b>E4630</b> Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici <b>E3110</b> Macchine <b>E1530</b> Economia e Organizzazione Aziendale	<b>E3180</b> Materiali Metallici <b>E3670</b> Misure Elettroniche <b>E0945</b> Costruzione di Macchine/ Disegno Tecnico Industriale
5	<b>E2740</b> Impianti Metallurgici <b>Y (1)</b> <b>Y (2)</b> <b>Y (5)</b>	<b>Y (3)</b> <b>Y (4)</b> <b>Y (5)</b>

**Orientamenti****Orientamento Materiali metallici e metallurgia**

- Y (1) E3265 Meccanica dei materiali/Metallurgia meccanica (i)  
 Y (2) E4640 Scienza e tecnologia dei materiali compositi  
 Y (3) E0910 Corrosione e protezione dei materiali metallici  
 Y (4) E5710 Tecnologie metallurgiche  
 Y (5) Vedi Tabella A o B

**Orientamento Materiali per elettronica e optoelettronica**

- Y (1) E5691 Tecnologie e materiali per l'elettronica I  
 Y (2) E4640 Scienza e tecnologia dei materiali compositi  
 Y (3) E1445 Dispositivi elettronici II/Elettronica dello stato solido  
 Y (4) E3870 Optoelettronica  
 Y (5) Vedi Tabella A o B

**Orientamento Materiali ceramici e polimerici**

- Y (1) Vedi Tabella A o B  
 Y (2) E4640 Scienza e tecnologia dei materiali compositi  
 Y (3) E4682 Scienza e tecnologia dei materiali polimerici II  
 Y (4) E5404 Superconduttività (r)  
 Y (4) E1994 Fisica delle superfici (r)  
 Y (5) Vedi Tabella A o B

(i) Corso integrato

(r) Corso ridotto

**a) Tabella A (1° semestre)**

- E4780 Siderurgia  
 E3265 Meccanica dei materiali/Metallurgia meccanica (i)  
 E5691 Tecnologie e materiali per l'elettronica I  
 E2740 Impianti metallurgici

**b) Tabella B (2° semestre)**

- E1920 Fisica degli stati condensati  
 E5241 Struttura della materia (sperimentale)  
 E3880 Ottica  
 E4370 Proprietà termofisiche dei materiali  
 E1445 Dispositivi elettronici II/Elettronica dello stato solido (i)  
 E0910 Corrosione e protezione dei materiali metallici  
 E5404 Superconduttività (r)  
 E1994 Fisica delle superfici (r)  
 E5692 Tecnologie e materiali per l'elettronica II  
 E3870 Optoelettronica  
 E5710 Tecnologie metallurgiche  
 E4682 Scienza e tecnologia dei materiali polimerici II

(i) Corso integrato

(r) Corso ridotto

# Programmi degli insegnamenti obbligatori

## E 023 1

## Analisi matematica 1

Anno: periodo 1:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)

72+48 (nell'intero periodo)

Docente: Luisella Caire

Il corso si propone di introdurre innanzitutto al linguaggio e al ragionamento matematico, fornendo, insieme alle basi dell'analisi delle funzioni reali di variabile reale (teoremi sulle funzioni continue e calcolo differenziale e integrale) una metodologia di lavoro che, partendo da una comprensione critica degli strumenti acquisiti, conduca, (attraverso riferimenti a problemi della fisica e dell'ingegneria) alla loro applicazione alle successive discipline tecnologiche.

### REQUISITI

Sono richiesti i concetti fondamentali di algebra, di geometria elementare, di trigonometria e di calcolo dei logaritmi della scuola secondaria superiore.

### PROGRAMMA

- Introduzione al linguaggio matematico. Inquadramento insiemistico di relazioni e funzioni. Numeri cardinali. Principio di induzione. Concetti di calcolo combinatorio. Insiemi numerici, in particolare numeri reali. Proprietà qualitative delle funzioni reali di variabile reale. [12 ore]
- Continuità in un punto e teoremi sulle funzioni continue; limiti e teoremi sui limiti; limiti di funzioni monotone. Confronto tra funzioni; infiniti e infinitesimi. Asintoti rettilinei. [16 ore]
- Successioni; Teorema di Bolzano–Weierstrass; funzione esponenziale. [6 ore]
- Proprietà globali delle funzioni continue: teorema degli zeri e applicazioni; continuità della funzione inversa. Teorema di Weierstrass; continuità uniforme. [6 ore]
- Derivata e differenziale; regole di derivazione; applicazioni allo studio della monotonia e degli estremi. [6 ore]
- Teoremi di Rolle e Lagrange, con applicazioni. Polinomi di Taylor: teoremi sul resto e applicazioni. Calcolo di polinomi di Taylor. Applicazione allo studio della convessità in un punto e dei flessi. Concetti sulla convessità su un intervallo. [12 ore]
- Primitive (integrale indefinito) per funzioni continue a tratti. Regole di integrazione. [6 ore]

- Integrale definito (di Riemann); classi di funzioni integrabili; media integrale; proprietà algebriche e disequazioni relative all'integrale definito. Funzione integrale: proprietà e teorema fondamentale del calcolo integrale. [6 ore]
- Integrali impropri e criteri di convergenza. [6 ore]
- Equazioni differenziali a variabili separabili, equazioni differenziali lineari del primo e secondo ordine. [4 ore]

### ESERCITAZIONI

Le esercitazioni seguiranno gli argomenti delle lezioni e potranno essere di due tipi: o svolte alla lavagna dal personale docente, o svolte ai rispettivi tavoli dagli allievi.

### BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

A. Bacciotti, F. Ricci, *Analisi matematica 1*, Liguori (primo e secondo corso).

C.D. Pagani, S. Salsa, *Analisi matematica. Vol. 1*, Masson (terzo corso).

Testi ausiliari:

P. Boieri, G. Chiti, *Precorso di matematica*, Zanichelli.

A. Tabacco, D. Giublesi, *Temi svolti di Analisi matematica 1*, Levrotto & Bella.

### ESAME

L'esame consiste in una prova scritta ed una prova orale. Il superamento della prova scritta è condizione necessaria per accedere alla prova orale. Per sostenere la prova scritta, gli studenti devono prenotarsi presso la segreteria didattica del Dipartimento. Maggiori dettagli sulle modalità di svolgimento delle prove saranno forniti all'inizio del corso.

**E 023 2****Analisi matematica 2**

Anno: periodo 2:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)  
72+48 (nell'intero periodo)

Docenti: Andrea Bacciotti

Il corso si propone di completare la formazione matematica di base dello studente, con particolare riguardo al calcolo differenziale e integrale in più variabili, alla risoluzione delle equazioni e dei sistemi differenziali, e ai metodi di sviluppo in serie.

**REQUISITI**

*Analisi matematica 1, Geometria.*

**PROGRAMMA**

- Calcolo differenziale in più variabili: funzioni di più variabili e topologia dello spazio euclideo  $n$ -dimensionale; [8 ore di lezione + 2 di esercitazione]
- Calcolo differenziale per funzioni di più variabili, formula di Taylor, massimi e minimi liberi. [10+4 ore]
- Calcolo differenziale su curve e superfici, funzioni implicite, massimi e minimi vincolati. [8+6 ore]
- Calcolo integrale in più variabili: misura degli insiemi, integrali multipli. [8+8 ore]
- Integrali su curve e superfici, integrali di linea e di flusso, campi vettoriali, teoremi di Green, Gauss, Stokes. [10 +4 ore]
- Spazi vettoriali normati e successioni di funzioni; convergenza uniforme. [6+2 ore]
- Serie numeriche, convergenza assoluta. [6+3 ore]
- Serie di Taylor e serie potenze. [8+3 ore]
- Serie di Fourier: convergenza quadratica, puntuale e uniforme. [6+3 ore]
- Sistemi differenziali: sistemi di equazioni differenziali e problemi di Cauchy; [4+1 h]
- equazioni e sistemi lineari a coefficienti costanti. [6+4 ore]

**ESERCITAZIONI**

Le esercitazioni seguiranno gli argomenti delle lezioni e saranno di due tipi: o svolte alla lavagna dal personale docente, o svolte ai rispettivi tavoli dagli allievi.

**BIBLIOGRAFIA**

Testo di riferimento:

A. Bacciotti, F. Ricci, *Lezioni di Analisi matematica 2*, Levrotto & Bella, Torino 1991.

Testi ausiliari:

M. Leschiutta, P. Moroni, M.T. Vacca, *Esercizi di matematica*, Levrotto & Bella, Torino, 1977.

P. Marcellini, C. Sbordone, *Esercitazioni di matematica. Vol. 2., parte 1. e 2.*, Liguori, 1991.

**ESAME**

L' esame consiste in una prova scritta ed una prova orale. Il superamento della prova scritta è condizione necessaria per accedere alla prova orale. Per sostenere la prova scritta, gli studenti devono prenotarsi presso la segreteria didattica del dipartimento. Maggiori dettagli sulle modalità di svolgimento delle prove saranno forniti all'inizio del corso.

**E 023 4****Analisi matematica 3**

(Corso ridotto)

Anno: periodo 2:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 3+1 (ore settimanali)  
36+14 (nell'intero periodo)

Docente: Giancarlo Teppati

Introduzione e sviluppo delle tecniche matematiche avanzate di uso più frequente nell'ingegneria: in particolare, studio di funzioni complesse di variabile complessa e delle trasformate di Fourier e di Laplace. Saranno studiate in modo esteso le funzioni analitiche e verranno anche introdotti argomenti di analisi funzionale classica, come la teoria delle distribuzioni e il prodotto di convoluzione, in modo da poter trattare correttamente, dal punto di vista matematico, le trasformate integrali.

**PROGRAMMA**

- Funzioni complesse di variabile complessa, esempi di funzioni complesse, limiti, continuità, derivabilità, funzioni analitiche, condizioni di Cauchy–Riemann sotto forma cartesiana e polare, funzioni armoniche, coniugate armoniche.
- Integrazione in campo complesso, teorema fondamentale di Cauchy sull'integrazione, poli e residui, teorema dei residui, formula integrale di Cauchy, formula integrale per le derivate, teorema di Liouville, calcolo di integrali e lemmi relativi.
- Sviluppi di Taylor e di Laurent. Teoremi vari sulle serie. Convergenza ed unicità e esistenza di sviluppi di Taylor e di Laurent, residuo all'infinito, principi di identità.
- Studio locale di funzioni analitiche, classificazione delle funzioni analitiche.
- Introduzione alla teoria delle distribuzioni, successioni e limiti di successioni di funzioni e funzionali, distribuzioni come funzionali lineari e continui, operazioni sulle distribuzioni,  $\delta$  e p.f.  $1/t$ , prodotto di convoluzione di funzioni e distribuzioni.
- Introduzione alle trasformate di Fourier e di Laplace di funzioni, proprietà della trasformata di Fourier di funzioni, distribuzioni a crescita lenta, trasformata di Fourier di distribuzioni a crescita lenta.
- Calcolo di trasformate di Fourier di distribuzioni notevoli, distribuzioni periodiche e trasformate, treno di impulsi e trasformate, teorema del campionamento, trasformata di Laplace, dominio e teorema sulla analiticità di una trasformata di Laplace.
- Formula di antitrasformazione della trasformata di Laplace, trasformata unilatera di Laplace e sue proprietà.

**BIBLIOGRAFIA**

- G. Teppati, *Lezioni di Analisi matematica III*, Levrotto & Bella (in corso di stampa).  
G. Teppati, *Esercizi svolti di Analisi matematica III* (in corso di stampa).

**ESAME**

L'esame consiste di una prova scritta e di una prova orale.

Il prerequisito necessario per sostenere l'esame è l'aver sostenuto gli esami di *Analisi 1 e 2*.

**E 051 4****Calcolo numerico**

(Corso ridotto)

Anno: periodo 2:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 3+1 (ore settimanali)  
38+12 (nell'intero periodo)

Docente: Giovanni Monegato

Il corso ha lo scopo di illustrare i metodi numerici di base e le loro caratteristiche (condizioni di applicabilità, efficienza sia in termini di complessità computazionale che di occupazione di memoria) e di mettere gli studenti in grado di utilizzare librerie scientifiche (IMSL, NAG) per la risoluzione di problemi numerici.

**REQUISITI**

*Analisi 1, Geometria, Fondamenti di informatica.*

**PROGRAMMA**

- *Aritmetica del calcolatore e algoritmi numerici.* [3 ore]

Errori di arrotondamento, operazioni di macchina.

Cancellazione numerica.

Condizionamento di un problema, stabilità di un algoritmo.

- *Sistemi lineari.* [8 ore]

Metodo di eliminazione di Gauss.

Decomposizione di Gauss e fattorizzazione LU.

Determinazione matrice inversa.

Metodi iterativi: Jacobi, Gauss-Seidel, SOR.

- *Autovalori di matrici.* [4 ore]

Metodo delle potenze.

Metodo delle potenze inverse.

Cenni sul metodo QR.

- *Approssimazione di dati e di funzioni.* [8 ore]

Interpolazione polinomiale: formule di Lagrange e di Newton.

Interpolazione con funzioni polinomiali a tratti.

Funzioni *spline*.

Metodo dei minimi quadrati.

- *Equazioni non lineari.* [3 ore]

Radici di equazioni non lineari: metodi di bisezione, secanti, tangenti; metodi iterativi in generale.

Sistemi di equazioni non lineari: metodo di Newton e sue varianti; metodi iterativi in generale.

- *Calcolo di integrali.* [4 ore]

Formule di quadratura di tipo interpolatorio: formule di Newton-Cotes e formule gaussiane.

Formule composte.

- *Equazioni differenziali ordinarie*. [4 ore]
- Metodi *one-step* espliciti. Metodi Runge–Kutta.  
Metodi *multistep* lineari. Metodi di Adams.  
Convergenza e stabilità dei metodi numerici.

### ESERCITAZIONI

Vengono sottolineati, con esempi, aspetti particolarmente importanti degli argomenti trattati nelle lezioni, svolti esercizi che contribuiscono ad una miglior comprensione della teoria e costruiti algoritmi di calcolo. Vengono infine proposte allo studente delle esercitazioni al calcolatore da svolgere a casa o presso i LAIB del Politecnico.

### BIBLIOGRAFIA

G. Monegato, *Elementi di calcolo numerico*, Levrotto & Bella, Torino, 1995.

### ESAME

1. Per i soli iscritti al corso è prevista una prova scritta finale, su tutto il programma svolto, sostitutiva dell'esame orale. Tale prova è da considerarsi alternativa al primo appello d'esame. Nel corso della prova non è ammessa la consultazione di testi. L'eventuale ritiro durante la prova di esonero non comporta alcuna conseguenza.
2. Negli appelli previsti dal calendario l'esame è solo orale.

**E 062 0****Chimica**

Anno: periodo 1:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali)  
78+26 (nell'intero periodo)

Docente: Aldo Priola

In questo corso ci si propone di illustrare le leggi fondamentali della chimica e di stabilire una stretta relazione tra queste e gli aspetti principali della chimica generale e applicata. A tale proposito nella parte finale del corso saranno presentati alcuni processi industriali che verranno discussi in modo critico in relazione ai principi fondamentali della chimica. Si ritiene inoltre indispensabile presentare alcuni aspetti della chimica organica. Nel corso delle esercitazioni saranno utilizzati i principi teorici per risolvere alcuni semplici problemi.

**PROGRAMMA**

*La struttura dell'atomo e le leggi fondamentali della chimica.* [12 ore]

Le leggi fondamentali della chimica. La struttura dell'atomo. Comportamento chimico degli elementi, tavola periodica, valenza e legami chimici, significato quantitativo di formule e reazioni.

*Lo stato gassoso.* [6 ore]

Leggi fondamentali dei gas ideali e reali. Vengono confrontati due approcci differenti allo studio del comportamento della materia: quello sperimentale e quello teorico (teoria cinetica dei gas).

*Lo stato liquido e le soluzioni.* [6 ore]

Proprietà dei liquidi e delle soluzioni. Modi di esprimere la concentrazione delle soluzioni. Proprietà colligative: pressione osmotica, conducibilità elettrica, ebullioscopia e crioscopia.

*Stato solido.* [6 ore]

I reticoli cristallini di Bravais. Il legame chimico nei solidi e le loro proprietà. Principali difetti reticolari. Diffrazione di raggi X. Diagrammi di stato e regola delle fasi.

*Termochimica.* [7 ore]

Primo e secondo principio della termodinamica. Tonalità termica delle reazioni chimiche e grandezze termodinamiche (entalpia, energia interna, lavoro). Entropia, energia libera e spontaneità delle trasformazioni chimiche e fisiche. Legge di Hess.

*Cinetica.* [5 ore]

Fattori che influenzano la velocità di reazione. Equazioni cinetiche per reazioni del primo e del secondo ordine. Energia di attivazione. Vengono confrontati aspetti cinetici e termodinamici nei processi chimici.

*Equilibrio chimico.* [8 ore]

Legge di azione di massa dedotta da considerazioni cinetiche. Principio di Le Châtelier. Equilibri in fase omogenea e eterogenea. Equilibri in soluzione: dissociazione di acidi e basi ( $pH$ ), idrolisi, soluzioni tampone.

*Elettrochimica.* [7 ore]

I potenziali *standard* di riduzione e l'equazione di Nernst. Spontaneità delle reazioni di ossido-riduzione. Pile e celle elettrolitiche.

*Chimica organica.* [10 ore]

Idrocarburi saturi, insaturi e aromatici. Gruppi funzionali. Nomenclatura, struttura e reazioni chimiche dei composti organici. Reazioni di polimerizzazione.

*Chimica descrittiva.* [10 ore]

In questa parte del corso sono esaminate le caratteristiche comuni agli elementi di ciascun gruppo della tavola periodica. Alcuni elementi (H, O, Na, Al, C, N, S, Cl, Fe) sono trattati in modo più dettagliato, con riferimento ad alcuni processi industriali di preparazione.

#### ESERCITAZIONI

Per ciascuno degli argomenti elencati nel *Programma delle lezioni* sono presentati semplici problemi. Le esercitazioni intendono costituire per gli allievi un momento di revisione critica del processo di apprendimento.

#### BIBLIOGRAFIA

C. Brisi, V. Cirilli, *Chimica generale e inorganica*, Levrotto & Bella, Torino.

C. Brisi, *Esercizi di chimica*, Levrotto & Bella, Torino.

M. Montorsi, *Appunti di chimica organica*, CELID, Torino.

Materiale integrativo dattiloscritto darà reso disponibile durante il corso.

#### ESAME

L'esame si articola in due prove: una prova scritta (A) ed una prova orale (B). La prova A consiste nel rispondere a trenta *quiz* del tipo multiscelta, alcuni dei quali richiedono l'esecuzione di calcoli. La sufficienza conseguita nella prova A consente di accedere alla prova B. La prova orale è completamento di quella scritta e quindi prende le mosse dalle risposte fornite dall'esaminando in quest'ultima. Il superamento dell'esame comporta l'esito positivo di ciascuna delle due prove.

**E 094 5****Disegno tecnico industriale +  
Costruzione di macchine**

Anno: periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6(2)+2(6) (ore settimanali)

Docente: Giovanni Roccati

Il corso intende fornire, con il primo modulo, una formazione di base sulle norme del disegno tecnico, in modo da consentire agli allievi sia l'interpretazione dei disegni delle macchine già esistenti, sia l'esecuzione di schizzi e semplici disegni, e potrà essere completato da alcuni cenni sull'uso di tecniche CAD. Il secondo modulo fornisce i concetti fondamentali per i calcoli di verifica e progetto degli organi delle macchine con particolare riferimento ai problemi di maggiore interesse per l'ingegnere elettrico.

**REQUISITI**

Sono propedeutici al secondo modulo i corsi di *Meccanica applicata alle macchine e Scienza delle costruzioni*.

**PROGRAMMA**– **Disegno tecnico industriale**

Assonometrie unificate, proiezioni ortogonali, sezioni, criteri generali di quotatura.

[4 ore]

Tolleranze dimensionali, generiche e ISO, tolleranze di forma. [6 ore]

Tecniche per definire le forme dei pezzi, criteri specifici di quotatura, e rugosità superficiale. [6 ore]

Disegno di elementi di macchine di particolare rilevanza: linguette, profili scanalati, cuscinetti a rotolamento, ruote dentate, illustrazione di alcuni esempi di disegni significativi. [8 ore]

Cenni su tecniche CAD. [2 ore]

– **Costruzione di macchine**

Richiami sullo stato di sollecitazione di un punto, tensioni principali, cerchi di Mohr, fatica ed effetto di intaglio, calcoli di verifica dei cuscinetti a rotolamento. [10 ore]

Ruote dentate; studio geometrico e calcoli di resistenza. [6 ore]

Dischi rotanti e tubi spessi. [6 ore]

Verifica collegamenti con linguette e scanalati, bulloni. [6 ore]

Molle. [4 ore]

Velocità critiche flessionali ed oscillazioni torsionali. [6 ore]

**ESERCITAZIONI**

Schizzi o minute di elementi meccanici e di complessivi preferibilmente di macchine od apparecchiature elettriche. [26 ore]

Applicazioni numeriche sul proporzionamento di organi meccanici, o calcolo di velocità critiche e pulsazioni proprie torsionali. [14 ore]

## BIBLIOGRAFIA

Appunti dalle lezioni del corso, sussidiati da fotocopie di appunti precedentemente preparati dal docente.

## ESAME

L'esame prevede:

- una prima prova grafico scritta avente una durata complessiva di 4 ore, dedicate per 3 ore alla soluzione di esercizi numerici, per l'ultima ora alla esecuzione di un semplice disegno;
- un successivo colloquio orale.

La raccolta delle tavole e degli esercizi eseguiti dall'allievo durante il corso costituirà un elemento ulteriore di valutazione, e pertanto dovrà essere presentato dall'allievo alla commissione esaminatrice.

**E 144 1****Dispositivi elettronici 1**

Anno: periodo 3:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)  
72+48 (nell'intero periodo)

Docente: Carlo Naldi

Il corso è il primo corso dell'albero di insegnamenti di elettronica applicata, con il compito di spiegare il funzionamento dei componenti. Il successivo corso di *Teoria dei circuiti elettronici* ne studierà l'inserimento nei circuiti attivi. Inoltre è l'insegnamento fondamentale per gli orientamenti rivolti verso i componenti e le tecnologie elettroniche.

Dopo un richiamo dei principi della fisica dei solidi, si derivano da questi le principali caratteristiche dei materiali dei semiconduttori. Successivamente vengono descritti i fondamentali dispositivi a semiconduttore dei sistemi elettronici. Vengono fornite nozioni di base sulla tecnologia dei circuiti integrati.

## PROGRAMMA

Parte prima

- *Cenni di fisica dei solidi.* [9 ore lezione+4 eserc.]  
Equazione di Schrödinger; barriera di potenziale: effetto *tunnel*; struttura cristallina, legami covalenti; semiconduttori IV e III-V gruppo.
- *Fenomeni di trasporto.* [9+6]  
Teoria delle bande di energia nei cristalli; fenomeni di generazione e ricombinazione; meccanismo della conduzione, massa efficace e fononi. Funzione distribuzione degli elettroni.  
Resistori reali. Tecnologia del *film* sottile e del *film* spesso, circuiti ibridi.
- *Materiali magnetici.* [6+2]  
Richiami su paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo. Perdite per isteresi e per correnti parassite. Cenni su materiali magnetici dolci: leghe Fe-Si, Fe-Ni, ferriti.  
Induttori reali: parametri parassiti. Nuclei compressi di materiali polverizzati (tecniche di progetto). Induttori con nucleo di ferrite. Magneti permanenti. Nastri magnetici.
- *Materiali dielettrici.* [6+0]  
Richiami sulle proprietà dielettriche. Materiali ferroelettrici e piezoelettrici. Isolanti inorganici: mica, quarzo, zaffiro, ceramiche. Polimeri dielettrici: polietilene, polipropilene, poliolefine, resine poliviniliche, polistirolo, teflon e teflon "caricato", poliammidi. Resine epossidiche.  
Condensatori reali: condensatori ceramici, condensatori elettrolitici e a tantalio condensatori a carta, a *film* plastico, a mica. Fibre ottiche.
- *Tecnologia dei circuiti integrati ibridi.* [6+0]  
Circuiti stampati. Substrati per circuiti ibridi. Circuiti a *film* sottile: deposizione (evaporazione e *sputtering*) e fotolitografia, componenti passivi (condensatori e induttori). Circuiti a *film* spesso: serigrafia e vernici, taratura per *trimming*, resistori, interconnessioni (*bonding*). Circuiti integrati a microonde.

Parte seconda.

- *Teoria elementare dei semiconduttori.* [6+10]  
Semiconduttore intrinseco e semiconduttori drogati; fenomeno di diffusione. Equazione di continuità.
- *Tecnologia dei circuiti integrati.* [6+4]  
Circuiti integrati ibridi: substrati, componenti passivi. Tecnologia planare: fasi del processo. Crescita del monocristallo (metodo Czochralski). Ossidazione, litografia, attacco chimico. Impiantazione ionica, diffusione e solubilità dei droganti. Processi CVD: crescita epitassiale, deposizione di polisilicio, di ossidi e di strati metallici. Cenni sulla tecnologia dell'arseniuro di gallio. Interconnessioni, *packaging* e *testing*. Resistori integrati.
- *Giunzione metallo – semiconduttore.* [3+4]  
Barriera di Schottky; capacità differenziale. Tecnica di misura  $C(V)$  dei profili di drogaggio; diodo Schottky e contatti ohmici.
- *Giunzione p-n.* [5+7]  
Giunzione all'equilibrio, capacità di transizione; correnti nel diodo; diodo reale: effetto della temperatura. Tecnologia dei diodi integrati: isole, defocalizzazione della corrente, strato sepolto. Comportamento dinamico del diodo: modello a controllo di carica. Fenomeni di rottura: effetto Zener, effetto valanga. Diodi Zener e diodi *tunnel*.
- *Transistore a effetto di campo a giunzione.* [2+0]
- *Transistore bipolare.* [7+4]  
Effetto transistoro; regioni di funzionamento; modelli di Ebers–Moll e modelli SPICE. Effetto *Early*. Tempi di commutazione, modello a controllo di carica. Effetto della resistenza distribuita di base. *Breakdown* a valanga e perforazione diretta.  
Tecnologia dei transistori integrati: transistoro planare *npn*; transistoro parassita, transistori *pnp*. Modello di processo; transistoro *Schottky* e isolamento a ossido.
- *MOSFET.* [6+2]  
Diodo MIS: inversione di popolazione, tensione di soglia di diodi ideali e reali. Modelli analitici dei MOS. MOS ad arricchimento e a svuotamento. Tecniche per il controllo della tensione di soglia. Tecnologia *metal gate* e *silicon gate* (NMOS).
- *Tecnologia VLSI. Ciclo di progetto dei circuiti integrati.* [4+2]  
Livelli di astrazione. Metodologie di progetto VLSI: *full custom*, *standard cell*, *gate array*. Tecniche di scalamento e limiti di integrazione. Interfaccia progettista – fabbrica: regole di progetto. Invertitori.
- *Uso del simulatore di componenti SPICE presso il LAIB.*

## BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

Naldi, Piccinini, *Dispositivi elettronici*, CELID, 1995.

Masera, Naldi, Piccinini, *Introduzione all'analisi dei dispositivi a semiconduttore*, Hoepli. *Tabelle e grafici dei materiali e componenti per l'elettronica*, CELID, 1995.

Testi ausiliari:

S.M. Sze, *Dispositivi a semiconduttore*, Hoepli, Milano.

R.S. Muller, T.L. Kamins, *Dispositivi elettronici*, 2. ed., Bollati-Boringhieri, To, 1993.

**ESAME**

L'esame è relativo alle due parti in cui è diviso il corso. Usualmente (ma non necessariamente) vengono superate separatamente, soprattutto perché durante il corso si ha la possibilità di superare la prima parte con un esonero. Il voto della prima parte fa media pesata con quello della seconda (pesi 1/3, 2/3). Con i soli scritti si può superare l'esame con un massimo di 27/30; per voti superiori, su richiesta, vi è una prova orale sulla seconda parte.

E 153 0

## Economia ed organizzazione aziendale

Anno: periodo 4:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali)

Docente: Giovanni Fraquelli (collab.: Elena Ragazzi)

La gestione di ogni attività di impresa, dai fatti squisitamente operativi alle scelte strategiche, risulta fortemente condizionata da valenze economiche. Il corso intende proporre concetti e tecniche di analisi utili al processo decisionale, attingendo ai riferimenti teorici dell'analisi microeconomica e a quelli tecnico-operativi derivanti dalla prassi aziendale. L'obiettivo è dunque quello di fornire una guida utile all'interpretazione dell'attività d'impresa tramite una molteplicità di strumenti di indagine resi disponibili dalle varie discipline economiche e aziendali.

### PROGRAMMA

- Differenti ottiche di studio dell'impresa.
- Significato economico dell'attività d'impresa, costi impliciti e concetto di profitto.
- L'utilizzo del bilancio a fini gestionali: analisi del conto economico, stato patrimoniale, flussi finanziari e determinazione degli indici di bilancio.
- Teoria della produzione e analisi dei costi: dalla funzione di produzione neoclassica all'analisi empirica dei costi.
- Relazione costi - volumi di produzione in presenza di uno o più prodotti.
- Produttività e progresso tecnico: concetto di produttività e costruzione di indici di produttività tramite dati di bilancio.
- Prezzi, produttività e volumi di produzione.
- La valutazione degli investimenti industriali, tecniche di valutazione e costo del capitale.
- Aspetti operativi connessi alla valutazione.

### ESERCITAZIONI

Produzione e costi:

la produzione come combinazione di fattori;

la produzione come combinazione di processi.

*Break-even analysis* e decisioni operative:

impresa monoprodotto e prezzo di vendita costante;

impresa monoprodotto e prezzo sensibile alla quantità venduta;

funzione discontinue e un solo prodotto;

scelta del *mix* produttivo con prezzo di vendita costante;

scelta del *mix*: più prodotti e prezzo variabile in funzione della quantità venduta;

più prodotti e *mix* produttivo non specificato;

concorrenza fra due imprese (duopolio).

Analisi della produttività:

indicatori di produttività parziale,

indicatori di produttività globale.

Attività economica e ricadute finanziarie.  
Decisioni di investimento.

#### BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

G. Fraquelli, *Elementi di economia manageriale : costi, produttività e decisioni di investimento*, CUSL, Torino, 1994.

G. Fraquelli, E. Ragazzi, *Elementi di economia manageriale : temi svolti*, CUSL, Torino, 1994.

Testi ausiliari, per approfondimenti:

G. Zanetti, *Economia dell'impresa*, Il Mulino, Bologna, 1992.

G.J. Thuesen, W.J. Fabrick, *Economia per ingegneri*, Il Mulino, Bologna, 1994.

#### ESAME

Prova scritta e orale.

**E 367 0****Misure elettroniche**

Anno:periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)  
72+40 (nell'intero periodo)

Docente: Ernesto Arri

Il corso intende fornire le nozioni di base sui metodi, gli strumenti e i sistemi di misura impiegati per studiare le proprietà dei materiali, valutarne i parametri ed eseguirne la verifica automatica lungo l'intera catena produttiva. Presentati i fondamenti della scienza delle misure e le organizzazioni che operano nell'ambito attuale della normativa e della certificazione dei prodotti per garantirne la qualità, vengono illustrati sia i componenti essenziali dei dispositivi per misurazione, sia i principali strumenti analogici e numerali implicati nei processi indicati, nonché le architetture più utilizzate per i sistemi automatici di acquisizione e distribuzione di dati.

Le esercitazioni in aula consistono in esemplificazioni pratiche e applicazioni di tipo numerico e grafico sugli argomenti trattati in lezione. Le esercitazioni sperimentali in laboratorio, svolte dagli studenti suddivisi in gruppi, hanno lo scopo di fare acquisire familiarità con gli strumenti e i metodi di misurazione presentati a lezione.

**REQUISITI**

*Elettrotecnica, Elettronica applicata*

**PROGRAMMA**

*Organizzazione per la qualità dei prodotti*

- Garanzia di qualità dei prodotti e dei servizi. Sicurezza, rispetto ambientale, affidabilità, manutenibilità e disponibilità di un prodotto. Certificazione dei prodotti.
- Misurazione come sorgente dell'informazione nel controllo dei processi e nell'automazione della produzione. Fabbrica automatica: automazione totale. Necessità di misurazioni lungo l'intero ciclo produttivo: qualità totale.
- Misurazione di grandezze fisiche e chimiche qualsiasi mediante trasduzione in grandezze elettromagnetiche. Importanza attuale delle misure elettromagnetiche.
- Norme per prodotti e servizi. Certificazione di conformità alle norme. Organismi metrologici, normativi, di accreditamento e di certificazione internazionali, europei, comunitari nazionali.

*Misurazione e misura*

- Livelli del processo conoscitivo sperimentale. Fondamenti di teoria della misurazione. Fenomeni fisici e relativi modelli. Grandezze misurabili. Unità di misura.
- Sistemi di unità di misura. Cenni storici sulla loro evoluzione. Sistema Internazionale di unità (SI). Definizione, realizzazione, riproduzione, mantenimento e disseminazione delle unità SI elettromagnetiche.
- Misura. Fascia di valore. Incertezza. Incertezza intrinseca. Compatibilità di più misure.
- Misurazione. Sistema misurato. Misurando. Segnale e rumore. Carico strumentale. Grandezze d'influenza: relativi campi.

- Procedimento logico operativo per l'esecuzione di una misurazione.
- Metodi di misurazione: diretti, indiretti, a letture ripetute. Metodi diretti: per indicazione e per confronto. Metodi per confronto: per opposizione e per sostituzione; differenziali e per azzeramento.

#### *Incertezze di misura*

- Normativa attuale sulla valutazione delle incertezze. Componenti d'incertezza: di categoria A, valutabili con metodi statistici, e di categoria B, valutabili con altri metodi.
- Elementi di teoria della probabilità. Fenomeni aleatori. Eventi. Probabilità: diretta, congiunta, subordinata. Eventi indipendenti. Variabili aleatorie (v.a.). Distribuzioni univariate di probabilità. Funzioni di ripartizione e di densità di probabilità. Momenti: valore medio, varianza, scarto tipo. Distribuzioni multivariate di probabilità. Covarianza. V.a. indipendenti. Teorema limite centrale.
- Elementi di statistica. Popolazioni di individui. Campioni statistici. Istogrammi. Momenti empirici. Variabili statistiche. Distribuzioni campionarie. Inferenze statistiche. Ipotesi statistiche. Stime puntuali e intervallari dei parametri teorici di una popolazione. Livelli di fiducia. Gradi di libertà.
- Valutazione delle componenti d'incertezza di categoria A e B nelle misurazioni dirette e indirette. Composizione delle incertezze. Incertezza composta. Incertezza globale.

#### *Dispositivi per misurazione*

- Apparecchi. Campioni: naturali e materiali. Strumenti: analogici e numerali. Rivelatori di zero. Catene per misurazione.
- Caratteristiche metrologiche dei dispositivi per misurazione. Lettura. Incertezza strumentale. Diagramma di taratura. Sensibilità. Risoluzione. Ripetibilità. Stabilità. Isteresi. Classe di precisione. Riferibilità di un dispositivo per misurazione.
- Componenti fondamentali di un dispositivo per misurazione. Trasduttori: sensori e attuatori. Trasduttori elettromeccanici: magnetoelettrici, elettromagnetici, elettrodinamici, elettrostatici, a induzione. Trasduttori elettrotermici. Condizionatori di segnali. Amplificatori di misura. Filtri. Convertitori: c.a.-c.c., corrente e tensione, A / D e D / A. Campionatori. Microprocessori. Processori di segnali. Visualizzatori analogici e numerali. Tubi a raggi catodici.
- Principali strumenti analogici e numerali: amperometri, voltmetri (per valore: istantaneo, medio convenzionale, efficace, massimo), ohmetri, multimetri, wattmetri, contattori d'energia, rivelatori, rivelatori sincroni, trasformatori di misura (TA e TV), registratori, oscillografi generatori di funzioni, analizzatori di segnali, frequenzimetri, strumenti "intelligenti", "strumenti virtuali". Principali dispositivi per confronto: comparometri, potenziometri, ponti, impedenzimetri.
- Sensori: attivi e passivi. Caratteristiche generali. Principali tipi. Sensori integrati e "intelligenti".

#### *Sistemi automatici per misurazione*

- Principali tipi di architetture per acquisizione e distribuzione di dati. Elementi fondamentali: elaboratori, controllori, multiplatori, interfacce, connessioni o bus, protocolli. Norme relative.

#### *Misurazioni sui materiali*

- Misurazioni dei principali parametri magnetici, dielettrici, meccanici, termici, ottici. Misurazioni di: temperatura, umidità, pressione, resistività, permittività,

permeabilità, perdite dielettriche e magnetiche, densità, viscosità, dilatazione, deformazione, durezza. Prove non distruttive.

## ESERCITAZIONI

1. Esercizi su regole di scrittura relative al sistema SI.
2. Esercizi su cifre significative e riporto in diagrammi di risultati di misura.
3. Esercizi su compatibilità di più misure di un parametro nello stesso stato o in stati diversi.
4. Elaborazione di risultati in misurazioni dirette e indirette.
5. Valutazione delle incertezze nelle misurazioni eseguite in laboratorio.
6. Visione sezionata e/o esplosa di campioni materiali e strumenti analogici e numerali.
7. Esame critico di norme su strumenti elettrici e elettronici.
8. Interpretazione critica di manuali d'istruzione, cataloghi e certificati di taratura di strumenti.

## LABORATORIO

1. Rilievo voltamperometrico della caratteristica diretta e inversa di bipoli passivi anomali (diodi).
2. Misurazioni in regime stazionario di resistenze di valore medio.
3. Misurazioni di resistività di materiali conduttori e isolanti.
4. Misurazioni mediante oscillografi analogici a doppia traccia.
5. Misurazioni dei valori caratteristici di grandezze periodiche.
6. Misurazioni di temperatura mediante termoresistori.
7. Misurazioni di deformazioni, forze, spostamenti mediante estensimetri, celle di carico e LVDT (trasformatori differenziali).
8. Gestione automatica di strumentazione mediante elaboratore.
9. Misurazioni dimostrative nei laboratori dei Settori Tempo-Frequenza, Metrologia Elettrica, Fotometria e Acustica dell'Istituto Metrologico Primario IEN.
10. Misurazioni dimostrative nei laboratori Settore Materiali dell'Istituto Metrologico Primario IEN.
11. Misurazioni dimostrative nei laboratori delle Sezioni Lunghezze, Masse-Volumi, Termometrica e Dinamometrica dell'Istituto Primario IMGC.

## BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

E. Arri, S. Sartori, *Le misure di grandezze fisiche*, Paravia, Torino, 1984.

Norma UNI 4546, *Misure e misurazioni. Termini e definizioni fondamentali*, 1984.

Testi ausiliari:

P. Galeotti, *Elementi di probabilità e statistica*, Levrotto e Bella, Torino, 1983.

Norma UNI-CEI, *Guida all'espressione dell'incertezza nelle misurazioni*, 1996.

A. Calcatelli, C. Gentile, M. Ravagnan, *Il Sistema Internazionale di unità di misura. Attuale organizzazione internazionale e nazionale italiana della metrologia*, M.S.M., Torino, 1984.

Norma UNI 10003, *Sistema Internazionale di Unità (SI)*, 1984.

Documenti di aggiornamento sui vari argomenti sono forniti durante le lezioni e le esercitazioni.

### ESAME

L'esame è costituito da:

- una *prova scritta individuale*, in forma di questionario comprendente una serie di domande relative all'intero programma, senza possibilità di consultare libri, documenti o appunti;
- una *prova di laboratorio di gruppo*, consistente nella esecuzione di una misurazione attinente al programma di esercitazioni di laboratorio, integrata da una *discussione orale individuale* sulla misurazione stessa e dall'*esame delle relazioni individuali* sulle esercitazioni di laboratorio.

La valutazione è una media ponderata dei risultati della prova scritta, della prova di laboratorio, della discussione orale e delle relazioni di laboratorio.

**E 166 0****Elementi di meccanica  
teorica e applicata**

Anno: periodo 2:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)  
68+40 (nell'intero periodo)

Docente: Massimo Sorli (collab.: Giuseppe Quaglia)

Il corso fornisce i principali elementi teorici e applicativi della meccanica. Partendo da una serie di richiami sulla cinematica del punto e del corpo rigido introduce i principali accoppiamenti fisici fra gli organi delle macchine, definendo, quindi, la tipologia di forze presenti negli organi delle macchine. Vengono analizzati tipici organi di macchine ad attrito, quali i freni e le frizioni. Vengono quindi descritti i dispositivi per la trasmissione del moto, sia a ingranaggi sia a flessibili. Infine, viene analizzato il comportamento dinamico di sistemi meccanici costituiti da un motore, un elemento di trasmissione ed un utilizzatore, con riferimento a reali condizioni di lavoro.

**REQUISITI**

*Fisica 1.*

**PROGRAMMA**

*Richiami di cinematica.* [8 ore]

Velocità e accelerazione di un punto e di un sistema rigido; centro delle velocità; moti relativi; accelerazione di Coriolis; metodi grafici per la risoluzione dei problemi di cinematica; tipi di legge del moto.

*Accoppiamenti.* [4 ore]

Rotoidale, prismatico, incastro; gradi di libertà. Supporti. Geometria delle masse: baricentri e momenti d'inerzia.

*Statica.* [2 ore]

Vincoli e reazioni vincolari; gradi di libertà di un sistema, equazioni di equilibrio. Applicazioni delle equazioni di equilibrio per la risoluzione dei problemi di statica.

*Dinamica.* [11 ore]

Forze di inerzia, riduzione delle forze di inerzia; equazioni di equilibrio della dinamica; teorema dell'energia; quantità di moto e momento della quantità di moto; sistemi giroscopici; urti.

*Forze agenti negli accoppiamenti.* [6 ore]

Aderenza e attrito, attrito nei perni, impuntamento; attrito volvente.

*Riepilogo e chiarimenti prima dell'accertamento intermedio.* [4 ore]

*Componenti meccanici ad attrito.* [11 ore]

Freni: tipologie costruttive, tipi di accostamento, freni a pattino piano, a ceppi, a disco, a nastro. Innessi a frizione: piani, multidisco, conici.

*La trasmissione del moto.* [12 ore]

Giunti, cinghie, catene, funi, paranchi di sollevamento; ingranaggi cilindrici a denti dritti ed elicoidali, ingranaggi conici a denti dritti, forze scambiate negli ingranaggi; rotismi ad assi fissi, riduzione dei momenti di inerzia; rotismi epicicloidali semplici e

composti; differenziale; vite e madrevite; vite senza fine e ruote elicoidali; vite a circolazione di sfere; forze scambiate nelle viti.

*I sistemi meccanici.* [7 ore]

Accoppiamento tra motori e macchine operatrici (motore e riduttore e carico, motore e frizione e carico); sistemi a regime periodico, grado di irregolarità del volano; sistemi vibranti (oscillazioni libere e forzate).

*Riepilogo e chiarimenti per accertamento finale.* [3 ore]

## ESERCITAZIONI

Nel corso delle esercitazioni vengono svolti esempi illustrativi degli argomenti del corso, con particolare riferimento ad applicazioni pratiche.

Normalmente i testi delle esercitazioni vengono consegnati la volta precedente, in modo che gli allievi possano provare in anticipo la soluzione dei problemi e possano discutere o direttamente esporre la esercitazione in aula.

## BIBLIOGRAFIA

Ferraresi, Raparelli, *Appunti di meccanica applicata*, CLUT, Torino.

Jacazio, Piombo, *Meccanica applicata alle macchine. Vol. I e II*, Levrotto & Bella, Torino.

Jacazio, Piombo, *Esercizi di meccanica applicata alle macchine*, Levrotto & Bella, Torino.

## ESAME

Sono previsti due accertamenti scritti, uno intermedio circa a metà del corso e uno finale al termine delle lezioni. Il superamento dei due accertamenti, con almeno 18/30 per ognuno garantisce il superamento dell'esame, senza la necessità della prova orale. Il mancato superamento di entrambi gli scritti presuppone la prova orale. Coloro che non abbiano superato gli accertamenti (mancata presenza o non idoneità) saranno valutati solo con prova orale. Sia le prove scritte (durante il corso), sia le prove orali verteranno su temi trattati sia a lezione, sia ad esercitazione.

**E 171 0****Elettronica applicata**

Anno: periodo 3:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+3+1 (ore settimanali)

Docente: Maurizio Zamboni

Il corso intende fornire i principi base dell'elettronica con particolare riferimento alle applicazioni dei dispositivi, dei componenti elettronici e dei sistemi elettronici soprattutto in relazione alle loro applicazioni in ambiente industriale.

**REQUISITI**

Sono propedeutiche le nozioni del corso di *Elettrotecnica*.

**PROGRAMMA**

- Richiami di elettrotecnica. Partitore, equivalente di Thévenin e Norton. Calcolo simbolico. Trasformata di Laplace.
- Funzione di rete. Stabilità. Piano di Bode. Decibel. Diagrammi di Bode del modulo e della fase di poli e zeri del primo ordine. Esempi di curva di risposta. Banda passante.
- Definizione del doppio bipolo. Amplificatori ideali di tensione, corrente, transresistenza e transconduttanza. Cascata di doppi bipoli.
- Risposta al transitorio di reti RC. *Tilt* e tempo di salita. Uso dell'onda quadra per lo studio degli amplificatori.
- Introduzione ai semiconduttori. La giunzione *pn*. Caratteristica del diodo. Zona di *breakdown*. Diodo Zener.
- Circuito del diodo per piccolo e grande segnale. Circuiti limitatori e formatori. Voltmetri di cresta. Raddrizzatori ad una e doppia semionda. Ponte di diodi. Regolatori con Zener.
- Comportamento termico dei dispositivi. Transistore bipolare. Funzionamento in linearità, saturazione e interdizione. SOA.
- Polarizzazione del transistore. Modello per piccolo segnale. Stadi CC e CE. Darlington. *Derive*. Amplificatori per alternata e continua.
- Stadio differenziale. *Offset* e *derive*.  $V_{off}$ ,  $I_{bias}$  e  $I_{off}$ . Accenni ai JFET e MOSFET.
- Operazionale. Modello per modo comune e differenziale. *Offset* e *derive*. Amplificatori di tensione e corrente. Effetti della non idealità di  $A_{d1}$ . Impedenza di ingresso ed uscita.
- Amplificatori di transresistenza e di tensione invertente. Sommatore, integratori e derivatori. Amplificatori di transconduttanza e di corrente. Reazione negativa. Stabilità nel dominio del tempo e della frequenza.
- Studio della stabilità in sistemi reazionati. Margine di fase e di guadagno. Calcolo del guadagno. Compensazione a polo dominante e a polo-zero. Considerazione sugli operazionali commerciali.
- Comparatori di soglia senza e con isteresi. Generatori di forme d'onda. Astabile, generatore di onda triangolare e sinusoidale.

- Regolatori di tensione regolabili e fissi. Regolatori a tre terminali (78XX). Alimentatori *switching step-up, step-down e fly-back*.
- Sistemi di acquisizione dati. Teorema del campionamento. Quantizzazione.
- Convertitori DAC. DAC a resistenze pesate. DAC a rete R-2R, potenziometrici, a capacità commutate. Analisi degli errori.
- Convertitori ADC. Caratteristiche ed errori. ADC ad inseguimento, ad approssimazioni successive, *flash*, a singola e doppia rampa.
- *Sample and hold*. Caratteristiche ed errori. Circuiti con due operazionali.
- Segnali logici. Livelli di tensione e di correnti. *Fan out*, compatibilità. Tempo di propagazione. Consumo. Logiche TTL e CMOS.
- Stadi di uscita *totem-pole, open collector e three state*. Blocchi combinatori (MPX, ALU, *decoder, multiplier*). FF-SR. Circuiti sequenziali.
- Circuiti sincroni. FF JK e D. Sincronizzazione ed orologio (*clock*). PET, NET, *latch*. Progetto di contatori, *shift*, macchine a stati.
- (Memorie (ROM, RAM, PROM, EPROM, ...)).

## ESERCITAZIONI

1. Reti elettriche, funzioni di trasferimento.
2. Analisi del transitorio, risposta all'onda quadra.
3. Circuiti con diodi (limitatori, formatori, circuiti di protezione).
4. Circuiti con diodi Zener (regolatori).
5. Operazionali: lettura e commento delle caratteristiche.
6. Operazionali: *offset e derive*, dimensionamento dei componenti esterni.
7. Operazionali: circuiti base (amplificatori, sommatore, filtri).
8. Operazionali: circuiti non lineari (diodo ideale, raddrizzatori).
9. Generatori di forma d'onda.
10. Alimentatore stabilizzato 78xx.
11. Famiglie logiche (lettura caratteristiche, interfacciamento, progetto di circuiti elementari).

## LABORATORIO

1. Uso di alcune apparecchiature elettroniche (oscilloscopio, generatore di segnale, alimentatore).
2. Comportamento di circuiti RC, rivelatori di cresta.
3. Circuiti con operazionali (amplificatori, sommatore, filtri).
4. Famiglie logiche (transcaratteristica, tempi di propagazione, interfacciamento).

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

Non esiste un testo che copra tutti gli argomenti del corso al livello richiesto.

Testi ausiliari:

T.F. Bogart, *Electronic devices and circuits*, Merrill-Macmillan, 1993.

E. Cuniberti [et al.], *Elettronica : componenti e tecniche circuitali*, Petrini, 1993.

J. Millman, A. Grabel, *Microelectronics*, McGraw-Hill, 1987.

**ESAME**

Prova scritta di 40 minuti relativa a semplici progetti usando le metodologie studiate ad esercitazione. Prova orale sulla teoria.

Anno:periodo 2:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)  
72+48 (nell'intero periodo)

Docente: Vito Daniele

Il corso si propone di fornire le nozioni di base dell'elettrotecnica indispensabili per una corretta utilizzazione delle macchine e degli impianti elettrici, tenendo anche conto dei problemi relativi alla sicurezza. A tale scopo, vengono esposti i fondamenti dell'analisi delle reti di bipoli lineari in regime stazionario e quasistazionario e sono richiamati alcuni aspetti fondamentali della teoria dei campi necessari per la comprensione del funzionamento dei componenti dei sistemi elettrici. La teoria e i modelli sviluppati nella prima parte del corso sono infine applicati allo studio delle più comuni macchine elettriche e degli impianti di distribuzione dell'energia elettrica.

#### REQUISITI

*Analisi Matematica 1 e 2, Fisica 1 e 2, Geometria.*

#### PROGRAMMA

*Prima parte: circuiti.*

Multipoli e modello circuitale dei fenomeni elettromagnetici, regimi di funzionamento, metodo simbolico. [8 ore]

Grandezze elettriche e loro proprietà, classificazione dei componenti ideali, considerazioni energetiche sui componenti ideali, connessioni tra i componenti. [12 ore]

Metodi di analisi dei circuiti elettrici in regime permanente, trasformazioni energetiche nei circuiti. [8 ore]

Circuiti in regime transitorio, transienti del primo e del secondo ordine. [4 ore]

Sistema trifase, definizioni, metodi di soluzione di circuiti trifase equilibrati e squilibrati, misura della potenza. [6 ore]

*Seconda parte: campi.*

Richiami sui campi vettoriali e sulle loro proprietà, equazioni di Maxwell, campo di corrente statico, leggi fondamentali dei circuiti in forma locale. [4 ore]

Dispensori e impianti di terra, cenni sulle normative antinfortunistiche, dimensionamento e protezione dei conduttori. [4 ore]

Campo elettrostatico, capacità e rigidità dielettrica, campo elettrico quasistazionario, corrente di spostamento. [2 ore]

Campo magnetico statico e quasistazionario, proprietà dei materiali ferromagnetici, circuiti magnetici, relè differenziale, auto- e mutue induttanze, generalizzazione del potenziale elettrico e forze elettromotrici indotte. [6 ore]

Energia magnetica, perdite nel ferro, conversione elettromeccanica dell'energia, elettromagneti, motori a riluttanza passo-passo. [6 ore]

*Terza parte: macchine elettriche.*

Trasformatore ideale, trasformatore reale e circuito equivalente, prove sul trasformatore, trasformatore trifase, parallelo di trasformatori, cenni su autotrasformatore e trasformatori di misura. [8 ore]

Campo magnetico rotante, motore asincrono trifase e circuito equivalente, prove sui motori asincroni, avviamento e regolazione della velocità nei motori asincroni, macchina a induzione, motore asincrono monofase. [6 ore]

Macchina elettrica a corrente continua, tipologie di eccitazione e circuiti equivalenti, commutazione, motori *brushless*. [4 ore]

Cenni sul generatore sincrono. [2 ore]

## ESERCITAZIONI

1. Analisi dei circuiti in regime stazionario e quasistazionario. [12 ore]

2. Campi di corrente, elettrici e magnetici. [6 ore]

3. Macchine elettriche. [8 ore]

## BIBLIOGRAFIA

Testo di supporto:

P.P. Civalleri, *Elettrotecnica*, Levrotto & Bella, Torino.

Testi per approfondimenti:

V. Daniele, A. Liberatore, R. Graglia, S. Manetti, *Elettrotecnica*, Monduzzi, Bologna.

A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, A. Kusko, *Macchine elettriche*, Angeli, Milano.

## ESAME

L'esame è composto da una prova scritta e da un colloquio. La prova scritta richiede la soluzione di tre problemi relativi ad argomenti svolti durante il corso; durante tale prova è consentita la consultazione di testi ed appunti.

Il superamento della prova scritta è vincolante per l'ammissione al colloquio orale, che deve essere sostenuto nell'ambito dello stesso appello.

Per partecipare all'esame è necessario effettuare la prenotazione consegnando lo statino. Durante il corso vengono svolti due compiti scritti riservati agli iscritti regolari per ottenere l'esonero dalla prova scritta.

**E 190 1****Fisica 1**

Anno: periodo 1:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2+2 (ore settimanali)

Docente: Elio Miraldi (collab.: Giorgio Kaniadakis)

Il corso si propone di fornire allo studente le nozioni fondamentali necessarie alla comprensione di alcuni aspetti della fisica classica e della meccanica relativistica. In particolare il corso inizia dalla definizione delle unità di misura del Sistema Internazionale, fa uso delle equazioni dimensionali e introduce grandezze scalari e vettoriali, servendosi degli strumenti matematici dell'analisi differenziale e della geometria analitica.

Rispetto ai programmi tradizionali delle altre università italiane, il Politecnico di Torino ha deciso di posporre al corso di *Fisica 2* la termodinamica, e di porre al primo anno i fondamenti dell'elettrostatica nel vuoto e dell'ottica geometrica. Questo permette di trattare i campi di velocità e i campi di forza statici con lo stesso formalismo e di introdurre lo studente all'uso degli operatori vettoriali.

**REQUISITI**

Il corso fa uso dell'analisi infinitesimale, in particolare degli operatori di derivazione totale e parziale e degli integrali, anche di linea e di superficie. È necessario quindi che lo studente abbia seguito il corso di *Analisi 1* e possieda un minimo di dimestichezza con l'algebra e la trigonometria.

**PROGRAMMA**

*Unità di misura ed equazioni dimensionali.* Il corso inizia con la definizione delle unità fondamentali di misura nel Sistema Internazionale, mettendone in luce i legami con gli aspetti e i problemi più attuali della fisica e della tecnologia. Si introducono le equazioni dimensionali, facendone cogliere l'utilità con alcuni esempi. Si introducono le esperienze di laboratorio che gli studenti potranno eseguire personalmente, facendo particolare riguardo, in questa fase introduttiva, all'analisi dei dati sperimentali, discutendo il metodo dei minimi quadrati e il metodo di interpolazione lineare.

*Cinematica del punto.* In questa parte del corso si cerca di richiamare nozioni già note allo studente, come velocità e accelerazione media ed istantanea in un sistema di riferimento inerziale, fondandole sulle proprietà geometriche delle curve nello spazio. In particolare si pongono le basi della relatività galileiana e della relatività ristretta studiando il moto di un punto in due sistemi di riferimento in moto relativo, anche rototraslatorio, discutendo in dettaglio le varie componenti dell'accelerazione dovute proprio al sistema di riferimento non inerziale.

*Dinamica del punto materiale.* Viene richiamata la grandezza massa di un punto materiale e si introduce la forza come causa dell'accelerazione del corpo, si introducono cioè i tre principi della dinamica newtoniana. Accanto ai *Gedankenexperimenten* necessari allo scopo viene introdotta la legge di Hook, cioè il dinamometro, per la misura statica delle forze. Si dà risalto all'equivalenza tra la massa inerziale e quella gravitazionale e si sottolinea la covarianza delle leggi della dinamica in sistemi di riferimento inerziali contro l'insorgenza di forze d'inerzia o forze fittizie in quelli non inerziali. Vengono descritte le leggi empiriche dell'attrito nei suoi vari aspetti: viscoso, radente tra superfici

a contatto, volvente. Una serie di esempi viene usata per descrivere il moto di un punto in presenza delle forze d'attrito, con particolare riguardo alla velocità limite e allo spazio di frenata. Vengono inoltre studiate le diverse traiettorie di un punto materiale viste in un sistema di riferimento inerziale o non inerziale.

*Lavoro di una forza.* Viene introdotto il campo di forze e definita la grandezza lavoro, cercando con esempi di evidenziare il concetto di integrale di linea. Viene dimostrato ed evidenziato il teorema dell'energia cinetica, che, oltre ad introdurre la grandezza fisica energia cinetica di un corpo, permette di approfondire aspetti già noti di dinamica del punto.

*Campi di forza conservativi.* Vengono descritte le proprietà di un campo di forze per il quale l'integrale di linea non dipenda dalla traiettoria ma solo dagli estremi. Si introduce quindi la grandezza energia potenziale e viene dimostrato il teorema di conservazione dell'energia meccanica, ed enunciato e commentato il principio di conservazione dell'energia.

*Oscillazioni unidimensionali.* Come primo esempio di campo di forze conservativo viene studiato il campo elastico del sistema massa-molla e descritte le oscillazioni unidimensionali partendo dalla conservazione dell'energia meccanica. Vengono studiate inoltre le oscillazioni in presenza di una forza di attrito viscoso e introdotta e valutata la potenza media persa in un periodo, così come le oscillazioni in presenza di una forza esterna sinusoidale forzante. Vengono descritte le oscillazioni forzate, sia a ridosso che lontano dalla frequenza di risonanza. Viene descritto il pendolo semplice sia per le piccole che per le grandi oscillazioni.

*Teoria di relatività ristretta.* Viene introdotta la teoria di relatività ristretta partendo dalla omogeneità e dalla isotropia dello spazio-tempo, cioè si scrivono le formule di cambiamento da un sistema inerziale ad un altro in moto rettilineo uniforme rispetto al precedente imponendo la sola interdipendenza delle coordinate spazio-temporali. Le formule ricavate dipendono da un parametro avente le dimensioni di una velocità con il significato fisico di velocità di trasporto del segnale. Imponendo uguale ad infinito il valore di questo parametro si ottengono le formule di relatività galileiana, mentre se lo si pone uguale alla velocità della luce si ottengono le formule di Einstein.

*Meccanica dei fluidi.* Viene descritto il campo di velocità per il moto stazionario di un fluido ideale e si introducono gli operatori vettoriali gradiente, divergenza e rotore per descrivere il moto e le proprietà del fluido stesso. Con il teorema dell'energia cinetica viene ricavata l'equazione di Bernoulli e ne vengono commentate le principali applicazioni pratiche. Vengono anche ricavate in modo a sé stante e dedotte dall'equazione di Bernoulli le equazioni di Stevino e di Archimede per la statica dei fluidi.

*Dinamica dei sistemi.* Si enunciano le grandezze fisiche necessarie alla descrizione del moto di un sistema di punti materiali, momento di una forza, momento d'inerzia, momento angolare, e se ne ricavano le principali proprietà. Viene dimostrato il teorema di Koenig e sono ricavate le equazioni del moto di un sistema di massa variabile, cioè del razzo e del nastro trasportatore.

*Fenomeni d'urto.* Viene descritta l'interazione tra due corpi detta urto. Si ricava il teorema dell'impulso quantità di moto e si ricava la conservazione di quest'ultima grandezza nell'urto. Si studiano sia gli urti con conservazione dell'energia cinetica che quelli anelastici. L'urto anelastico viene usato per la descrizione delle forze impulsive nel caso di un pendolo balistico.

*Gravitazione universale.* Vengono descritte le equazioni del campo gravitazionale nell'ipotesi newtoniana e ricavata l'espressione dell'energia potenziale e del potenziale gravitazionale. Si effettua l'estensione dal campo di un corpo puntiforme ad uno avente la simmetria sferica, anche facendo uso del teorema di Gauss, e vengono dedotte le tre leggi di Keplero. Vengono fatti numerosi esempi sul moto di satelliti artificiali.

*Elettrostatica nel vuoto.* Viene introdotta la legge di Coulomb e ricavate le equazioni del campo e del potenziale elettrostatico, mettendo in risalto analogie e differenze con il campo gravitazionale. Vengono ricavate le equazioni del campo e del potenziale per un dipolo elettrico. Si usa la legge di Gauss per il calcolo del campo e del potenziale in condizioni di simmetria, come per il calcolo di capacità di condensatori nel vuoto. Si arriva all'espressione dell'energia immagazzinata in un conduttore carico e all'energia di un campo elettrico.

*Onde, ottica geometrica.* Viene ricavata l'equazione di un'onda che si propaga in un mezzo elastico e per il caso armonico vengono enunciate le grandezze caratteristiche. Nel caso dell'onda luminosa si introducono le leggi di Snell che vengono applicate per descrivere la deviazione di un prisma e per ricavare le equazioni dello specchio sferico e della lente sottile nell'approssimazione parassiale.

## ESERCITAZIONI

Le esercitazioni vengono svolte il più possibile a ridosso delle lezioni e riguardano l'argomento svolto nelle lezioni stesse. È quindi lo stesso docente che ha svolto uno degli argomenti del corso a svolgere e commentare esercizi durante la lezione e nelle ore di esercitazione della settimana corrispondente.

## LABORATORIO

Il corso prevede la partecipazione dello studente a tre esperienze di laboratorio in un apposito locale del Dipartimento di Fisica, con l'assistenza del collaboratore e di borsisti. Due delle esperienze sono assistite dal *computer*. Nella prima viene effettuata la verifica sperimentale della legge di caduta di un grave, e viene ricavata l'accelerazione di gravità. Nella seconda si misura il periodo di oscillazione di un pendolo semplice sia nel caso delle piccole oscillazioni, in funzione della lunghezza del filo di sospensione, che a parità di lunghezza in funzione dell'ampiezza delle oscillazioni stesse. In queste due esperienze il *computer* misura gli intervalli di tempo con una precisione del decimillesimo di secondo e porge interattivamente allo studente domande sul valore dei parametri necessari all'interpolazione dei dati sperimentali da lui ottenuti. La terza esperienza riguarda la misura dell'indice di rifrazione di una sostanza trasparente foggiate a prisma, che viene effettuata in modo indiretto attraverso la misura dell'angolo di deviazione minima e dell'angolo diedro del prisma stesso.

## BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

R. Resnick, D. Halliday, K.S. Krane, *Fisica 1 e Fisica 2*, ed. ital. a cura di S. Lo Russo, G. Mazzi, L. Taffara, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1993.

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*, ed. ital. a cura di L. Cicala, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1995.

Testi ausiliari:

C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica. Vol. 1 e 2*, Liguori, Napoli, 1987.

A. Tartaglia, *Elettromagnetismo e ottica*, Levrotto & Bella, Torino, 1986.

R. Resnick, *Introduzione alla relatività ristretta*, CEA, Milano, 1969.

C. Kittel [et al.], *La fisica di Berkeley*, Zanichelli, Bologna, 1970.

R.P. Feynmann, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynmann*, Addison-Wesley, Malta, 1970.

## ESAME

L'esame consta di una prova scritta, consistente nella soluzione di tre esercizi sulla meccanica del punto o dei sistemi, sulla meccanica dei fluidi o sulla gravitazione universale, sull'elettrostatica nel vuoto, e in una prova orale. La prova scritta non costituisce uno sbarramento alla prova orale, che può essere sostenuta qualunque sia il voto riportato allo scritto, bensì uno strumento utile all'allievo per conoscere le proprie effettive capacità e conoscenze in campo fisico. Non sono effettuati sconti sul programma, pre-appelli o post-appelli rispetto alle date affisse in precedenza, ne sono ammesse rateizzazioni dell'esame in appelli diversi.

Anno: periodo 2:1

Docente: Bruno Minetti

Il corso riguarda la trattazione dell'elettromagnetismo classico fino all'enunciazione delle equazioni di Maxwell, alla deduzione e soluzione dell'equazione di D'Alembert per la propagazione di onde piane. Comprende una trattazione a livello elementare dei fenomeni di interferenza, diffrazione, e propagazione dell'onda in mezzi anisotropi.

A seguito di un rapido cenno all'analisi di Fourier, viene dedotto il concetto di pacchetto d'onda, sua ampiezza e durata e da qui viene tratto spunto per l'enunciazione dei principi di indeterminazione di Heisenberg. Seguirà una descrizione dei fondamenti sperimentali su cui si basa la dualità onda – corpuscolo.

Si enunciano i principi fondamentali della termodinamica classica, e il significato dei principali potenziali termodinamici. Attraverso il concetto di probabilità termodinamica e di funzione di partizione si arriva alla definizione statistica dei potenziali termodinamici fondamentali.

*Per orientarsi sul programma.* È stato consegnato a lezione, ai rappresentanti del corso, un programma "preventivo", suddiviso in possibili argomenti d'esame e con i riferimenti ai testi. A fine corso, questo programma "preventivo" da considerarsi di appoggio e di orientamento, sarà sostituito da un programma "consuntivo".

## PROGRAMMA

Questo programma non è organizzato per argomenti successivi ma è strutturato in argomenti o "tesi", ciascuna delle quali può essere oggetto di una domanda d'esame nella disciplina specifica).

### *Elettromagnetismo.*

- Campo elettrico e potenziale elettrico. Energia potenziale e lavoro del campo. Relazione tra campo e potenziale nel vuoto e nella materia. [Rif.: Amaldi et al., 3 e 4].
- Il teorema di Gauss. Forma integrale e forma differenziale nel vuoto [3.11], nella materia [4.12].
- Dipolo elettrico statico; definizione di momento di dipolo [3.17] solo definizione; potenziale e campo generati da un dipolo [3.16]; energia di un dipolo in un campo esterno [3.16, 3.19]; azioni meccaniche su di un dipolo nel caso di campo uniforme e non [3.19]. Dipolo elettrico "dinamico" [12.3].
- Dielettrici [4.11]. Vettore intensità di polarizzazione  $\mathbf{P}$ ; cariche legate e campo elettrico risultante nello *slab*. Relazione tra densità di carica legata e  $\mathbf{P}$  in sostanze uniformemente polarizzate e non. Significato della  $\text{div } \mathbf{P}$ .
- Relazione tra  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{D}$  [4.12]. Prima equazione di Maxwell. Costante dielettrica e suscettività dielettrica [4.13].
- Passaggio da un dielettrico ad un altro [4.16]. Misurazioni dei vettori  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{D}$  [4.17]. Esempio del condensatore piano con due dielettrici [4.18]. Rigidità dielettrica [4.18].
- Energia elettrostatica di un condensatore e densità di energia del campo elettrico (verifica della validità della formula) [3.30]. Misura della  $\epsilon_0$  [4.19].

- La corrente elettrica [5.1]. Intensità di corrente [5.1]. Vettore densità di corrente  $\mathbf{J}$ , sua relazione con la velocità media dei portatori [5.1]. Legge di Ohm microscopica [5.5]. Equazione di continuità della carica nei casi stazionari e non [5.2].
- Resistenza ohmica [5.3]. Forza elettromotrice [5.8]. Resistenza in serie e parallelo. Inserzione di voltmetro e amperometro. Legge di Ohm generalizzata. Resistenza interna di un generatore. Ponte di Wheatstone. Sensibilità di uno strumento. Errore di una misurazione diretta e indiretta [da laboratorio].
- Il vettore  $\mathbf{B}$  [6.4]. Forza di Lorentz su una carica in moto [6.5]. Forza su un elemento di circuito percorso da corrente [6.4]. Passaggio dall'una all'altra espressione della forza [6.5]. Seconda legge di Laplace [6.4].
- Azioni meccaniche di un campo su una spira [6.20.1]. Momento magnetico di una spira. Energia del dipolo magnetico. Dipolo magnetico in campo magnetico non uniforme.
- Campo generato da una corrente. Prima legge di Laplace [6.7]. Legge della circuitazione di Ampère [6.12]. Esempificazione della loro equivalenza (caso del filo rettilineo indefinito). Campo generato da una spira [6.9]. La divergenza di  $\mathbf{B}$ : seconda equazione di Maxwell [6.11]. Introduzione formale di  $\mathbf{H}_0$  [6.13].
- Quarta equazione di Maxwell nel caso stazionario nel vuoto [6.12]. Quarta equazione di Maxwell nel caso non stazionario. Corrente di spostamento [9.1]. Interazione tra correnti rettilinee: definizione dell'Ampere [6.10].
- Correnti atomiche e momento magnetico di un atomo [7.5]. Magnetone di Bohr. Teorema di Larmor [7.6]. Aspetti microscopici di para-, dia- e ferromagnetici [7.3]. La polarizzazione magnetica [7.2].
- Aspetti macroscopici di dia- e paramagnetici [7.9]. Il vettore  $\mathbf{M}$  [7.10]. Il vettore  $\mathbf{H}$  nella materia. Teorema della circuitazione di Ampère nel caso delle "correnti legate". Relazioni tra  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$ . Suscettività e permeabilità,  $\mu_r$ , nei para- e diamagnetici [7.12].
- Il ferromagnetismo [7.12.3]. Aspetti microscopici e macroscopici. Relazione tra  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{M}$ . Dipendenza della suscettività magnetica e permeabilità magnetica dal campo magnetizzante. Ciclo di magnetizzazione; elementi per il progetto di un elettromagnete [7.15-17].
- La legge dell'induzione magnetica [8.2]. Enunciazione secondo Faraday-Neumann [8.3]. Deduzione della legge dall'esistenza della forza di Lorentz. Terza equazione di Maxwell. *F.e.m.* come lavoro di un campo elettromotore. Flusso tagliato e flusso concatenato [8.4].
- Autoinduzione [8.6]. Mutua induzione. Extra-correnti di chiusura e apertura in un circuito induttivo. Carica e scarica di un condensatore.
- Energia del campo magnetico [8.7]. Densità di energia. Dimostrazione della validità della formula nel caso particolare del filo coassiale. Bilancio energetico in circuiti RC e RL.
- Circuiti R, L, C in alternata [8.9-10]. Oscillazioni forzate. Oscillazioni smorzate. Risonanza [appunti distribuiti].
- Le quattro equazioni di Maxwell [9.2]. Il teorema di Poynting [9.5]. Vettore di Poynting: suo significato e sua definizione come grandezza dimensionata.
- Onda piana polarizzata linearmente [9.3, 1 e 2]. Equazione dell'onda di D'Alembert: sua deduzione dalle equazioni di Maxwell. Soluzione generale dell'equazione: onda progressiva e regressiva. Rapporto tra i moduli di  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ . Velocità della luce nel vuoto.

- Onda piana polarizzata linearmente e sinusoidale [9.3.3]. Sua importanza in rapporto all'analisi di Fourier [8.1]. Relazione di dispersione. Intensità di una radiazione [9.3.4].
- Battimenti tra due oscillazioni di eguale ampiezza e frequenze vicine; somme di due onde con pulsazioni e numeri d'onda prossimi [appunti distribuiti]. Velocità di modulazione. Velocità di gruppo e velocità di fase. Pacchetti d'onda; spettro di Fourier di un pacchetto d'onda; principio di indeterminazione tempo – energia [12.7.8].
- Interazione onda – materia: indice di rifrazione complesso, costante  $\epsilon_r$ , e polarizzabilità atomica: legame [12.3]. Assorbimento nei dielettrici.
- Assorbimento nei metalli [12.6]. Caso delle basse frequenze. Caso delle alte frequenze.
- Il sistema internazionale da elaborazione personale (sulla base degli argomenti precedentemente trattati).  $\epsilon_0$ : sua equazione dimensionale.  $\mu_0$ : sua equazione dimensionale. Velocità della luce.
- Dalle equazioni di Maxwell al teorema di Poynting, alle equazioni di D'Alembert (da elaborazione personale sulla base degli argomenti precedentemente trattati) da elaborazione personale. Enunciazione dei contenuti delle equazioni di Maxwell.
- Corda continua [appunti distribuiti]. Dipendenza della velocità dalla tensione della fune e dalla densità lineare della fune. Quantizzazione delle lunghezze d'onda.

#### Ottica.

- Interferenza: definizione generale [14]. Sorgenti coerenti e incoerenti. Interferenza tra onde prodotte da due sorgenti coerenti: a) intensità media dell'onda risultante quando le sorgenti non sono coerenti, b) interferenza costruttiva e distruttiva.
- Metodo per osservare l'interferenza [14.1]. Interferenza in lamine sottili [14.2].
- Principio di Huyghens – Fresnel. Diffrazione: definizione generale. Diffrazione da una fenditura rettangolare indefinita e interpretazione fenomeno diffrazione [appunti distribuiti].
- Reticolo di diffrazione [appunti distribuiti]. Diffrattometro. Misura della lunghezza d'onda. Collimatore. Cannocchiale. Errore nella misurazione di  $\lambda$  [laboratorio].
- Propagazione della luce nei mezzi anisotropi [16.1]. Ellissoide degli indici [16.2-3]. Prisma di Nicol [16.4]. Lamina a quarto d'onda [16.4].

#### Termodinamica.

- Termoscopio, termometro, scala centigrada, termometro a gas, temperatura assoluta, temperatura termodinamica [Rif.: Lovera et al., I, II].
- Il calore: suo significato fisico e sua misura [III]. Propagazione del calore. conduzione e convezione [III.5]. Capacità termica e calore specifico. Calorimetro isoterma e adiabatico.
- Gas perfetti [II.4]. Teoria cinetica dei gas [II.5, II.7]. Gas reali [II.10]. Cambiamenti di stato [II.14].
- Trasformazioni termodinamiche [III.6,-8]. Enunciazione del primo principio della termodinamica in forma differenziale.
- Dimostrazione sperimentale dell'equivalenza tra lavoro e calore ed espressione integrale del primo principio [III.9-10, III.12]. Energia interna.
- Calori specifici a volume costante e a pressione costante: loro relazione [III.12-13].  $C_p$ ,  $C_v$  per gas "perfetti" monoatomici e biatomici.

- Ciclo di Carnot [IV.1-8]. Rendimento ciclo di Carnot. Enunciazione del secondo principio della termodinamica. Enunciazione del teorema di Carnot. Temperatura termodinamica.
  - Enunciazione del secondo principio della termodinamica: enunciati di Clausius e di Kelvin, loro equivalenza. Teorema di Carnot [IV.4].
  - Enunciazione del teorema di Clausius in trasformazioni reversibili. Variazione di entropia: sistema isolato. Universo termodinamico [IV.7-9]. Entropia e reversibilità. Entropia e irreversibilità. Variazioni di entropia dell'universo in seguito a trasformazioni naturali [IV.13].
- Meccanica statistica.*
- Discretizzazione dei livelli in un sistema confinato. Probabilità termodinamica e distribuzione di equilibrio: funzione di partizione. Equipartizione dell'energia; interpretazione statistica di lavoro e calore. Entropia e disordine. Entropia e informazione [appunti distribuiti].

## BIBLIOGRAFIA

- E. Amaldi, R. Bizzarri, G. Pizzella, *Fisica generale (elettromagnetismo, relatività, ottica)*, Zanichelli.
- Lovera, Malvano, Minetti, Pasquarelli, *Calore e termodinamica*, Levrotto & Bella, Torino.

## ESAME

La prova d'esame consta di una prova scritta e una orale. Le due prove debbono considerarsi un tutto unico e si integrano a vicenda.

La prova scritta ha validità solo se superata con almeno 15 punti su 30.

Immediatamente dopo la fine del corso avrà luogo una prova scritta "di esonero" con validità un anno accademico.

In ogni appello d'esame verrà proposta una prova scritta che potrà talvolta essere individuale o a piccoli gruppi (nelle sessioni in cui si presentino particolari difficoltà nel reperimento spazi per esami).

In un dato appello la prova orale può seguire immediatamente nel tempo la prova scritta, senza soluzione di continuità. Se uno studente desidera separare nel tempo prova scritta e prova orale può farlo nel senso che la validità della prova scritta, una volta superata, è estesa a tutta la sessione.

*Avviso importante.* Non è richiesta prenotazione per l'esame, ma chiunque voglia sostenere l'esame scritto o orale in corrispondenza di un dato appello d'esame deve presentare lo statino all'ora fissata per l'appello stesso e cioè prima dell'inizio della prova scritta, anche se il candidato è da questa esonerato.

Per evidenti esigenze organizzative, chi non avrà presentato lo statino al momento fissato in bacheca per l'inizio dell'appello o comunque al massimo entro la prima mezz'ora (in caso di ritardi indipendenti dalla volontà del candidato) non potrà essere ammesso a sostenere le prove.

**E 206 0****Fisica tecnica**

Anno: periodo 3:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali)  
60+40+4 (nell'intero periodo)

Docente: Michele Cali Quaglia

Nella prima parte del corso si studiano i fondamenti e le definizioni della teoria della termodinamica elementare riferita ai corpi omogenei e si introducono il primo ed il secondo principio. Si studiano quindi in dettaglio dal punto di vista funzionale e fenomenologico i più importanti dispositivi di conversione energetica e le applicazioni fondamentali. Nella seconda parte del corso, dopo aver dato alcuni cenni di termodinamica dei corpi continui, si sviluppano le leggi fondamentali della trasmissione del calore per conduzione, convezione ed irraggiamento e si studiano i principali dispositivi termotecnici, come gli scambiatori di calore e i generatori di calore. Nell'ultima parte del corso si introducono i concetti fondamentali della illuminotecnica.

**REQUISITI**

*Analisi matematica 1 e 2. Fisica 1 e 2.*

**PROGRAMMA***1. Termodinamica.*

Scopo della termodinamica e cenni storici.

Definizioni (tempo, sistema, ambiente esterno, processo, stato termodinamico, spazio degli stati, linee di trasformazione, processi diretti ed inversi, processi ciclici).

Equazioni di stato.

La termometria.

Il lavoro in generale e nei sistemi aperti.

Il calore e la calorimetria.

Equazioni fondamentali; le trasformazioni adiabatiche.

Il primo principio della termodinamica.

Energia interna ed entalpia.

I sistemi aperti.

Il secondo principio.

Cenni storici.

Il rendimento delle macchine termiche.

Reversibilità, teorema di Carnot, temperatura assoluta, equazione di Clapeyron, entropia, rendimento massimo di un ciclo.

La funzione di accumulazione.

La formulazione generale ed il teorema della diseuguaglianza di accumulazione.

La diseuguaglianza di Planck.

Entropia.

Cenni di energetica.

Il teorema dell'energia utilizzabile o exergia e il rendimento generalizzato.

Relazioni analitiche della termodinamica.

Le trasformazioni fondamentali.

I potenziali termodinamici.  
 Le equazioni di Maxwell.  
 Le trasformazioni iso-energetica di Joule e iso-entalpica di Joule-Thompson.  
 Le equazioni di stato dei fluidi reali.  
 La legge degli stati corrispondenti.  
 I cambiamenti di stato.  
 Rappresentazioni e diagrammi termodinamici.  
 Le equazioni empiriche (Van der Waals, Dieterici, ecc.); equazione del viriale.  
 I fenomeni di attrito viscoso.  
 I cicli ideali dei motori a gas.  
 Cicli rigenerativi di Stirling e di Ericsson.  
 Cicli Otto, Diesel, Brayton e Joule.  
 I cicli dei motori a vapore.  
 I cicli termodinamici Rankine e Hirn e l'analisi del rendimento.  
 Le centrali termoelettriche.  
 Gli impianti di cogenerazione.  
 Le macchine operatrici.  
 Frigoriferi e pompe di calore.  
 Cicli inversi di Carnot.  
 Cicli a vapore semplici e multistadio.  
 Le macchine criogeniche.  
 Miscele di gas e sostanze condensabili.  
 Psicrometria.  
 Le trasformazioni delle macchine per la climatizzazione ambientale.

2. *Cenni di termodinamica dei sistemi continui.*  
 Definizioni e proprietà matematiche.  
 Le equazioni fondamentali di conservazione in forma differenziale ed integrale.  
 Massa, quantità di moto, energia ed entropia.

3. *Trasmissione del calore e termocinetica.*  
 La conduzione del calore.  
 Le equazioni fondamentali nello spazio tridimensionale.  
 Le proprietà termiche dei materiali.  
 La soluzione di problemi semplici con metodi analitici.  
 I metodi numerici: differenze finite, volumi di controllo, elementi finiti.  
 Applicazioni: le equazioni e l'efficienza delle alette.  
 Applicazioni: gli effetti termoelettrici (Seebeck, Peltier, Thomson).  
 Il moto dei fluidi isotermi.  
 Viscosità.  
 Regimi di moto laminare e turbolento.  
 Strato limite delle velocità.  
 Attrito sulle lastre piane e nei condotti.  
 Efflussi di Fanno e Raleygh.  
 Efflusso attraverso gli ugelli convergenti e divergenti.  
 Le equazioni per i fluidi viscosi.  
 Equazioni di Navier-Stokes.  
 La convezione forzata e naturale.  
 I metodi delle analogie.

Teoria dimensionale.

Le relazioni empiriche più comuni.

L'irraggiamento.

Definizioni.

Il corpo nero.

Le proprietà emissive della materia ed i corpi grigi; irraggiamento tra corpi neri e grigi.

L'utilizzazione dell'energia solare.

#### 4. Termotecnica.

I camini.

Gli scambiatori di calore.

Cenni ai problemi della climatizzazione ambientale.

Gli impianti di riscaldamento e condizionamento.

La normativa vigente:

#### 5. Illuminotecnica.

Grandezze energetiche e fotometriche.

La sensazione visiva.

Il triangolo dei colori.

Sorgenti luminose anaturali ed artificiali.

Calcoli di illuminamento da sorgenti puntiformi ed estese in superficie.

## ESERCITAZIONI

Esercizi svolti in aula sui temi trattati a lezione e sviluppo di una monografia di termodinamica sul calcolo completo del ciclo termodinamici e del bilancio energetico di una centrale di cogenerazione a vapore con ciclo Rankine in contropressione. Sviluppo di una monografia di termocinetica sul calcolo fluidodinamico e termico di un generatore di vapore a tubi di fumo.

## LABORATORIO

Misure di temperatura con diversi sensori.

Misura di grandezze psicrometriche in un ambiente.

Misura della portata di aria in un condotto.

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

Appunti delle lezioni e materiale distribuito dal docente.

Testi ausiliari:

C. Boffa, P. Gregorio, *Elementi di fisica tecnica*, Levrotto e Bella, Torino, 1974.

C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, *Trasmissione del calore*, CLEUP, Padova, 1985.

P. Brunelli, C. Codegone, *Trattato di fisica tecnica*, Giorgio, Torino, 1974.

A. Cavallini, L. Mattarolo, *Termodinamica applicata*, CLEUP, Padova, 1990.

V.A. Kirillin, V.V. Sycev, E. Sejdlin, *Termodinamica tecnica*, Ed. Riuniti, Roma, 1980.

M.W. Zemansky, M.M. Abbott, H.C. Van Ness, *Fondamenti di termodinamica per ingegneri*, Zanichelli, Bologna.

#### ESAME

L'esame è costituito da un compito scritto, nel quale si chiede di svolgere esercizi numerici e di rispondere a semplici quesiti di teoria, e da un colloquio orale, durante il quale l'allievo è tenuto a presentare ed illustrare le monografie svolte durante le esercitazioni e a rispondere su argomenti di teoria.

**E 217 0****Fondamenti di informatica**

Anno: periodo 1:2

Docente: *da nominare*

Il corso intende presentare i fondamenti dell'informatica, con lo scopo di chiarirne i principi teorici per permettere una corretta valutazione delle possibilità applicative degli elaboratori elettronici. Ci si prefigge inoltre di fare acquisire agli allievi una discreta "manualità" nell'uso degli elaboratori, attraverso l'impiego di strumenti di produttività individuali e di un linguaggio di programmazione. Il corso è propedeutico ai corsi specialistici di informatica; inoltre fornisce le basi per molti corsi di carattere matematico-fisico che richiedono l'uso del calcolatore per le esercitazioni e lo sviluppo di casi di studio.

**REQUISITI**

Non esiste nessuna propedeuticità specifica in termini di esami, ma è utile avere buone basi matematiche ed attitudine al ragionamento.

**PROGRAMMA***Cenni storici* [2 ore]

Evoluzione del calcolo automatico: breve storia dei calcolatori meccanici, elettromeccanici ed elettronici.

*Codifica dell'informazione* [10 ore]

Sistemi di numerazione (in particolare il sistema binario); numeri relativi (codifica in modulo e segno ed in complemento a due); numeri frazionari (problemi di approssimazione; codifica *fixed point* e *floating point*; lo *standard* IEEE-754); codifica BCD; operazioni aritmetiche in binario puro ed in complemento a due; errori di *overflow* e di *underflow*; informazioni non numeriche (codici binari, codice ASCII); protezione dell'informazione dagli errori casuali (codici a rivelazione ed a correzione d'errore).

*Logica booleana* [4 ore]

Variabili booleane, operatori logici (*and*, *or*, *not*, *exor*), tavola di verità, teoremi booleani, minimizzazione di espressioni logiche.

*Tecnologia elettronica* [4 ore]

Transistori, porte logiche, circuiti combinatori, *flip-flop*. Circuiti sequenziali, registri; tecnologie elettroniche (MOS, bipolari, circuiti integrati).

*Architettura degli elaboratori elettronici* [8 ore]

Unità di *input* (*buffer*, ADC; tastiera, *mouse*, *scanner*, tavoletta grafica); unità di *output* (*buffer*; video, stampanti, *plotter*); unità operativa (ALU, registri, *flag*); memoria (indirizzamento, RAM, ROM; *floppy disk*, *hard disk*, CD-ROM; nastri magnetici, QIC, DAT); unità di controllo (*program counter*, *instruction register*, esecuzione di un'istruzione)

*Il software* [4 ore]

Il sistema operativo (funzionalità; sistemi *batch*, *multitask*, *time-sharing*, *real-time*, *fault tolerant*); gli strumenti per lo sviluppo dei programmi (interprete, compilatore, *linker*,

librerie statiche e dinamiche, *debugger, profiler*); linguaggi di programmazione (codice macchina, linguaggio *assembler*, linguaggi ad alto livello).

*Il sistema operativo MS-DOS* [4 ore]

Organizzazione interna, interfaccia utente, *file* di comandi, istruzioni di configurazione.

*Strumenti di produttività individuale* [8 ore]

Elaborazione di testi e tabelle in formato elettronico; *database*.

*Il linguaggio C* [20 ore]

Tipi di dato, istruzioni di assegnazione, operazioni aritmetiche e logiche, istruzioni di controllo, sottoprogrammi e passaggio dei parametri, libreria di I/O, libreria matematica, *file* di testo.

*Telematica* [12 ore]

Tipologie di comunicazione (seriale, parallela; sincrona, asincrona; a commutazione di circuito e di pacchetto); reti di calcolatori (topologia a stella, ad anello ed a *bus*; LAN, MAN e WAN; esempi: lo *standard* IEEE 802.3, la rete Internet); strumenti di comunicazione in rete (posta elettronica, trasferimento di dati, terminale virtuale; il cibernazio: *gopher, veronica, wais, www*); sistemi *client-server*.

## ESERCITAZIONI

1. Codifica dell'informazione: conversioni tra basi diverse, codifica di numeri relativi e razionali, codifica di informazioni generiche, rivelazione e correzione di errori casuali; [2 ore]
2. Operazioni aritmetiche: addizioni e sottrazioni in binario puro ed in complemento a due; [2 ore]
3. Logica booleana: verifica di espressioni logiche, costruzione e minimizzazione di funzioni logiche; [2 ore]
4. Architettura degli elaboratori elettronici: dimensionamento di componenti e calcolo di prestazioni; [2 ore]
5. I *personal computer* MS-DOS: configurazione *software* di un PC, scrittura di *file* di comandi; [4 ore]
6. Programmazione in linguaggio C: interfacce a menù, applicazione di formule matematiche, riduzione di dati numerici, analisi di testi. [16 ore]

## LABORATORIO

1. uso dei *personal computer* MS-DOS; [4 ore]
2. programmazione in linguaggio C; [14 ore]
3. uso di strumenti di produttività individuale; [4 ore]
4. uso di strumenti per la navigazione in rete. [2 ore]

## BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

Dispense delle lezioni ed esercitazioni (presso le cooperative del Politecnico).

P. Tosoratti, G. Collinassi, *Introduzione all'informatica*, Ambrosiana.

B. Kernigham, D. Ritchie. *Il linguaggio C*, Jackson.

Testo per approfondimenti:

Peter Bishop, *Informatica*, Jackson.

## ESAME

L'esame si articola su due prove scritte (una di teoria ed una di programmazione) da superare entrambe nel medesimo appello. Il voto finale è la media aritmetica (arrotondata per eccesso) dei voti riportati nelle due prove scritte.

Per gli allievi regolari è prevista verso la fine di maggio una prova speciale di teoria che, in caso di superamento, esonera per un anno dalla relativa prova scritta permettendo così all'allievo di sostenere negli appelli successivi solo più la prova di programmazione. La prova di esonero resta valida anche in caso di insufficienza in una prova di programmazione. Nel caso che l'allievo si presenti ad una prova di teoria, il voto dell'eventuale prova di esonero viene automaticamente cancellato, indipendentemente dal risultato della prova di teoria.

**E 230 0****Geometria**

Anno: periodo 1:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)

Docente: Maria Teresa Rivolo

Il corso si propone di fornire agli studenti una preparazione di base per lo studio di problemi geometrici nel piano e nello spazio con l'uso di coordinate e di problemi di algebra lineare con l'uso del calcolo matriciale.

**REQUISITI**

Elementi di geometria euclidea e di trigonometria; proprietà dei numeri reali, operazioni di derivazione e di integrazione.

**PROGRAMMA**

- Vettori del piano e dello spazio. Vettori applicati e liberi, operazioni, componenti. [5 ore]
- Numeri complessi ed equazioni algebriche. Definizione di numero complesso, operazioni, rappresentazione. Principio di identità dei polinomi. Teorema fondamentale dell'algebra. [5 ore]
- Spazi vettoriali. Proprietà elementari, sottospazi, dipendenza lineare, basi. Spazi di matrici, calcolo matriciale. [10 ore]
- Sistemi lineari e determinanti. Compatibilità e metodi di risoluzione di un sistema. Sistemi ad incognite vettoriali e matrice inversa. Definizione e proprietà dei determinanti. Proprietà delle matrici e determinanti. [7 ore]
- Applicazioni lineari. Definizione e proprietà. Applicazioni lineari e matrici. Cambiamenti di base e matrici simili. Autovalori ed autovettori: polinomio caratteristico, diagonalizzazione di una matrice, cenni sulla forma canonica di Jordan. Cenni su equazioni e sistemi differenziali lineari di ordine  $n$ . [14 ore]
- Spazi vettoriali con prodotto scalare. Spazi euclidei reali. Ortogonalità e basi ortonormali. Matrici ortogonali. Matrici simmetriche. Forme quadratiche. [4 ore]
- Geometria analitica del piano. Coordinate cartesiane e polari. La retta: rappresentazioni cartesiana e parametrica, parallelismo, angoli, fasci di rette. Distanze. Circonferenza: rappresentazioni, fasci di circonferenze. Coniche: forma generale e canonica, classificazione; tangente ad una conica in un suo punto. Cenni sulla polarità. [9 ore]
- Geometria analitica dello spazio. Coordinate cartesiane, cilindriche, polari. Rette e piani: rappresentazioni, parallelismo, angoli, perpendicolarità; complanarità di due rette. Distanze. Superfici sferiche e circonferenze. Coni, cilindri, superfici di rotazione. Quadriche: equazioni canoniche e classificazione; piano tangente. [14 ore]
- Geometria differenziale delle curve. Curve regolari e biregolari. Triedro fondamentale. Ascissa curvilinea. Curvatura e torsione. Cerchio osculatore. Formule di Frenet. [6 ore]

## ESERCITAZIONI

1. Operazioni tra vettori. [3 ore]
2. Esercizi su numeri complessi ed equazioni algebriche. [3 ore]
3. Esempi di spazi e sottospazi vettoriali. Esercizi sulla dipendenza lineare. Determinazione di generatori e di basi. Operazioni tra matrici. [6 ore]
4. Risoluzione e discussione sulla compatibilità di sistemi lineari. Calcolo dell'inversa di una matrice. [4 ore]
5. Applicazioni lineari e matrici associate. Cambiamenti di base. Calcolo di autovalori e determinazione di autospazi. Esempi di diagonalizzazione e di forma canonica di Jordan per una matrice quadrata. [8 ore]
6. Basi ortonormali. Matrici simmetriche e forma canonica di una forma quadratica. [2 ore]
7. Rette, circonferenze e coniche del piano. [6 ore]
8. Curve e superfici dello spazio: rette, piani, circonferenze, sfere, quadriche, coni, cilindri, superfici di rotazione. [10 ore]
9. Proprietà differenziali di una curva: tangente, piano osculatore, cerchio osculatore, curvatura, torsione. Studio dell'elica circolare. [4 ore]

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

S. Greco, P. Valabrega, *Lezioni di algebra lineare e geometria. Vol. I-II*, Levrotto e Bella, Torino, 1994.

Testi ausiliari:

S. Greco, P. Valabrega, *Esercizi risolti di algebra lineare, geometria analitica differenziale*, Levrotto e Bella, Torino, 1994.

G. Beccari, N. Catellani, D. Ferraris, D. Giublesi, L. Mascarello, *Esercizi di algebra lineare e geometria analitica*, CELID, Torino, 1983.

E. Sernesi, *Geometria I*, Bollati Boringhieri, Torino, 1990.

A. Sanini, *Lezioni di geometria*, Levrotto e Bella, Torino 1994.

## ESAME

L'esame si svolge in due prove, una scritta e una orale. Per lo scritto sono previste due modalità.

a) Due prove durante il semestre, la prima in forma di test, della durata di un'ora, riguardante l'algebra lineare; la seconda, della durata di un'ora e mezza, composta da esercizi di geometria analitica piana e spaziale. Durante le prove non è consentita la consultazione di testi.

b) Una prova della durata di due ore, in uno degli appelli previsti dal calendario, composta da esercizi sugli argomenti del Corso, nella quale è consentito consultare testi. Il superamento delle due prove di tipo a) con voto medio non inferiore a 15/30 consente allo studente di sostenere la prova orale nel periodo compreso tra giugno e ottobre, mentre lo studente che superi la prova di tipo b) con voto non inferiore a 15/30 deve sostenere la prova orale nello stesso appello.

**E 274 0****Impianti metallurgici**

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 70+40+10 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Mario Rosso

Il corso ha lo scopo di far conoscere gli impianti industriali impiegati nella metallurgia estrattiva ed in tutte le operazioni per la produzione e la trasformazione dei materiali. Con il termine impianti non si intende la semplice tecnologia impiantistica con la descrizione, inframmezzata da formule, del macchinario impiegato nell'industria.

Il programma proposto ha orizzonti ben più ampi, e vuol dare all'allievo una visione il più possibile vicina alla realtà industriale nella quale sarà chiamato ad operare, considerando l'impianto situato in un determinato luogo. Viene analizzata l'attività industriale nel suo complessivo, con le esigenze di sviluppo organico, di qualità ed affidabilità. Avendo in considerazione le condizioni ambientali e di sicurezza, vengono fomenti i criteri di progettazione, conduzione e gestione degli impianti stessi. Il programma ha un carattere teorico-pratico e viene completato con alcune visite a stabilimenti industriali utili a meglio evidenziare gli argomenti studiati.

**REQUISITI**

Oltre alle nozioni di carattere metallurgico, è da considerarsi propedeutico il corso di *Fisica tecnica*.

**PROGRAMMA**

*Teoria e tecnologia del trasferimento di materia.* [16 ore]

Trasporto dei solidi, nastri trasportatori, coclee, elevatori a tazze, mezzi particolari, trasporto pneumatico e cicloni separatori. Alimentatori e chiusure di scarico. Sistemi di stoccaggio dei solidi, tramogge e *silos*. Macinazione: frantumazione, granitura e polverizzazione, frantoi e mulini. Vagliatura e tipi di vaglio. La mescolazione dei solidi e relativi impianti. Sistemi misti solido-liquido: classificazione e flottazione, processi e impianti. Decantazione, sedimentazione, filtrazione, centrifugazione. Impianti di distribuzione dei fluidi: tubazioni, giunti, raccordi, guarnizioni e valvole, loro montaggio e protezione. Serbatoi per lo stoccaggio dei fluidi. Essiccamento diretto ed indiretto, cenni di igrometria ed analisi del processo, impianti di essiccamento.

*Trasferimento del calore.* [16 ore]

Richiami ai meccanismi di conduzione, convezione ed irraggiamento. Combustibili ed analisi del processo di combustione. Forni industriali: funzionamento e classificazione. La trasmissione di calore in regime stazionario ed in regime variabile nel tempo. Camini e tiraggio. Progettazione termotecnica. Perdite e recuperi di calore. Analisi dei forni industriali: elettrici, a combustibile, a muffola, in atmosfera controllata, forni sotto vuoto. Principali applicazioni: forni fusori, di elaborazione, di riscaldamento, di trattamento termico, di cottura e di sinterizzazione.

*Impianti di produzione e formatura.* [8 ore]

Impianti per la produzione di atmosfere controllate, per il rivestimento e la spruzzatura. Impianti per la formatura: stampaggio, laminazione, estrusione, rifusione a zone, colata,

pressocolata, iniezione, *thixoforming* e *rheocasting*. Impianti per produzione, elaborazione e compattazione delle polveri. Presse isostatiche.

*Ingegneria ambientale*. [12 ore]

Protezione antincendio, classificazione e cinetica degli incendi, rivelatori, grado di pericolo, prevenzione ed estinzione. Polluzioni atmosferiche: polveri, fumi e odori. Normative, captazione ed aspirazione, impianti di depurazione ed abbattimento. Il corpo idrico e l'inquinamento: acque primarie e loro trattamento. Acque reflue: pretrattamenti, trattamenti primari, secondari e terziari. Raffreddamento dell'acqua. Trattamento dei fanghi. Rifiuti solidi: gestione e smaltimento. Inquinamento da rumore e da vibrazioni: normative, metodi di controllo, di riduzione e di protezione.

*Ingegneria industriale*. [12 ore]

Studi di fattibilità, concetti di ingegneria economica stati patrimoniali e ricerche di mercato. Fabbricati industriali e *plant-layout*. Caratteristiche dei fabbricati e criteri di scelta. Architettura industriale. Servizi generali e servizi ausiliari. Magazzini e modalità di immagazzinamento. Servomezzi: produzione e distribuzione dell'aria compressa, immagazzinamento e reti di distribuzione degli oli minerali, servomezzi gassosi. Impianti elettrici: normativa e schemi di distribuzione. Impianti di illuminazione: efficacia, progettazione e manutenzione.

*Qualità e gestione*. [6 ore]

Logistica industriale, rete logistica e gestione di un sistema logistico. Tempistica ed intercorrelazione delle unità operative. Produttività e redditività degli investimenti impiantistici. Controllo qualità del processo. La manutenzione e le politiche di manutenzione, manutenzione preventiva.

## ESERCITAZIONI

Progettazione di impianti di trasporto per materiali solidi e di reti di distribuzione di fluidi. Criteri di scelta di: pompe per vuoto, per liquidi e per sospensioni, ventilatori e compressori.

Calcolo e progetto di un impianto di essiccazione. Teoria della combustione e calcoli relativi alla combustione. Progettazione di forni.

Analisi e discussione di *layout* di impianti industriali.

Le esercitazioni saranno completate da visite di istruzione a impianti industriali.

## BIBLIOGRAFIA

Dispense fornite dal docente.

W. Nicodemi, R. Zoja, *Processi e impianti siderurgici*, Masson, 1980, Milano.

A. Monte, *Elementi di impianti industriali. Vol. I e II*, Cortina, Torino.

## ESAME

È prevista la discussione dell'esercitazione monografica relativa al progetto di un forno o di altro impianto, seguita da una prova orale.

**E 311 0****Macchine**

Anno: periodo 4:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)  
78+52 (nell'intero periodo)

Docente: Matteo Andriano

Nel corso vengono esposti i principi termodinamici e fluidodinamici necessari ad una corretta comprensione del funzionamento delle macchine a fluido. Viene poi sviluppata l'analisi del funzionamento dei vari tipi di macchine (motrici ed operatrici) di più comune impiego, con l'approfondimento richiesto dall'obiettivo di preparare l'allievo ad essere, nella sua futura attività professionale, un utilizzatore attento ai vari aspetti, a quello energetico in particolare, sia nella scelta delle macchine, sia nel loro esercizio. A questo scopo viene dato lo spazio necessario ai problemi di scelta, di installazione, di regolazione, sia in sede di lezioni, sia in sede di esercitazioni, dove vengono esemplificate le necessarie calcolazioni. Nelle lezioni vengono sviluppati, i concetti, mentre nelle esercitazioni vengono eseguite applicazioni numeriche su casi concreti,

**REQUISITI**

Sono necessari i concetti di termodinamica contenuti nel corso di *Termodinamica dell'ingegneria chimica* o di *Fisica tecnica* (a seconda del corso di laurea), e di meccanica contenuti nel corso di *Elementi di meccanica teorica ed applicata*.

**PROGRAMMA**

- Introduzione. Considerazioni generali sulle macchine motrici ed operatrici a fluido. Classificazioni. Richiami di termodinamica. Le turbomacchine: principi fluidodinamici e termodinamici. Studio delle trasformazioni ideali e reali nei condotti. [10 ore]
- Cicli e schemi di impianti a vapore semplici e rigenerativi, ricupero per produzione di energia e calore, ad accumulo. [6 ore]
- Le turbine; le turbine a vapore semplici e multiple, assiali e radiali; regolazione; problemi meccanici e costruttivi tipici; le tenute. La condensazione. Possibilità e mezzi. Condensatori. [14 ore]
- Compressori di gas. I turbocompressori; studio dei funzionamenti e diagrammi caratteristici. Problemi di installazione; regolazione. I ventilatori. [12 ore]
- I compressori volumetrici alternativi e rotativi; studio del funzionamento; regolazione; campo di impiego. [8 ore]
- Le turbine a gas. Cicli termodinamici semplici e complessi. Organizzazione meccanica e regolazione. [8 ore]
- Le macchine idrauliche. Cenno alle turbine. Le pompe centrifughe. Campi di impiego. Caratteristiche di funzionamento; problemi di scelta e di installazione. La cavitazione. Le pompe volumetriche; campi di impiego; problemi di installazione. [8 ore]
- I motori alternativi a combustione interna. Cicli termodinamici. Studio del funzionamento dei motori ad accensione comandata e ad accensione per

compressione. La combustione. La dosatura. Le combustioni anomale; le caratteristiche dei combustibili. La regolazione. [12 ore]

## ESERCITAZIONI

Esercizi di richiamo dei concetti di termodinamica orientati problematiche delle macchine. Esempi di applicazione del Primo Principio alle trasformazioni di interesse.

Uso dei diagrammi termodinamici (Mollier); esercizi sugli ugelli condizioni subsoniche e in condizioni critiche con gas a vapore.

Bilanci di energia negli impianti a vapore, semplici, rigenerativi, a ricupero totale e parziale.

Esercizi sulle turbine assiali e radiali, semplici e multiple. Esercizi sulla regolazione degli impianti a vapore a condensazione ed a ricupero, e calcoli sui condensatori. Esercizi sui turbocompressori: utilizzazione dei concetti di similitudine; calcoli e scelte per la regolazione.

Esercizi sui compressori volumetrici alternativi e rotativi; calcoli e scelte per la regolazione.

Esercizi su cicli e impianti di turbine a gas: calcolo delle prestazioni in condizioni di progetto e di regolazione.

Esercizi sulle pompe: problemi di scelta, di installazione e di regolazione. Esempi di verifica delle condizioni di cavitazione (NPSH).

Esercizi sulle prestazioni dei motori a combustione interna; potenza e consumo specifico di vari tipi.

## BIBLIOGRAFIA

A. Capetti, *Motori termici*, UTET, Torino.

A. Capetti, *Compressori di gas*, Levrotto & Bella, Torino, 1970.

A. Beccari, *Macchine*, CLUT, Torino, 1980.

A.E. Catania, *Complementi ed esercizi di macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1979.

## ESAME

L'esame consiste in una prova scritta della durata di circa 2,5 ore e di una prova orale di circa 50 minuti. Nella prova scritta, durante la quale possono essere tenuti e consultati testi o appunti, viene richiesto lo svolgimento di tre esercizi riguardanti argomenti vari del corso trattati anche nelle esercitazioni. Il risultato della prova scritta non preclude l'orale. La prova scritta viene effettuata nel giorno e ora previsto nel calendario ufficiale degli appelli.

**E 318 0****Materiali metallici**

Anno: periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 8 (ore settimanali)

Docente: *da nominare*

**PROGRAMMA**

Riflessi sulle proprietà delle leghe del legame metallico, del tipo delle fasi presenti in lega, del loro reticolo cristallino e delle imperfezioni reticolari.

Interpretazione metallurgica dei principali diagrammi di stato dei sistemi metallici e conseguenti considerazioni e previsioni su proprietà e caratteristiche di impiego delle leghe corrispondenti.

Comportamento dei materiali metallici alle sollecitazioni nelle possibili condizioni di esercizio, in differenti condizioni di temperatura ed ambiente.

Influenza dei metodi di produzione e di trattamento sulle caratteristiche del semilavorato.

Trattamenti termici sui materiali metallici. Definizione, tecnica e modalità dei trattamenti. Trasformazioni di fase, loro cinetica e strutture conseguenti a trattamenti termici. Trattamenti chimico-termici e di indurimento superficiale. Trattamenti di protezione superficiale dei metalli.

Acciai comuni e legati. Classificazioni unificate. Effetto degli elementi leganti sulle caratteristiche di impiego degli acciai. Tipologia degli acciai e delle leghe speciali in funzione dei campi di utilizzazione pratica. Materiali metalloceramici.

Ghise per getto. Ghise a grafite lamellare, nodulare, sferoidale. Ghise legate e trattamenti termici delle ghise.

Rame, ottoni, bronzi, bronzi speciali ed altre leghe a base di rame.

Alluminio, leghe per getto e leghe per trattamento termico.

Magnesio, titanio, zinco, piombo e loro leghe.

Cromo, nichel, manganese; altri metalli di transizione e leghe per impieghi particolari.

Silicio, germanio. Metalli nobili. Metalli alcalini. Lantanidi e attinidi.

Materiali compositi a matrice metallica. Aderenza tra lega base e materiale di rinforzo.

Comportamento alle sollecitazioni. Accoppiamenti bimetallici.

**BIBLIOGRAFIA**

A. Burdese, *Metallurgia e tecnologia dei materiali metallici*, UTET, 1992.

Anno: periodo 3:1 Lezioni, esercitazioni, laboratorio informatico: 60 + 52 + 8 (ore nell'intero periodo)

Docente: Enrico Ballatore (Collab. Antonio Brencich)

La *meccanica dei solidi elastici lineari* viene trattata deducendo le equazioni di equilibrio e congruenza e le leggi costitutive nella formulazione generale del solido tridimensionale, che viene particolarizzata per il caso bidimensionale (lastre o piastre) e unidimensionale (travi). Le relazioni analitiche sono estese alle applicazioni numeriche con particolare riguardo al metodo degli elementi finiti di cui sono fornite rigorose basi concettuali quale premessa alle applicazioni pratiche mediante esercitazioni individuali presso il Laboratorio Informatico.

La *teoria dei sistemi di travi* viene trattata sotto il duplice aspetto statico e cinematico. L'equilibrio delle strutture isostatiche è interpretato sia sul piano algebrico che su quello grafico ed in tale contesto vengono definite le caratteristiche interne della sollecitazione. La soluzione delle strutture iperstatiche viene proposta in linea generale applicando sia il metodo delle forze (o della congruenza) che quello degli spostamenti (o dell'equilibrio). Le soluzioni trovate sono quindi espresse in formulazione matriciale particolarmente utile per eseguire in maniera automatica il calcolo dei sistemi a molti gradi di iperstaticità.

La soluzione del problema dei telai piani (sia a nodi fissi che a nodi spostabili) viene esposta con due metodi alternativi: il cosiddetto "metodo dei telai piani" (secondo il quale si svincola la struttura introducendo cerniere in tutti i nodi-incastro), e il principio dei lavori virtuali secondo la metodologia di Muller-Breslau.

Vengono infine illustrati i *fenomeni di collasso* più frequenti nell'ingegneria strutturale: lo svergolamento, lo snervamento e la frattura fragile.

Il corso comprende lezioni, esercitazioni in aula e nel Laboratorio Informatico.

## REQUISITI

*Analisi Matematica I e II, Fisica I.*

## PROGRAMMA

Sono previste tredici settimane di lezioni con un numero di ore settimanali variabile da quattro a sei secondo un calendario dettagliato distribuito all'inizio del corso.

- *Geometria delle aree*: leggi di trasformazione del vettore dei momenti statici e del tensore dei momenti di inerzia per roto-traslazioni del sistema di riferimento; direzioni e momenti principali di inerzia; cerchi di Mohr; simmetria assiale e polare.
- *Cinematica dei sistemi di travi*: vincoli piani; maldisposizione dei vincoli; studio algebrico; studio grafico dei sistemi ad un grado di labilità (catene cinematiche).
- *Statica dei sistemi di travi*: studio algebrico; dualità statico-cinematica.
- *Sistemi di travi isostatici*: determinazione delle reazioni vincolari con le equazioni ausiliarie, con il Principio dei Lavori Virtuali e con il metodo grafico; curva delle pressioni; caratteristiche interne della sollecitazione; equazioni indefinite di equilibrio per le travi; archi a tre cerniere; strutture chiuse; travature reticolari.

- *Applicazione del Principio dei Lavori Virtuali alle travi elastiche*: determinazione degli spostamenti di strutture isostatiche e risoluzione delle strutture iperstatiche con distorsioni e spostamenti imposti.
- *Analisi della deformazione*: tensore delle deformazioni; dilatazioni e scorrimenti; proiezioni del vettore spostamento; legge di trasformazione del tensore delle deformazioni per rotazioni del sistema di riferimento; direzioni principali di deformazione; dilatazione volumetrica.
- *Analisi della tensione*: vettore tensione; tensore degli sforzi; proiezioni del vettore tensione; legge di trasformazione del tensore degli sforzi per rotazioni del sistema di riferimento; direzioni principali di tensione; tensori idrostatico e deviatorico; cerchi di Mohr; stato tensionale piano; equazioni indefinite di equilibrio; equazioni di equivalenza al contorno; formulazione matriciale e dualità statico-cinematica; Principio dei Lavori Virtuali.
- *Legge costitutiva elastica*: elasticità lineare; isotropia; modulo di Young e coefficiente di Poisson; problema elastico; equazione di Lamé in forma operatoriale; Teorema di Clapeyron; Teorema di Betti.
- *Criteri di resistenza*: diagrammi tensione-deformazione per materiali duttili e fragili; Criterio di Tresca; Criterio di von Mises.
- *Solido di Saint Venant*: ipotesi fondamentali; sforzo normale; flessione retta; sforzo normale eccentrico; flessione deviata; nocciolo centrale di inerzia; ortogonalità energetica; torsione (sezioni circolari e generiche, sezioni sottili aperte e chiuse); taglio (centro di taglio, trattazione semplificata di Jourawsky, sezione rettangolare, scorrimento medio, sezioni sottili); equazioni di congruenza per le travi; equazione di Lamé per le travi; equazione differenziale della linea elastica;
- *Lastre piane*: equazione di Sophie Germain; cenni al metodo delle differenze finite.
- *Metodo degli Elementi Finiti*: Principio di Minimo dell'Energia Potenziale Totale, Costruzione delle matrici di rigidezza locale e globale mediante applicazione del Principio dei Lavori Virtuali; Condizioni di vincolo; Illustrazione dell'utilizzo di un programma di calcolo agli elementi finiti.
- *Sistemi di travi iperstatici*: simmetria e anti-simmetria; metodo delle forze; iperstaticità assiale; cedimenti elastici; cedimenti anelastici e spostamenti imposti; calcolo automatico dei sistemi a molti gradi di iperstaticità (travature reticolari, telai piani e spaziali, grigliati).
- *Risoluzione di telai piani iperstatici*: metodo degli spostamenti; distorsioni termiche; telai a nodi fissi; telai a nodi spostabili.
- *Instabilità dell'equilibrio elastico*: trave rettilinea con varie condizioni di vincolo, portali; limiti di validità della formula di Eulero; cenni sull'instabilità degli anelli; instabilità flesso-torsionale.
- *Meccanica della frattura*: analisi energetica di Griffith, fattore di intensificazione delle tensioni, cenni su modo II e modo misto.
- *Cerniere plastiche*: nella trave a sezione rettangolare.

## ESERCITAZIONI

Sono previste tredici settimane di esercitazioni con un numero di ore settimanali variabile da quattro a sei secondo un calendario dettagliato distribuito all'inizio del

corso: oltre alle ore di effettiva attività didattica sono previste anche dodici ore per accertamenti sostitutivi dello scritto e per verifiche di apprendimento.

- 1 *Geometria delle aree*: calcolo delle caratteristiche geometriche di aree elementari; esercizi su figure composte.
- 2 *Cinematica dei sistemi di travi*: catene cinematiche e loro applicazione al calcolo reazioni vincolari.
- 3-4 *Sistemi di travi isostatici*: equazioni cardinali ed equazioni ausiliarie; determinazione delle reazioni vincolari con le equazioni ausiliarie e con il metodo grafico; diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione; curva delle pressioni.
- 5-6 *Applicazione del Principio dei Lavori Virtuali alle travi elastiche*: determinazione degli spostamenti in strutture isostatiche; risoluzione delle strutture iperstatiche con distorsioni e spostamenti imposti.
- 7 *Esercitazioni riepilogative* su strutture isostatiche e iperstatiche con soluzione dei temi di esame degli anni precedenti relativi a tali argomenti.
- 8-9 *Solido di Saint Venant*: esercizi relativi a flessione retta, sforzo normale eccentrico, flessione deviata, nocciolo centrale di inerzia, torsione (sezioni circolari, sezioni sottili aperte e chiuse), taglio, centro di taglio.
- 10 *Esercitazione di Laboratorio Informatico*: introduzione all'uso del programma di calcolo basato sul metodo degli elementi finiti  
*Analisi della tensione e criteri di resistenza*: rappresentazione degli stati di tensione con i cerchi di Mohr, verifica complessiva delle sezioni; cenni sui criteri di sicurezza.
- 11-12 *Risoluzione di telai piani iperstatici*: telai a nodi fissi e a nodi spostabili con carichi, cedimenti e distorsioni termiche.
- 13 *Esercitazioni riepilogative* su strutture iperstatiche e verifica delle sezioni con soluzione dei temi di esame degli anni precedenti relativi a tali argomenti.

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento (contenente tutti gli argomenti svolti a lezione ed esercitazione):

A. Carpinteri, *Scienza delle Costruzioni*, Pitagora, Bologna, 1995.

Dispensa sull'utilizzo del programma ad elementi finiti, viene fornita durante il corso

Testo ausiliario:

A. Carpinteri, *Temi d'esame*, Pitagora, Bologna, 1993.

## ESAME

L'esame si compone di:

1. una prova scritta che comprende tre esercizi:

A una struttura isostatica,

B una struttura iperstatica,

C una sezione (calcolo delle caratteristiche geometriche e verifica di resistenza).

Ciascun esercizio pone due quesiti: la prova è positiva se sono stati risolti almeno i primi quesiti di tutti e tre gli esercizi.

2. una prova orale sugli argomenti del programma svolto a lezione ed esercitazione;

3. una tesina sugli elementi finiti svolta utilizzando il programma illustrato nel corso e disponibile presso il LAIB del Politecnico.

La prova scritta deve essere svolta tracciando tutti i grafici richiesti in forma precisa e accurata su carta quadrettata (da 5 mm) o su carta millimetrata utilizzando quando necessario riga e squadra. Non viene consentito l'utilizzo di testi e appunti.

Per sostenere la prova scritta lo studente deve esibire il tesserino universitario e lo statino; quest' ultimo sarà ritirato nel caso in cui lo studente consegni il proprio elaborato.

La prova orale deve essere sostenuta nella stessa sessione di esami in cui è stato superato lo scritto.

#### Accertamenti sostitutivi della prova scritta.

Il superamento delle due prove di accertamento previste durante il corso sostituisce il compito scritto con validità sino alla fine dell'anno accademico in corso; le due prove sono costituite da:

1. due esercizi relativi a:
  - A una struttura isostatica,
  - B una struttura iperstatica da risolvere con l'applicazione del P.L.V;
2. due esercizi relativi a:
  - C una struttura iperstatica da risolvere con il metodo dei telai piani,
  - D una sezione (calcolo delle caratteristiche geometriche e verifica di resistenza).

Ciascun esercizio pone due quesiti: le prove sono globalmente positive se sono stati risolti almeno i primi quesiti di tutti e quattro gli esercizi.

**E 459 0****Scienza dei materiali**

Anno: periodo 3:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali)  
78+26 (nell'intero periodo)

Docente: Carlo Gianoglio

L' insegnamento si pone come obiettivo principale la descrizione delle caratteristiche e delle proprietà dei materiali, secondo un'ottica impostata su base unitaria. Il filo conduttore sarà costituito dalla costante correlazione tra la microstruttura e le proprietà chimico-fisico-meccaniche delle tre classi tipiche di materiali (ceramici, polimerici, metallici). Vengono impartite le varie nozioni di base indispensabili allo studente per poter affrontare nel miglior modo gli insegnamenti successivi di tipo specialistico, nei quali verranno descritti gli aspetti più propriamente tecnologici e applicativi dei materiali.

**REQUISITI**

Al fine di poter seguire agevolmente l'insegnamento è opportuno aver superato gli esami dei corsi di *Chimica e Fisica*.

**PROGRAMMA**

*Introduzione.* [2 ore]

Generalità sui materiali per applicazioni ingegneristiche e loro criteri di scelta in ambito progettuale.

*Correlazione tra microstruttura e proprietà.* [14 ore]

Tipologia del legame e struttura reticolare. Principali strutture dei materiali metallici e ceramici. Cristallinità dei polimeri. Posizioni reticolari e siti interstiziali. Distanza e densità dei piani. Difetti reticolari puntiformi. Soluzioni solide interstiziali e sostituzionali. Difetti di linea. Movimento delle dislocazioni a spigolo e a elica. Dislocazioni miste. Meccanismi di bloccaggio delle dislocazioni.

*Transizioni di fase.* [16 ore]

Trasformazione liquido – solido. Analisi termica e termodifferenziale. Generalità sui diagrammi di fase a due componenti. Deduzione della regola della leva. Relazioni di equilibrio tra fasi diverse. Curve di *liquidus* e di *solidus*. Trasformazioni eutettiche, peritettiche, eutetoidiche, monotettiche e sintettiche. Transizioni allo stato solido. Generalità ed esempi relativi ai diagrammi di fase ternari.

*Comportamento meccanico del solido ideale.* [6 ore]

Deformazione elastica del cristallo perfetto. Carico teorico al limite elastico. Sistemi di scorrimento nei reticoli cristallini. Aspetti termodinamici dell'estensione uniassiale isoterma. Snervamento del solido policristallino. Meccanismi di deformazione in un polimero. Forza di legame ed energia per la frattura.

*Caratteristiche meccaniche dei materiali.* [12 ore]

Generalità sul comportamento meccanico dei materiali. Resistenza a trazione dei materiali ceramici di tipo ionico o covalente. Resistenza a trazione dei materiali metallici. Resistenza a trazione dei materiali polimerici, di tipo plastomerico ed elastomerico. Resistenza all'urto. Temperatura di transizione. Frattura duttile e frattura fragile.

Correlazione tra durezza e resistenza a trazione. Resistenza a fatica. Parametri influenti sullo scorrimento viscoso. Influenza della temperatura sulla forza di ritrazione elastica. Comportamento viscoelastico.

*Deformabilità dei materiali.* [6 ore]

Relazione tra parametri micro- e macro-strutturali. Carico teorico al limite elastico. Sistemi di scorrimento nei reticoli cristallini. Interpretazione dei fenomeni di snervamento. Deformazione plastica con e senza scorrimento. Influenza dei difetti reticolari sulla deformabilità plastica dei materiali metallici.

*Diffusione allo stato solido.* [6 ore]

Modello relativo alla diffusione interstiziale. Diffusione nelle soluzioni solide sostituzionali. Diffusione stazionaria. Prima legge di Fick. Diffusione non stazionaria. Seconda legge di Fick.

*Fenomeni di nucleazione e crescita.* [6 ore]

Nucleazione omogenea. Energia di volume e di superficie. Dimensione critica dei grani. Velocità di nucleazione e di crescita. Nucleazione eterogenea. Attività degli agenti inoculanti. Curve tempo – temperatura – trasformazione.

*Trasformazioni allo stato solido.* [6 ore]

Generalità sulle trasformazioni di fase in assenza di diffusione. Fasi martensitiche stabili e metastabili. Effetto del soluto. Martensiti atermiche e isotermiche. Piano limite e sua velocità di avanzamento. Trasformazioni per decomposizione spinodale.

*Rafforzamento dei materiali.* [6 ore]

Teoria dell'indurimento per precipitazione. Tempra di solubilizzazione. Rinvenimento ed invecchiamento. Zone di Giunier–Preston. Coerenza dei precipitati con la matrice. Rafforzamento mediante particelle indeformabili.

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

W. Kurz, J.P. Mercier, G. Zambelli, *Introduzione alla scienza dei materiali*, Hoepli, 1993.

Testi ausiliari:

J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings, J.M. Alexander, *Material science*, Chapman & Hall, 1991.

R.T. DeHoff, *Thermodynamics in material science*, McGraw-Hill, 1993.

## ESAME

L'esame si struttura su tre domande orali aventi per oggetto gli argomenti svolti a lezione. Verrà valutato anche l'impegno dimostrato nell'esecuzione delle esercitazioni e nella stesura delle relative relazioni.

**E 463 0****Scienza e tecnologia dei materiali ceramici**

Anno:periodo 4:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 85+10+10 (ore, nell'intero periodo)  
 Docente: Ignazio Amato (collab.: Laura Montanaro)

Il corso intende fornire agli studenti interessati all'ingegneria dei materiali una adeguata conoscenza delle caratteristiche, della produzione e dell'uso dei materiali ceramici d'impiego industriale.

**REQUISITI**

È necessaria la conoscenza degli argomenti trattati nel corso di *Chimica* e di *Scienza dei materiali*.

**PROGRAMMA**

*Scienza ceramici*. [9 ore]

I solidi: fondamenti teorici. L'ordine nei solidi. Cristalli e strutture cristalline. Solidi ionici e solidi covalenti: legami, strutture, proprietà. Solidi policristallini, microstrutture, ceramografia.

Comportamento superficiale dei solidi, energia superficiale, bagnabilità, capillarità, adsorbimento.

*Proprietà ceramici*. [7 ore]

Solidi duttili e solidi fragili. Le proprietà dei solidi. Comportamento meccanico dei ceramici e tenacità alla frattura. Correlazioni proprietà – microstruttura.

*Densificazione dei materiali ceramici*. [9 ore]

I difetti nei solidi e la diffusione. La densificazione per sinterizzazione. La teoria della sinterizzazione. Le proprietà dei solidi sottoposti a sinterizzazione: la superficie specifica. Le caratteristiche dei sinterizzati: la porosità aperta e chiusa, la dimensione dei pori. L'influenza di gas occlusi nei pori e la regressione della densità. Sinterizzazione a più componenti solidi. Sinterizzazione in sistemi solido-liquido. Densificazione per pressatura a caldo. Sinterizzazione e ricristallizzazione.

*Tecnologia dei materiali ceramici*. [25 ore]

Le polveri ceramiche: caratteristiche. I processi di produzione di polveri industriali. I processi di produzione di polveri speciali: sol-gel, evaporazione ed estrazione solvente, reazione in fase vapore. Additivi di processo e meccanismo d'azione. Meccanica delle particelle e reologia. I processi di preparazione delle polveri prima della formatura: trasporto, macinazione, mescolamento, lavaggio, granulazione. I processi di formatura: pressatura, estrusione, colaggio. I processi di cottura: essiccamento, presinterizzazione, sinterizzazione. Finitura e rivestimenti.

*Prodotti ceramici*. [25 ore]

Ceramici base ossido: allumina e zirconia. Ceramici base nitruri: nitruro alluminio, nitruro di silicio, nitruro di boro. Ceramici base carburi: carburo tungsteno, carburo titanio, carburo silicio. Ceramici base boruro: boruro di titanio. Ceramici base siliciuri: siliciuro di molibdeno. Ceramici per sensori ed elettroliti solidi. Metallo-ceramici ed

utensili da taglio. Vetro e vetro-ceramici. Diamante policristallino. Rivestimenti ceramici. I rinforzi ceramici: le fibre di nitruro di silicio, gli *whiskers* di carburo di silicio, le fibre di carbonio. Compositi ceramici e monocomposti ceramici.

### ESERCITAZIONI

Analisi strutturale: calcolo della struttura di alcuni materiali ceramici. [3 ore]

Analisi microstrutturale: valutazione e calcolo microstruttura di alcuni materiali ceramici (grano medio, fattore di aspetto). [3 ore]

Determinazione proprietà meccaniche: modulo di Young, tenacità a frattura, flessione a tre punti, durezza Vickers e Knoop. Statistica di Weibull: esempi applicativi. [4 ore]

### LABORATORIO

Le esercitazioni, con squadre a numero limitato di studenti, riguarderanno quanto segue: Identificazione dei costituenti in una miscela di ossidi ceramici mediante diffrazione ai raggi X. [2 ore]

Le tecniche microscopiche: SEM, TEM, HRTEM, EDS, WDS. [2 ore]

Valutazione caratteristiche meccaniche ceramici. [2 ore]

Analisi granulometrica laser di polveri ceramiche. [2 ore]

Determinazione superficie specifica e porosità. [2 ore]

Analisi termotecniche e termofisiche (TGA, DTA, DSC, dilatometria). [2 ore]

### BIBLIOGRAFIA

J.S. Reed, *Introduction to principles of ceramic processing*, Pergamon Press, New York.

R. Sersale, *I materiali ceramici ordinari e speciali*, Ed. Ambrosiana, Milano.

I. Amato, Monografie.

L. Montanaro, Monografie.

I. Amato, L. Montanaro, *Lezioni dal corso di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici, Vol.1; La Scienza dei Materiali Ceramici, Vol.2; La Tecnologia dei Materiali Ceramici (in preparazione)*, Libreria Cortina, Torino.

### ESAME

Orale con presentazione di elaborazioni svolte durante le esercitazioni.

**E 468 1****Scienza e tecnologia dei materiali polimerici I**

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali);  
78+26 (nell'intero periodo)

Docente: *da nominare*

Scopo del corso è di fornire le conoscenze di base sulla struttura dei materiali polimerici, sulle loro proprietà e sulle loro tecnologie di trasformazione. A tale scopo vengono dapprima forniti elementi propedeutici di chimica organica. Sono poi trattati i polimeri di uso generale, termoplastici e termoindurenti, considerando la loro preparazione e le loro principali proprietà in relazione con la struttura. Vengono infine illustrate le tecnologie di trasformazione dei materiali polimerici e le loro più importanti applicazioni industriali.

**REQUISITI**

Si richiede di avere superato l'esame di *Chimica*

**PROGRAMMA**

*Nozioni di chimica organica* [12 ore]

La chimica del carbonio. Esame dei principali gruppi funzionali presenti nei polimeri e loro caratteristiche chimiche. Fenomeni di isomeria e stereoisomeria. Principali monomeri.

*Struttura e caratterizzazione delle macromolecole* [20 ore]

Pesi molecolari e loro distribuzione. Forze di coesione intermolecolari, regolarità e flessibilità della catena polimerica. Struttura supermolecolare: stato amorfo e stato cristallino. Reticoli polimerici, densità di reticolazione. Caratterizzazione termica: temperatura di fusione e temperatura di transizione vetrosa. Caratterizzazione chimico-fisica.

*Reazioni di polimerizzazione* [22 ore]

Polimeri di policondensazione: schema del processo e controllo del peso molecolare (P.M.), produzione industriale di poliesteri, poliammidi e policarbonati. Polimeri di poliaaddizione radicalica: condizioni operative, cinetica della reazione e controllo del P.M.. Reazioni di copolimerizzazione. Tecniche industriali di polimerizzazione e processi di produzione di polimeri di impiego generale (polietilene, polivinilcloruro e polistirene). Produzione di gomme sintetiche. Polimeri di poliaddizione ionica: polimerizzazione stereospecifica, produzione industriale di poliolefine.

*Proprietà dei materiali polimerici in massa* [12 ore]

Proprietà termiche: capacità termica, dilatazione, conducibilità. Proprietà meccaniche: rigidità, resistenza a trazione, resilienza. Comportamento viscoelastico dei polimeri: reologia dei polimeri fusi. Proprietà delle gomme. Proprietà elettriche: conducibilità, costante dielettrica, fattore di dissipazione. Proprietà ottiche: indice di rifrazione, trasparenza. Vetri organici.

*Tecnologie di trasformazione dei materiali polimerici termoplastici* [6 ore]

Additivi, cariche e compoundign. Tecnologie di iniezione, estrusione, calandratura, termoformatura, stampaggio rotazionale, spalmatura.

*Materiali polimerici termoindurenti* [6 ore]

Poliuretani, poliesteri insaturi e altre principali classi di resine. Materiali polimerici espansi. Tecnologie di trasformazione e applicazioni.

#### ESERCITAZIONI E LABORATORI

Sono previste sia esercitazioni in aula con applicazioni di calcolo sugli argomenti di lezione sia esercitazioni sperimentali di laboratorio con squadre a numero limitato di allievi. Queste ultime riguarderanno la caratterizzazione dei materiali polimerici e la valutazione delle loro proprietà meccaniche fondamentali e saranno completate dalla stesura di una breve relazione. Si effettueranno visite ad impianti di trasformazione di materie plastiche.

#### BIBLIOGRAFIA

Scienza e tecnologia delle macromolecole, Aim, Vol. I e II, Pacini, Pisa, 1983.

F.Rodriguez, Principles of polymer systems, 4th ed., Taylor & Francis, New York, 1996.

#### ESAME

L'esame consiste in una prova orale relativa a tutto il programma del corso.

**E 534 0****Struttura della materia**

Anno: periodo 2:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 8 (ore settimanali)

Docente: Piero Mazzetti

**REQUISITI**

*Fisica 1 e 2.*

**PROGRAMMA**

– *Introduzione alla meccanica quantistica.*

Meccanica classica lagrangiana, equazioni di Hamilton–Jacobi, parentesi di Poisson, passaggio alla meccanica ondulatoria, principio di indeterminazione, postulati fondamentali della teoria, equazione di Schrödinger, spazio di Hilbert e formulazione generale della meccanica quantistica in forma matriciale, teoria delle perturbazioni stazionaria e dipendente dal tempo.

– *Applicazioni della meccanica quantistica.*

Elettrone libero, elettrone come pacchetto d'onde, elettrone in una buca di potenziale, oscillatore armonico, atomo di idrogeno, modello a campo centrale dell'atomo, tavola periodica degli elementi.

– *Concetti fondamentali di meccanica statistica.*

Spazio delle fasi e teorema di Liouville, statistica di Boltzman–Gibbs, di Bose–Einstein e di Fermi–Dirac, teorema di equipartizione dell'energia e sue applicazioni, vacanze reticolari, ordine – disordine nelle leghe binarie e entropia di mescolamento, applicazioni della statistica di Fermi–Dirac al gas di elettroni.

– *Struttura dei solidi cristallini.*

Reticoli cristallini, vettori di base, spazio reciproco, reticolo reciproco e sue proprietà, diffrazione dei raggi X, concetto di momento cristallino e proprietà generali di conservazione per processi di interazione tra elettroni, fotoni, fononi nello spazio reciproco, invarianza traslazionale e teorema di Bloch.

– *Proprietà vibrazionali dei solidi.*

Approssimazione armonica, modi vibrazionali normali, legge di dispersione, catena di atomi unidimensionale, branca acustica e branca ottica in reticoli biatomici, quantizzazione dell'energia e concetto di fonone, calore specifico fononico nelle approssimazioni di Einstein e Debye, effetti anarmonici, conducibilità termica e dilatazione termica.

– *Proprietà elettroniche dei solidi.*

Elettroni liberi in un metallo ed elettroni perturbati da un potenziale periodico, nascita di una struttura a bande dell'energia, elettroni in un reticolo cristallino e onde di Bloch, zone di Brillouin, superficie di Fermi, metalli, semiconduttori, isolanti, calcolo della struttura a bande in metalli e isolanti, transizioni elettroniche in semiconduttori.

– *Teoria di Hartree e Hartree–Fock per gli elettroni in un cristallo.*

*Spin* elettronico, matrici di Pauli, stati di singoletto e di tripletto, equazioni di Hartree ed Hartree–Fock, calcolo dell'energia media, interazione di scambio ed energia di scambio, metodi autoconsistenti per il calcolo dell'energia di un gas di elettroni in interazione, applicazioni alla molecola di idrogeno.

– *Proprietà magnetiche dei solidi.*

Hamiltoniana di un gas di elettroni in campo magnetico, diamagnetismo di elettroni legati, diamagnetismo di Landau degli elettroni liberi, paramagnetismo, funzione di Brillouin, ferromagnetismo nella teoria di Weiss e di Heisenberg, materiali ferromagnetici e teoria dei domini, applicazioni dei materiali ferromagnetici.

– *Difetti nei solidi.*

Vacanze reticolari in equilibrio termico in un cristallo, interstiziali, dislocazioni lineari ed a vite, moto e moltiplicazione delle dislocazioni e deformazione plastica dei cristalli.

– *Proprietà ottiche dei solidi.*

Risposta dielettrica, riflettività ed assorbimento ottico, transizioni interbanda, eccitoni, effetto Raman, centri di colore.

## BIBLIOGRAFIA

Oltre a dispense fornite dal docente, vengono consigliati testi diversi a seconda dell'argomento trattato.

## ESAME

L'esame consiste in una prova orale. È facoltativo svolgere una tesina su un argomento del corso. Tale tesina verrà poi discussa al momento dell'esame.

## Programmi degli insegnamenti d'orientamento

**E 091 0**

### **Corrosione e protezione dei materiali metallici**

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 5+1 (ore settimanali)  
70+14 (nell'intero periodo)

Docente: Mario Maja

Il corso viene sviluppato con l'intento di dare agli allievi ingegneri le basi necessarie per discutere i processi di deterioramento dei materiali metallici provocati dalla corrosione e per scegliere i metodi di protezione e prevenzione più idonei. Verranno discussi sia i processi di corrosione a umido, sia quelli di corrosione a secco e la corrosione per correnti impresse. Vengono inoltre discussi i criteri di scelta dei materiali metallici.

#### REQUISITI

È necessaria la conoscenza degli argomenti trattati nei corsi di *Chimica*, e *Metallurgia* (per gli studenti di Ingegneria chimica) o *Materiali metallici* (per gli studenti di Ingegneria dei materiali).

#### PROGRAMMA

*Introduzione.* [8 ore]

Corrosione ad umido ed a secco, reazioni caratteristiche, danni diretti ed indiretti, costi ed affidabilità, ambienti corrosivi, richiami sulle acque, curva di Tillman, il suolo come elettrolito, velocità della corrosione ed influenza del tempo.

*Termodinamica elettrochimica.* [8 ore]

Richiami sugli elettroliti, i potenziali di elettrodo, gli elettrodi di riferimento, misura dei potenziali, diagrammi pH-V e loro lettura.

*Cinetica elettrochimica.* [10 ore]

La polarizzazione degli elettrodi, le curve di polarizzazione, le sovratensioni (ohmica, di attivazione, di diffusione), la legge di Tafel, il comportamento dinamico di un elettrodo e metodi di analisi delle sovratensioni, i fenomeni anodici e la passività dei metalli.

*La isopolarizzazione dei metalli.* [5 ore]

Le caratteristiche elettrochimiche delle principali reazioni che interessano la corrosione, il concetto di isopolarizzazione e di potenziale di corrosione, esempi pratici di sistemi reali.

*Coppie galvaniche in CC.* [6 ore]

Contatto tra differenti metalli in acqua marina, esempi di coppie galvaniche in *boiler*, tubazioni e reattori, l'inversione delle coppie galvaniche (Fe-Sn e Fe-Zn), grafitizzazione delle ghise.

*La morfologia della corrosione.* [12 ore]

Corrosione per vaiolatura, interstiziale, filiforme, intergranulare, sotto sforzo, per fatica, danneggiamento da idrogeno, corrosione atmosferica, biologica e nel suolo.

*Materiali ed ambiente.* [5 ore]

Comportamento dei principali acciai e delle leghe di rame e di zinco alla corrosione marina ed atmosferica.

*Prevenzione e protezione.* [6 ore]

Inibitori di corrosione (anodici e catodici), protezione catodica, rivestimenti metallici ed organici, criteri di progettazione.

*Prove di corrosione.* [5 ore]

Prove in camere a nebbia salina, prove elettrochimiche.

*La corrosione a secco.* [5 ore]

La teoria di Wagner, esempi caratteristici di ossidazione di metalli, corrosione lato fumi di caldaie e metodi di prevenzione.

## ESERCITAZIONI

Le esercitazioni vengono svolte discutendo vari casi di corrosione raccolti nel corso degli anni dal laboratorio. Vengono altresì proiettate videocassette edite dalla National Association Corrosion Engineering e concernenti un corso di corrosione per ingegneri tenuto dalla associazione suddetta.

## BIBLIOGRAFIA

G. Bianchi, F. Mazza, *Corrosione e protezione dei metalli*, Masson.

D.A. Jonnes, *Principles and prevention of corrosion*, McMillan.

**E 144 5****Dispositivi elettronici 2 +  
Elettronica dello stato solido**

Anno: periodo 5:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 8 (ore settimanali)  
60 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Carlo Naldi

**Dispositivi elettronici 2**

Il corso segue il corso di Dispositivi Elettronici I, da un lato affinando gli strumenti di indagine sui dispositivi, dall'altro estendendo l'esame dei dispositivi verso quelli impiegati nelle applicazioni ad alta frequenza nelle telecomunicazioni e alle frequenze ottiche. Il corso è pensato specificatamente per Ingegneria dei Materiali e quindi i prerequisiti sono quelli conseguibili attraverso gli insegnamenti previsti nel corso di Laurea.

## PROGRAMMA

- *Cenni di meccanica quantistica*. Equivalenza pacchetto d'onde-particella. Distribuzioni di Maxwell, di Bose-Einstein e di Fermi-Dirac. Hamiltoniana del sistema. [12 ore]
- *Elettrone in un reticolo*. Teorema di Bloch. Modello di Kronig-Penney. [8 ore]
- *Semiconduttori per applicazioni in alta frequenza*. Proprietà dei semiconduttori composti. Eterostrutture: adattamento reticolare e strati sotto tensione. Legge ternarie e quaternarie. [6 ore]
- *Fenomeni di trasporto*. Condizioni di non equilibrio. Collisioni con impurità ionizzate e con vibrazioni reticolari. Fononi acustici e ottici. Interazione elettrone-fotone. Curva velocità-campo. [8 ore]
- *Dispositivi a effetto di volume*: diodi gun. Mobilità differenziale negativa. Operazioni con circuito risonante. Tecniche di progetto di oscillatori a resistenza negativa. [4 ore]
- Principi generali sul rumore nei dispositivi. Rumore termico e di diffusione. [3 ore]
- Fenomeni di *breakdown*: soglia per la valanga. Dispositivi a valanga e tempo di transito. Diodi IMPATT. Tecnologia del dissipatore integrato. [4 ore]
- MESFET all'arseniuro di gallio [2 ore]
- *Dispositivi a superreticolo*: "multi-quantum well" e modulazione del drogaggio; HEMT, pseudomorfici; transistori bipolari a eterogiunzione HBT. Dispositivi a *tunneling risonante*. [4 ore]
- Fenomeni di generazione-ricombinazione. Centri di ricombinazione; teoria SRH [4ore]
- Dispositivi optoelettronici: Fotorivelatori: fotoconduttore, fotodiodi. [4 ore]

## BIBLIOGRAFIA

Micheal Shur, *Physics of semiconductor devices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1990  
Copie dei lucidi presentati a lezione vengono distribuite agli studenti.

## ESAME

Durante il semestre viene data la possibilità con una prova di esonero di superare la parte relativa a questo modulo.

## Elettronica dello stato solido

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+ 4 (ore settimanali)

Docente: Giovanni Ghione

Negli ultimi anni la simulazione numerica dei dispositivi elettronici allo stato solido è divenuta uno strumento indispensabile nella ideazione e progettazione dei dispositivi a semiconduttore ed è una componente fondamentale del cosiddetto CAD Tecnologico (TCAD). Il corso si propone di offrire una introduzione all'analisi e alla simulazione numerica di dispositivi elettronici convenzionali e avanzati mediante modelli fisici. Dopo una introduzione ai modelli fisici di dispositivi a semiconduttore, ai loro parametri, e ad aspetti avanzati sia dei modelli (modelli di trasporto non stazionario) che delle strutture (dispositivi ad eterostruttura) vengono trattati gli aspetti numerici della simulazione di dispositivi elettronici, necessari ad orientare i possibili utenti di programmi TCAD. Vengono infine proposti progetti su calcolatore da condursi mediante l'uso di strumenti TCAD.

## REQUISITI

*Dispositivi elettronici I*, consigliato *Dispositivi Elettronici II*

## PROGRAMMA

Il CAD tecnologico: simulazione di processo, dei dispositivi, circuitale. Problemi di interfacciamento fra fasi successive. Modelli fisici di semiconduttori. Il modello di deriva-diffusione. Parametri fisici del modello: proprietà di trasporto, fenomeni di RG. Richiami sulla struttura a bande dei semiconduttori e sulle proprietà statistiche in equilibrio e fuori equilibrio. Eterostrutture e dispositivi a eterostruttura. Trasporto parallelo e ortogonale in eterostrutture. Esempi di dispositivi a eterostruttura: HEMT, HBJT, LASER.

Modelli di trasporto non stazionario. L'equazione di Boltzmann. Il modello idrodinamico. Modelli di trasporto di energia. Modello di deriva-diffusione come caso limite. Parametri fisici del modello idrodinamico.

Il modello idrodinamico nei semiconduttori a più valli. *Overshoot* di velocità nel GaAs e InP. Il trattamento numerico dei modelli fisici. Il modello fisico in equilibrio termodinamico; l'equazione di Poisson-Boltzmann. Soluzione mediante differenze finite generalizzate. Discretizzazione del modello di deriva-diffusione: lo schema di Scharfetter-Gummel. Analisi DC, di piccolo segnale, tempovariante. Analisi speciali: analisi di rumore, analisi di *sensitivity*. Discretizzazione numerica di modelli idrodinamici.

**BIBLIOGRAFIA**

Vengono forniti appunti del docente che coprono tutti gli argomenti del corso.

Testi ausiliari:

S.Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, Springer 1985

J.Singh, *Physics of Semiconductors and their heterostructures*, McGraw-Hill 1993

**ESAME**

Consiste nell svolgimento e nella discussione orale di un progetto di simulazione numerica di dispositivi.

**E 192 0****Fisica degli stati condensati**

Anno: periodo 5:2    Lezioni: 8 ore settimanali

Docente: Tullio Regge

Scopo del corso è quello di presentare gli strumenti formali adatti per esplorare e descrivere la struttura della materia condensata ed in particolare quei fenomeni che afferiscono in modo naturale alle applicazioni tecnologiche.

**REQUISITI**

*Analisi Matematica I, II e III, Geometria, Fisica I e II, Struttura della Materia.*

**PROGRAMMA**

Il corso è grosso modo articolato in due grandi sezioni dedicate rispettivamente al concetto ed all'uso delle simmetrie nella fisica ed alla seconda quantizzazione ossia alla teoria quantistica dei campi. Le due sezioni hanno all'incirca peso uguale. Nella prima sezione del corso viene presentata gradualmente la teoria dei gruppi partendo da concetti elementari ed attraverso numerosi esempi. Viene illustrato il ruolo dei gruppi nella meccanica dei quanti ed il loro legame con le regole di selezione. Particolare attenzione viene dedicata al gruppo delle rotazioni ed ai gruppi simmetrici più semplici.

Vengono esaminate le rappresentazioni irriducibili del gruppo delle rotazioni, il concetto di momento angolare quantistico che ad esse è associato, la tecnica di composizione dei momenti angolari, l'uso dei caratteri.

Nella seconda parte del corso si inizia con una trattazione dell'elio liquido superfluido e dei dati empirici relativi. Viene introdotto in forma preliminare il concetto di fonone e di idrodinamica quantistica secondo la teoria di Landau. Da questo esempio si passa in modo naturale alla seconda quantizzazione del campo fononico e del campo scalare generico, alla statistica di Bose Einstein, alla trattazione del campo medio secondo la derivazione di Bogolubov, all'analisi delle curve di dispersione. Vengono discussi i vortici quantizzati nell'elio liquido, il meccanismo della superfluidità e la transizione di fase.

**BIBLIOGRAFIA**

Hamermesh, *Group Theory and its applications to physical problems.*

Barut Raczka, *Theory of group representations and applications*, World Scientific.

Khalatnikov, *An introduction to the theory of Superfluidity*, Addison Wesley, primi capitoli.

Galindo Pascual, *Quantum Mechanics II*, Springer Verlag, pp. 246-258.

**ESAME**

L'esame è orale.

**E 199 4****Fisica delle superfici**

(Corso ridotto)

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4 (ore settimanali)

Docente: Elena Tresso

Il corso si propone di fornire agli allievi una panoramica dei moderni problemi di fisica delle superfici, delle interfacce e dei processi di chemisorbimento. La fase di superficie viene presentata come una fase ben distinta della materia e ne vengono analizzate le principali proprietà chimiche, strutturali, elettroniche e ottiche. Inoltre, dal punto di vista metodologico, si intende presentare una descrizione operativa di alcune tecniche sperimentali e teoriche di largo uso in fisica delle superfici, ma del tutto trasferibili in altri contesti.

**REQUISITI***Fisica 1 e 2, Struttura della materia.***PROGRAMMA**

- Introduzione alla fisica della superficie; le cause e le conseguenze di una sperimentazione in ultra alto vuoto (UHV); metodi per la preparazione di superfici "pulite"; tecnologia UHV. [6 ore]
- Analisi chimica, individuazione delle specie atomiche superficiali con tecniche spettroscopiche (AES, SIMS). [4 ore]
- Proprietà morfologiche e strutturali di superfici e interfacce; approccio termodinamico al problema delle superfici; tensione superficiale; rilassamento, ricostruzione e difetti; celle e reticoli bidimensionali; metodi di indagine dello spazio reciproco (LEED, RHEED) e dello spazio diretto (SEM, STM); modelli strutturali delle interfacce solido / solido. [10 ore]
- Stati elettronici di superficie; teoria delle bande unidimensionale e tridimensionale; spettroscopia di fotoelettroni, metalli, semiconduttori covalenti e polari. [6 ore]
- Struttura elettronica delle superfici covalenti Si(100), Si(110), Si(111) non ricostruite. Principi che regolano il fenomeno di rilassamento e ricostruzione, ruolo dei *dangling bonds*. Ricostruzioni Si(111) 2x1 e 7x7, Si(100) 2x1. *Screening* e trasferimento di carica nei semiconduttori polari. Struttura elettronica della superficie neutra GaAs(110), ideale e rilassata. Superfici polari ricostruite GaAs(100) e (111). [6 ore]
- Proprietà ottiche: riflessione e rifrazione; eccitazioni elementari: eccitoni e plasmoni, fononi di superficie. [6 ore]
- Assorbimento sulle superfici solide; fisisorbimento e chemisorbimento. Chemisorbimento di metalli su semiconduttori: la giunzione metallo-semiconduttore. Desorbimento, reazioni superficiali, catalisi e crescita cristallina. [6 ore]
- Crescita di *film* sottili amorfi e microcristallini. [6 ore]

## LABORATORIO

Sono previste visite a laboratori di ricerca attivi sia presso il Dipartimento di Fisica che presso altri.

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

H. Luth, *Surfaces and interfaces physics*, Springer.

Testi ausiliari:

A. Zangwill, *Physics at surfaces*, Cambridge Univ. Press.

M. Prutton, *Surface physics*, Clarendon, Oxford.

## ESAME

L' esame consiste in una prova orale, suddivisa in due parti: una lezione di 25-30 minuti su un argomento scelto dal candidato; alcune domande su argomenti svolti durante il corso.

**E 326 5**

## **Meccanica dei materiali + Metallurgia meccanica**

(Corso integrato)

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali)  
80+40 (nell'intero periodo)

Docenti: Donato Firrao, Massimo Rossetto

Il corso si propone di fornire i concetti fondamentali e le principali applicazioni del comportamento meccanico dei materiali alle condizioni che portano alla frattura dei componenti strutturali sollecitati sia con carichi statici sia con carichi variabili. Vengono quindi affrontate le tematiche della meccanica della frattura e della fatica e sottolineati i possibili interventi progettuali sui componenti e sui materiali per evitare cedimenti in opera. Vengono inoltre analizzati vari metodi di controllo non distruttivo dei componenti.

### REQUISITI

*Scienza delle costruzioni, Tecnologia dei materiali metallici.*

### PROGRAMMA

- Richiami sullo stato di tensione e sulle ipotesi di rottura, modalità di cedimento dei materiali. [8 ore]
- Fattori di concentrazione delle tensioni in campo elastico e in campo plastico. [8 ore]
- Meccanica della frattura lineare elastica: approccio energetico, tasso di rilascio energetico ( $G$ ); descrizione di campo di tensione e di deformazione all'apice di una cricca; fattore di intensità delle tensioni; deformazioni plastiche all'apice di una cricca. [8 ore]
- Prove di tenacità alla frattura secondo le normative, fattori che influenzano la tenacità alla frattura; tenacità alla frattura di diversi materiali anche in funzione dei trattamenti termici e alle tecnologie di produzione. Cenni al problema della tensio-corrosione. [8 ore]
- Arrotondamento all'apice di una cricca (COD-CTOD), curve di resistenza (curve  $R$ ); integrale  $J$ ; cenni di meccanica della frattura elastoplastica. [8 ore]
- Controlli non distruttivi e catalogazione dei difetti. [10 ore]
- Fatica: approccio alla fatica con la meccanica della frattura; legge di Paris, il fenomeno del ritardo. Aspetti micro- e macroscopici della fatica. [8 ore]
- Fatica ad alto numero di cicli: diagrammi SNP, metodi di determinazione delle curve di fatica, fattori che influenzano la vita a fatica, effetto degli intagli, effetto delle tensioni medie e diagrammi di fatica; fatica con carichi di ampiezza variabile: ipotesi di danneggiamento cumulativo. [12 ore]
- Fatica oligociclica e approcci a due stadi: equazione di Manson Coffin. [4 ore]
- Fatica multiassiale: approcci classici e approcci tipo piano critico. [4 ore]

## ESERCITAZIONI

1. Verifica statica di componenti. [4 ore]
2. Applicazioni della meccanica della frattura in campo statico. [4 ore]
3. Determinazione della tenacità alla frattura e dell'integrale  $J$  critico. [4 ore, parte in laboratorio]
4. Frattografia e morfologia delle fratture. [4 ore, parte in laboratorio]
5. Controlli non distruttivi. [2 ore, in laboratorio]
6. Applicazioni della legge di Paris. [4 ore]
7. Verifiche a fatica. [4 ore]

BIBLIOGRAFIA. Dispense parziali fornite dai docenti. Eventuali testi di approfondimento verranno segnalati dai docenti durante il corso.

Anno: periodo 4,5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 8+10 (ore settimanali)

Docente: Ivo Montrosset

In questi ultimi anni un crescente sviluppo hanno avuto le tecniche ottiche di trasmissione dell'informazione e di elaborazione dei segnali. In questo corso, partendo da una descrizione fenomenologica degli effetti fisici utilizzati ed arrivando ad un modello quantitativo, utile per la progettazione e valutazione delle caratteristiche sistemistiche, vengono studiati dispositivi optoelettronici utilizzati prevalentemente nelle comunicazioni ottiche e nell'elaborazione ottica dei segnali.

Rilevanza viene data ai problemi più ingegneristici di carattere realizzativo ed applicativo.

#### REQUISITI

*Campi elettromagnetici I*

#### PROGRAMMA

##### Dispositivi e sistemi per la trasmissione in fibra ottica

*Introduzione ai materiali ed alle tecnologie per l'optoelettronica e l'ottica integrata [12 ore]*

Caratteristiche fisiche dei materiali semiconduttori; effetto iniezione portatori, pompaggio ottico, guadagno, elettro assorbimento e rifrazione, non linearità ottiche etc. in materiali di varia dimensionalità (massivi, quantum well, wire, box)

*Cenni sulle guide dielettriche [8 ore]*

Guide planari per componenti optoelettronici integrati in materiali semiconduttori, Niobato di Litio e vetri

*Formulazione e rappresentazione degli effetti di interazione in guide dielettriche integrate [8 ore]*

Presentazione sintetica della teoria dell'accoppiamento modale, reticoli, effetti elettroottico ed acustoottico

*Laser a semiconduttore [24 ore]*

Laser *Fabry-Perot*: equazioni di bilancio, caratteristiche statiche, monomodaltà, modulazione elettrica, larghezza riga. Laser a reazione distribuita: strutture tipo DBR e DFB, multielettrodo e multisezione per il controllo spettro, modulazione, accordabilità e larghezza di riga. Amplificatori ottici: strutture ad onda progressiva e risonanti, caratteristiche spettrali, guadagno, saturazione, uso come interruttore, filtro attivo, etc..

Laser ad emissione e a cavità verticale

*Dispositivi a semiconduttore non lineari [8 ore]*

Effetti non lineari in guide, principi, formulazione. Bistabilità ottica in laser ed amplificatori. Convertitori di frequenza: in laser, amplificatori, nuove strutture

*Dispositivi attivi in fibre e guide drogate con terre rare [8 ore]*

Pompaggio ottico, formulazione problema, amplificatori, laser

*Modulatori elettroottici integrati [12 ore]*

Effetti usati in semiconduttori,  $\text{LiNbO}_3$ , materiali polimerici; strutture di modulatori di ampiezza e fase, con elettrodi concentrati od in onda continua; commutatori, etc.

*Fotodiodi* [4 ore]

Principi, materiali, parametri caratterizzanti, strutture (PIN, APD, SAM, SAGM), front-end ottico

*Modulatori acusto-ottici integrati* [8 ore]

Principi, materiali, formulazione interazione acusto-ottica, deflettori di fascio, filtri accordabili, analizzatore di spettro, etc.

*Integrazione optoelettronica e fotonica* [2 ore]

Prospettive, integrazione ibrida e monolitica, realizzazioni, OEIC, PIC

Elaborazione ottica ed interconnessioni ottiche [ 10 ore ]

Coerenza del segnale ottico, lenti come processori ottici, tecniche di filtraggio, cenni di olografia, ologrammi generati a calcolatore ed interconnessioni olografiche, riconoscimento ottico

Elaborazione ottica in cristalli non lineari: fotorifrazione, mescolazione a 2 e 4 onde, coniugazione di fase, applicazioni

## ESERCITAZIONI

Non esiste una separazione fra esercitazioni e lezioni.

Nei laboratori (10 ore) verrà mostrata l'utilizzazione di strumentazione ottica per la caratterizzazione di laser a semiconduttore e guide ottiche.

## BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento

Viene distribuito materiale sotto forma di appunti e fatto riferimento a capitoli di libri ed articoli

Anno:periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2+(2) (ore settimanali)

Docente: Elio Miraldi

Vengono approfonditi i principali elementi dell'ottica ondulatoria: interferometria, diffrattometria, polarizzazione, e gli aspetti quantistici dell'interazione luce-materia: effetto fotoelettrico e i fotorivelatori. Si descrivono i principali effetti fisici che stanno alla base del funzionamento di trasduttori, sensori e convertitori ottici. Lo studio delle proprietà ottiche dei materiali anisotropi, come ad esempio i cristalli liquidi, e lo studio dei principali mezzi di indagine in campo ottico, porterà lo studente a comprendere le più recenti applicazioni nella fisica dello stato condensato, svolte sia nel Dipartimento di Fisica sia in altri centri di ricerca.

#### REQUISITI

Il corso non richiede che la conoscenza delle leggi fondamentali già acquisite con i corsi di *Fisica 1 e 2*, oltre ad una familiarità con l'analisi di Fourier.

#### PROGRAMMA

- Interferenza. Propagazione e somma di onde sinusoidali: interferenza di due onde sferiche. L'esperimento di Fresnel-Arago. Localizzazione delle frange. Possibile estensione della sorgente. Sorgente quasi-monocromatica: *channeled spectrum*. La funzione *visibility*.
- L'interferenza con lamine piane. Interferometro di Fizeau. Uso metrologico e localizzazione delle frange con lamine a cuneo. Possibile estensione della sorgente. L'interferometro di Michelson. Lunghezza di coerenza, tempo di coerenza. Calcolo della *visibility* per alcune tipiche distribuzioni spettrali. Relazione di reciprocità.
- La Fourier Transform Spectroscopy e sue applicazioni pratiche. Misura della trasmittanza e della riflettanza di un materiale. L'assorbimento, la risonanza, la dispersione anomala. L'interferometro di Michelson come schema di eterodina ottico per la rivelazione di battimenti tra modi di un laser. Suo uso pratico per la stabilizzazione in frequenza di un laser.
- Interferometria ad onde multiple. L'interferometro di Fabry e Perot. Lo studio di una cavità risonante con specchi piani e sferici. La diffrazione della luce. Il principio di Huygens-Fresnel. La lamina di Lummer e Gehrke, il reticolo di diffrazione. La teoria di Abbe della formazione delle immagini. L'olografia e l'interferometria olografica.
- Polarizzabilità molecolare. Transizioni di dipolo elettrico. Smorzamento radiativo e raggio classico dell'elettrone. Teoria classica dell'indice di rifrazione: mezzi diluiti, mezzi condensati, campo locale. Relazione tra le parti reale e immaginaria della costante dielettrica: relazione di Kramers-Kronig. Diffusione della luce: *scattering* di Rayleigh e di Mie.
- La polarizzazione delle onde luminose. Interferenza di onde polarizzate. Superfici d'onda in mezzi birifrangenti. Onde e raggi in cristalli uniassici. Le matrici di Jones. I vettori di Stokes. La sfera di Poincaré. Figure ortoscopiche e figure conoscopiche

al microscopio polarizzatore. Effetti elettro-ottici, magneto-ottici e acusto-ottici e loro principali applicazioni.

- Mesofasi, cristalli liquidi: loro classificazione. Transizioni di fase. Proprietà viscoso ed elastiche dei liquidi anisotropi: l'elasticità di curvatura. Principali tipi di celle a cristallo liquido. Trasmittanza e riflettanza di una cella avente la direzione molecolare media distorta da campi elettrici e magnetici: la transizione di Fredericks. Cenni di dinamica dei cristalli liquidi nematici: tempi di risposta.
- Quanti di luce. L'effetto fotoelettrico. Il foto-moltiplicatore per la rivelazione della luce. Risposta spettrale dei fotocatodi, efficienza di conversione, corrente buia. L'uso di fotomoltiplicatori in regime di funzionamento *single-photon*. I rivelatori a stato solido: fotodiodi, celle solari e Light Emitting Diode o laser a semiconduttore.
- La radiazione elettromagnetica dal punto di vista fotometrico. Rapporto tra le grandezze integrali e spettrali radiometriche e fotometriche. L'unità di misura: candela, e le unità di misura derivate. Elementi di colorimetria secondo le norme CEI. Principali caratteristiche dell'occhio come strumento rivelatore di luce.

## ESERCITAZIONI

Le esercitazioni vengono svolte il più possibile a ridosso delle lezioni e riguardano applicazioni sull'argomento svolto nelle lezioni stesse. Vengono svolte in alternativa ai laboratori.

## LABORATORIO

Le esercitazioni di laboratorio vengono svolte presso laboratori di ricerca sia presso il Dipartimento di Fisica che presso altri centri di ricerca come: CSELT, CNR, IEN "G. Ferraris", CR FIAT. Presso i laboratori del Dipartimento si possono seguire ad esempio ricerche sui *film* sottili mediante l'analisi di spettri di trasmissione, analisi di rumore nella luce diffusa da cristalli liquidi, dilatomètria con interferometro Fizeau. Presso gli altri centri di ricerca si eseguono visite per stabilire contatti su argomenti concordati di volta in volta, riguardanti applicazioni specifiche della materia svolta.

## BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

Bruno Rossi, *Ottica*, Masson, 1988.

G.S. Landsberg, *Ottica. Vol. 1 e 2*, Mir, Mosca, 1980.

G. Rigault, *Elementi di ottica cristallografica*, Levrotto & Bella, Torino, 1965.

Testi ausiliari:

M. Born, E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon, Oxford, 1985.

K. Iizuka, *Engineering optics*, Springer, 1985.

## ESAME

L'esame consta di una prova scritta, riguardante un argomento specifico trattato al corso, svolta dallo studente sotto la forma di una tesina, descritta, commentata e corredata di argomentazioni più generali in sede di esame orale.

**E 437 0****Proprietà termofisiche dei materiali**

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali)  
60+40 (nell'intero periodo)

Docente: Giuseppe Ruscica

Il corso si propone di dare all'allievo gli elementi per una conoscenza approfondita dei meccanismi di trasporto di massa e di energia nei materiali in funzione delle loro caratteristiche intrinseche (es. struttura cristallina, amorfa, composita ecc.), e quindi di individuare e definire le relazioni tra le proprietà microscopiche e le proprietà termofisiche che li caratterizzano. Contemporaneamente, per ogni singolo argomento viene dato un quadro generale delle varie metodologie di misura, ed alcune di esse vengono sviluppate ed applicate con esercitazioni di laboratorio.

**REQUISITI**

È propedeutica la conoscenza delle nozioni acquisite nei corsi di *Fisica tecnica* e di *Struttura della materia*.

**PROGRAMMA**

– *Richiami di trasmissione del calore.* [2 ore]

Trasmissione del calore per conduzione.

Equazione di Fourier e definizione di conduttività termica.

Conduzione mono- e pruridimensionale nei solidi.

Tensore delle conduttività.

Definizione degli assi principali e dell'ellissoide di conduzione.

– *Cenni sulla teoria della conduttività termica nei fluidi.* [2 ore]

Relazioni tra conduttività termica e altri coefficienti di trasporto.

Forze e potenziali intermolecolari. Equazione di bilancio dell'energia totale in termini statistici.

Funzioni di distribuzione ed equazione di Liouville–Boltzmann.

– *La conduzione termica nei gas.* [2 ore]

Applicazione della teoria cinetica dei gas.

Gas diluiti. Potenziale di LennardJonnes.

Modello di Enskog e Chapman per gas monoatomici.

Molecole poliatomiche. Modello di Pidduck. Approssimazione di Eucken.

Gas densi. Teoria di Enskog. Modello di LonguetHiggins.

– *La conduzione termica nei liquidi.* [2 ore]

Modello di Horrocks e McLaughlin.

Modello di Rice e Kirkwood.

Principio degli stati corrispondenti.

– *Teoria fenomenologica della conduzione termica nei solidi.* [8 ore]

Conduzione Elettronica. Rapporto di Lorenz e legge di Wiedemann–Franz.

Conduzione fononica. Onde reticolari. Approssimazione di Einstein. Approssimazione di Debye.

- Processi di interazione e di *scattering*. Interazione anarmonica di fononi. *Scattering* di fononi e *scattering* di elettroni.
- *Conduzione termica nei materiali metallici*. [2 ore]
- Conduttività termica elettronica.  
Conduttività termica fononica.  
Resistività termica intrinseca e resistività termica residua.  
La conduttività termica dei metalli reali.
- *Conduzione termica nei materiali non metallici*. [4 ore]
- Conduttività del reticolo.  
Comportamento ad alta temperatura.  
Comportamento a bassa temperatura.
- *Boundary resistance*. Imperfezioni reticolari.
- Semi-metalli, semiconduttori, solidi amorfi.  
Materiali porosi. Contributo fotonico.  
Effetto della pressione. Cenni sulla conduttività reticolare nelle leghe.
- *La radiazione termica nei materiali semitrasparenti*. [6 ore]
- Richiami sulle definizioni e leggi fondamentali di propagazione della radiazione  
Richiami sulla radiazione attraverso un mezzo grigio e trasparente.  
Definizione di mezzo semitrasparente e delle sue proprietà di trasporto.
- *Scattering*: funzione di fase e cenni sulla teoria di Mie e di Rayleigh.
- Equazione del trasporto radiativo per un mezzo assorbente, emittente e scatterante.  
Casi limite: mezzo otticamente spesso e sottile.  
Equilibrio radiativo. Approssimazione di Rosseland.
- *Trasmissione per radiazione e conduzione in matrici porose*. [2 ore]
- Trasmissione combinata di radiazione e conduzione. Soluzioni semplificate dell'equazione integro-differenziale dell'energia.  
Parametri caratteristici del trasporto combinato. Caso dei materiali isolanti e dei TBC (Thermal Barrier Coating) per temperature elevate.
- *Effetto delle temperature criogeniche sulle proprietà termofisiche*. [8 ore]
- Effetti sulle proprietà meccaniche, termiche, elettriche e magnetiche.  
Cenni sulla superconduttività .  
Superconduttori di tipo I, II e III.  
Temperatura di transizione, resistenza elettrica, persistent current, effetto Meissner.  
Teoria di London. Quantizzazione del flusso, *gap* di energia, interazione fonone – elettrone e coppie di Cooper.  
Cenni sulla teoria BCS. Stabilità e *quench*.  
Parametri ingegneristici di rilievo e relativi metodi di misura.  
Cenni ai superconduttori HTSC. Applicazioni.
- *Teoria della diffusione dei gas in matrici metalliche*. [6 ore]
- Classificazione e caratteristiche generali delle interazioni gas metallo. Adsorbimento fisico. Chemisorzione. Assorbimento.  
Interazione H<sub>2</sub> – metallo. Cenni alle teorie dell'orbitale molecolare e delle bande e legami di superficie.  
Adsorbimento di molecole ed atomi. Processi superficiali. Calori di adsorbimento.
- *Diffusione nei metalli e principali effetti diffusivi*. [6 ore]
- Modello classico, I e II legge di Fick, Cenni alle soluzioni della seconda legge Meccanismo delle vacanze. Meccanismo interstiziale. Meccanismo a catena. Effetto Soret.

Solubilità, legge di Sievert, legge di Henry, influenza della temperatura, legge di Arrhenius, metodi di misura ed esempi di installazioni sperimentali.

Teoria del *trapping*. Diffusione di idrogeno, deuterio e trizio in mono cristalli di Ni e Cu. Effetto dei gas disciolti sulle caratteristiche elettriche dei metalli.

– *Teoria della dilatazione termica*. [4 ore]

Coefficienti di dilatazione cubica e lineare.

Capacità termica a pressione e a volume costante. Compressibilità isoterma ed isoentropica.

Determinazione quantica delle proprietà termofisiche di un cristallo. Cristalli metallici e cristalli non metallici.

Relazione di Gruneisen.

– *La dilatazione termica nei solidi*. [4 ore]

Non metalli per temperature maggiori della temperatura di Debye.

Non metalli per temperature minori della temperatura di Debye.

Metalli per temperature maggiori della temperatura di Debye.

Metalli per temperature maggiori della temperatura di Debye.

Quarzo e silicati.

Materiali compositi in fibra di carbonio.

*Cenni sull'effetto del vapor d'acqua sui materiali in fibra*. [2 ore]

Dilatazione massica lineare e cubica.

*Swelling*.

## LABORATORIO

1. Tecniche di misura della conduttività e delle diffusività termica. Misura della diffusività termica col metodo *flash*. Analisi dei risultati. [6 ore]
  2. Tecniche di misura delle proprietà radiative superficiali. Misure spettrali della riflettività e del coefficiente di assorbimento monocromatico di superfici metalliche e di vernici. Analisi dei risultati. [6 ore]
  3. Misure della riflettività e del coefficiente di assorbimento totale direzionale di superfici metalliche e di vernici. [4 ore] Analisi dei risultati. [4 ore]
  4. Tecniche di misura delle proprietà termottiche dei materiali semitrasparenti. Misure del coefficiente di estinzione e della trasmisività di materiali porosi. Analisi dei risultati. [4 ore]
  5. Misura delle conduttività col metodo della lastra piana su materiali isolanti in regime stazionario. Analisi dei risultati. [4 ore]
  6. Teoria dei problemi inversi e stima dei parametri. Applicazione alla misura delle conduttività con metodi transitori su materiali isolanti. [6 ore]
  7. Tecniche di misura del coefficiente di dilatazione dalla temperatura ambiente a temperature criogeniche. Misure capacitive e interferometriche su campioni metallici. Analisi dei risultati. [8 ore]
  8. Tecniche di misura della capacità termiche dei materiali. [2 ore]
- Sono previste visite ai laboratori del CNR, Istituto Metrologico "G. Colonnetti" e IEN "Galileo Ferraris".

## BIBLIOGRAFIA

Appunti delle lezioni e materiale didattico fornito durante il corso.

Testi ausiliari, per approfondimenti:

W.Z. Kresin, S.A. Wolf, *Fundamentals of superconductivity*, 1982.

E.M. Savitskii, *Superconducting materials*, Plenum, 1973.

E.M. Sparrow, R.D. Cess, *Radiation heat transfer*, McGraw-Hill, 1978.

Sherwmon, *Diffusion in solids*, McGraw-Hill, 1963.

R.P. Tye, *Thermal conductivity. Vol. I, II*, Academic Press, 1979.

R. Zemansky, *Calore e termodinamica*, Zanichelli, Bologna.

## ESAME

Gli argomenti di esame corrispondono a tutto il programma svolto compresi quelli operativi affrontati nelle esercitazioni di laboratorio.

L'esame si svolge in un'unica fase e consiste nella discussione delle relazioni inerenti i risultati sperimentali delle misure di laboratorio. Durante la discussione vengono poste tre / quattro domande di carattere teorico generale sui temi trattati a lezione. La durata complessiva dell'esame è compresa fra 45 e 60 minuti.

Il voto finale è basato su un giudizio complessivo sia sull'attività svolta durante l'anno sia sui risultati del colloquio finale, badando più agli aspetti concettuali che all'apprendimento mnemonico.

**E 464 0****Scienza e tecnologia dei materiali compositi**

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali)

78+26 (nell'intero periodo)

Docente: Francesco Marino

I materiali compositi sono caratterizzati dal possedere proprietà meccaniche, fisiche, chimiche modulabili in funzione delle esigenze primarie della struttura complessiva, offrendo così all'ingegnere diversificate soluzioni progettuali. Il corso propone principi fondamentali, criteri progettuali, tecnologie di processo, proprietà micro- e macroscopiche per questa innovativa classe di materiali.

**PROGRAMMA***Introduzione.*

Definizione di materiale composito. Classificazione per tipo di matrice e rinforzante.

*Meccanismo di trasferimento degli sforzi.*

Interfaccia, adesione, reattività, aspetti strutturali. Trasferimento degli sforzi. Dimensioni e frazioni volumetriche del rinforzante minime e critiche.

*Matrici* ceramiche, metalliche, polimeriche, vetrose: loro proprietà.*Rinforzanti*: particelle, *whiskers*, fibre corte e fibre lunghe, proprietà e tecnologie produttive.*Compositi con particelle in varie matrici.*

Tecnologie produttive, proprietà meccaniche e fisiche. Previsioni delle proprietà e modelli.

*Compositi con fibre lunghe in varie matrici.*

Tecnologie produttive, proprietà meccaniche e fisiche. Previsioni delle proprietà e modelli.

*Compositi particolari*: multistrati, *in situ*, riporti su substrati.

Applicazioni.

**ESERCITAZIONI**

Tecniche preparative, analitiche, prove meccaniche.

**E 468 2****Scienza e tecnologia dei materiali polimerici 2**

Anno: periodo 5:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 5+2 (ore settimanali)  
65+26 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Aldo Priola

Il corso di propone di approfondire le conoscenze sui materiali polimerici, con particolare riguardo ad applicazioni di tipo specialistico e in settori avanzati. Verranno esaminate le correlazioni tra le proprietà e la struttura molecolare e la morfologia di questi materiali, nonché le tecnologie di trasformazione impiegate nei diversi settori applicativi.

**REQUISITI**

Si richiede di aver superato l'esame di *Scienza e Tecnologia dei Materiali Polimerici I*.

**PROGRAMMA**

*Proprietà fisiche e termo-meccaniche dei polimeri.* [8 ore]

Morfologia dei polimeri amorfi e cristallini. Controllo della cristallizzazione. Proprietà di solubilità. Rigonfiamento.

Caratteristiche visco-elastiche: viscoelasticità lineare e non lineare. Variazione delle proprietà meccaniche in funzione della temperatura e del tempo; equazione WLF. Apparecchiature per misure di proprietà viscoelastiche: tecniche di analisi dinamomeccanica.

*Materiali polimerici con elevate proprietà chimiche e meccaniche.* [12 ore]

Esame di strutture polimeriche termoplastiche e termindurenti, aventi elevate proprietà termo-meccaniche. relazioni struttura-proprietà.

Esempi di tecnopolimeri industriali: poliacetali, nylons, policarbonati, poliesteri, polifenilenoossido. tecnopolimeri avanzati: proprietà, tecnologie di trasformazione e principali settori applicativi. Polisolfone, polifenilenoossido, polieterechetone.

*Polimeri con alta resistenza chimica, all'ambiente e all'invecchiamento* [8 ore]

Meccanismi di degradazione termica, ossidativa e fotochimica nei polimeri. Strutture polimeriche con elevata stabilità chimica. Esempi di polimeri industriali: polimeri acrilici, polimeri fluorurati, siliconi, gomme speciali. Additivi per la stabilizzazione dei polimeri; additivi antifiamma.

*Materiali polimerici per impiego nel campo delle vernici, dei film barriera e degli adesivi.* [14 ore]

Meccanismi di adesione dei polimeri con i diversi substrati. Proprietà dei polimeri per film, vernici e rivestimenti protettivi. Principali classi di polimeri per questi impieghi. Tecnologie di applicazione e reticolazione. Polimeri per film barriera: permeazione di gas e di liquidi attraverso film polimerici e meccanismi di diffusione. Adesivi reversibili e strutturali: tipi di polimeri e tecnologie di impiego. Trattamenti superficiali sui materiali polimerici: fiamma, scarica corona, plasma.

*Polimeri per impiego in campo elettrico, elettronico e materiali per l'ottica.* [12 ore]

Proprietà elettriche dei polimeri in relazione alla struttura, polimeri isolanti, semiconduttori, conduttori; polimeri piezoelettrici. Tecnologie dei polimeri per l'elettronica: circuiti stampati, fotolitografia, tecniche di fotoreticolazione e fotodegradazione. proprietà ottiche lineari e non lineari in relazione con la struttura; cristalli liquidi polimerici, polimeri per fibre ottiche.

*Polimeri per uso biomedico.* [4 ore]

La biocompatibilità dei polimeri: tecniche di trattamento superficiale. Principali tipi di polimeri biomedici e loro impieghi. Biodegradabilità: esempi di strutture biodegradabili e loro impieghi.

*Miscele e leghe polimeriche.* [3 ore]

Criteri di miscibilità tra materiali polimerici. Morfologia di miscele e dispersioni polimeriche. Additivi interfacciali. Esempi di blends industriali, proprietà ed impieghi.

*Materiali polimerici e ambiente.* [4 ore]

Tecnologie di riciclo e smaltimento dei rifiuti plastici. Riciclo meccanico e chimico. Pirolisi e impiego dei rifiuti polimerici come combustibile.

## ESERCITAZIONI E LABORATORI

Sono previste sia esercitazioni in aula con esemplificazioni e applicazioni di calcolo sugli argomenti di lezione, sia esercitazioni sperimentali di laboratorio con squadre a numero limitato di allievi. Si effettueranno visite ad impianti di trasformazione di materie plastiche e a laboratori di ricerca in settori specialistici dei materiali polimerici.

## BIBLIOGRAFIA

D.W. Van Krevelen, *Properties of Polymers*, Elsevier Publ. Amsterdam, 3rd ed., 1990.

L.E. Nielsen, *Mechanical properties of polymers and composites*, 2nd ed.

M. Dekker, New York, 1994.

## ESAME

L'esame consiste in una prova orale relativa a tutto il programma del corso.

**E 534 1****Struttura della materia(sperimentale)**

Anno:periodo 5:2

Docente: Renato Gonnelli

L'obbiettivo del corso è quello di permettere a gli studenti dell'ultimo anno di partecipare ad esperimenti avanzati di fisica. Una parte introduttiva di circa venti ore è dedicata alla strumentazione base di un laboratorio moderno. Ogni esperimento è introdotto da un esame teorico degli aspetti fondamentali della fisica che sono necessari a capire l'esperimento stesso.

**PROGRAMMA**

- Parte introduttiva di carattere generale, dedicata all'apprendimento dell'uso della strumentazione di base per acquisizione dati. [20 ore]
- Misure di topologia delle superfici di materiali metallici e isolanti a livello atomico mediante AFM (microscopia a forza atomica); microscopia e spettroscopia di materiali metallici con risoluzione atomica mediante STM (microscopia *tunnel* a scansione) in aria e a temperatura ambiente.
- Resistività di metalli e di semiconduttori in funzione della temperatura tra 20 e 300 K.
- Magnetoresistenza ed effetto Hall.
- Spettroscopia Raman per la determinazione delle componenti ottiche dello spettro fononico.
- Misure di calore specifico mediante DSC (calorimetria differenziale a scansione) per la determinazione del calore specifico fononico, della temperatura di Debye, e, per temperature superiori alla temperatura di Debye, della componente elettronica del calore specifico in materiali metallici (tra -100 °C e 500 °C).
- Misure di suscettività magnetica complessa in a.c. a diverse frequenze, in funzione della temperatura e del campo applicato, per sistemi dia- e paramagnetici.
- Cicli di magnetizzazione in continua per superconduttori ad alta TC. Determinazione della irreversibility line.
- La transizione superconduttiva.  $R$  vs  $T$  per materiali ad alta TC. Caratteristiche  $E$  vs  $J$  a campo nullo e in campo magnetico. Energia di pinning del flusso magnetico.
- Misure di effetto Josephson in giunzioni planari, a punta di contatto o a rottura in superconduttori a bassa ed alta TC (tra 4.2 e 300 K).
- Spettroscopia tunnel in giunzioni planari, a punta di contatto, o a rottura, aventi elettrodi nello stato normale ed in quello superconduttore (tra 4.2 e 300 K).

**BIBLIOGRAFIA**

Testi generali di fisica dello stato solido, ad es.

Kittel, *Introduzione alla fisica dello stato solido*, Boringhieri.

**E 540 4****Superconduttività**

(Corso ridotto)

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4 (ore settimanali)  
50 (nell'intero periodo)

Docente: Mario Rasetti

Il corso è inteso fornire una professionalità specifica a chi voglia affrontare professionalmente problemi avanzati nell'ambito dei nuovi materiali, anche non necessariamente superconduttori. Più in particolare, naturalmente, esso mira a fornire, a quegli studenti che fanno un uso applicativo esteso delle proprietà dei superconduttori, una comprensione profonda dei meccanismi fisici, dei fenomeni microscopici, dei metodi di misura e dei modelli concettuali di rappresentazione di tali materiali. Dato il livello alto di difficoltà e di aggiornamento, il corso è strumento professionale importante per chi intenda affrontare tali argomenti in un ambito di ricerca. Nel passato, dalla frequenza al corso sono spesso scaturite tesi di laurea interessanti (nell'ambito della scienza dei materiali, della fisica dello stato condensato, dello studio dei sistemi quantistici a molti corpi).

**PROGRAMMA**

Le tre parti del corso – che ha durata complessiva di 55 / 60 ore – hanno peso approssimativamente uguale (di circa 20 ore ciascuna). Le lezioni sono accompagnate da esercitazioni, che consistono essenzialmente nella visita a laboratori di ricerca, in cui gli studenti assistono alla esecuzione di esperimenti, per un totale di circa 8 ore. Sono prerequisiti essenziali i corsi di matematica e fisica generali e i complementi di matematica; raccomandabili uno o due corsi di "fisica moderna" (che diano allo studente le nozioni di base di meccanica quantistica di "prima quantizzazione" e di meccanica statistica). Tutti gli elementi concettuali non istituzionali necessari vengono esaurientemente forniti durante il corso stesso; esistono tuttavia buoni testi di riferimento, che vengono indicati.

– *La prima parte* è dedicata alla descrizione delle proprietà caratteristiche dei materiali superconduttori, della fenomenologia relativa e dei più importanti esperimenti che consentono di mettere in rilievo e caratterizzare tali proprietà. Vengono descritti la dipendenza della resistività dalla temperatura assoluta nella fase normale, nella fase superconduttrice e alla transizione; l'effetto Meissner – che corrisponde al passaggio, alla temperatura critica, da comportamento paramagnetico (ad alta temperatura) a diamagnetico (a bassa temperatura); il fenomeno delle correnti persistenti; la resistenza e le tecniche di misura del *gap* nello spettro energetico. Per i superconduttori ad alta temperatura critica viene discussa la complessa struttura chimica e cristallografica.

– *La seconda parte* del corso consiste di una accurata rassegna dei modelli e delle teorie fisiche che consentono di descrivere il fenomeno della superconduttività. Dopo lo studio delle teorie fenomenologiche di London e di Landau–Ginburg, viene affrontata la teoria microscopica BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer). Tale teoria è basata su concetti profondi e complessi di meccanica e meccanica statistica quantistiche, dei cui elementi fondamentali viene data una rassegna. Si discutono i principi della seconda quantizzazione, le proprietà statistiche collettive di sistemi di particelle di Fermi (in

particolare come queste possano formare stati legati) e di Bose (con il fenomeno della condensazione a bassa temperatura). Si richiamano altresì elementi di fisica dello stato solido: il concetto di banda di energia, il teorema di Bloch, le relazioni di dispersione dei fononi. Mediante tutti questi strumenti la teoria BCS viene descritta sia nella versione a temperatura zero (stato fondamentale) sia in quella a temperatura non-nulla, ricavandone tutte le proprietà termodinamiche, di equilibrio e non, interessanti. Per i superconduttori ad alta temperatura critica viene fatto un cenno alle più moderne teorie (modello di Hubbard e sue generalizzazioni) attualmente prese in considerazione.

– *La terza parte* del corso è dedicata alle applicazioni. Vengono descritti e analizzati gli utilizzi nel trasporto di corrente elettrica, nell'accumulo di energia, nella meccanica (tramite la levitazione: trasporti, cuscinetti a levitazione magnetica). Si studia poi l'effetto Josephson e la sua applicazione negli SQUID (*Quantum Interference Superconductive Devices*) per usi metrologici, di diagnostica medica, ecc.

Anno: periodo 5:1

Docente: Rosolino Ippolito

### REQUISITI

Il corso è strettamente collegato con i corsi di *Disegno tecnico industriale*, *Disegno di macchine + Tecnologia meccanica* e *Tecnologia dei materiali metallici*. Essenziale è infatti la lettura del disegno e la conoscenza delle principali lavorazioni meccaniche con le relative macchine utensili. È inoltre richiesta la conoscenza di alcuni degli argomenti trattati nei corsi di *Meccanica applicata* (trasmissione del moto, attrito di strisciamento e di rotolamento, ruote dentate, vibrazioni di sistemi a più gradi di libertà) e di *Scienza delle costruzioni* (teoria delle travi, cerchi di Mohr, teorie di Tresca e Von Mises).

### PROGRAMMA

– *Processi di fabbricazione per fusione*. [8 ore]

Si illustrano gli elementi generali delle tecnologie di fonderia e i diversi metodi di formatura, sia in forma transitoria che in forma permanente. Gli argomenti trattati sono la solidificazione dei metalli (ritiro, materozza, dimensionamento del modello), le fusioni in forma transitoria (in terra, *cold box*, *shell molding*, microfusione), le fusioni in forma permanente (in conchiglia a gravità e sotto pressione, pressofusione, fusione centrifuga).

– *Lavorazioni per deformazione plastica*. [16 ore]

Dopo aver illustrato il comportamento dei materiali metallici in campo plastico, si introducono i concetti elementari della teoria della plasticità, attraverso l'uso delle ipotesi di Tresca e Von Mises. Si procede poi a illustrare le varie tecnologie di lavorazione dei metalli per deformazione plastica e per ciascuna di esse si forniscono formule semplificate per il calcolo delle grandezze principali in gioco: laminazione, estrusione, trafilatura, stampaggio, lavorazioni delle lamiere (piegatura, calandratura, imbutitura, tranciatura).

– *Attrezzature di bloccaggio*. [8 ore]

Vengono fornite le nozioni fondamentali relative alla progettazione delle attrezzature di bloccaggio utilizzate per la lavorazione dei particolari sulle diverse macchine utensili.

– *Aspetti economici delle lavorazioni meccaniche*. [6 ore]

Sono spiegati i criteri seguiti per l'ottimizzazione dei dati tecnologici nelle lavorazioni con asportazione di truciolo e il metodo impiegato per la scelta tra cicli in alternativa.

– *Macchine utensili a controllo numerico*. [26 ore]

Il controllo numerico rappresenta oggi la tecnica fondamentale seguita per l'automazione delle macchine utensili. Le lezioni forniscono un quadro generale di tale tecnologia, sia con riferimento agli aspetti *hardware* che agli aspetti *software*. Generalità sul controllo numerico. Struttura e componentistica meccanica: comportamento dinamico della MIJ, guide, mandrini, servomotori elettrici ed idraulici, trasduttori, dispositivi di cambio utensili. Unità di governo ed interpolatore. Tipologie delle macchine a CN: macchine di tipo *stand alone*, celle di lavorazione, linee flessibili (FMS).

– *La saldatura.* [6 ore]

Viene dato un breve cenno sulle diverse metodologie di saldatura e sui problemi connessi con l'uso di tale tecnica di assemblaggio. Saldatura autogena ossiacetilenica. Saldatura autogena ad arco: con elettrodo rivestito, TIG, MIG, MAG, ad arco sommerso. Saldatura autogena elettrica per resistenza. Saldatura eterogenea: brasatura e saldo-brasatura. Difettologia dei giunti saldati.

– *Processi chimico-fisici di lavorazione.* [8 ore]

L'ultima parte del corso è dedicata ad una breve carrellata sui processi non convenzionali di lavorazione, alcuni dei quali peraltro sono divenuti di largo impiego in alcuni settori dell'industria meccanica tradizionale mentre altri rimangono confinati in settori specialistici. Più diffusamente vengono illustrati l'elettroerosione (EDM) e il laser.

## ESERCITAZIONI

Le esercitazioni vengono sviluppate per metà in aula e per metà in laboratorio. Le esercitazioni in aula sono dedicate ai cicli di fabbricazione e allo svolgimento di esercizi di calcolo. Le esercitazioni di laboratorio invece sono dedicate alla programmazione delle macchine a CN e al rilievo di parametri tecnologici con l'uso di sistemi di acquisizione dati.

Le esercitazioni di laboratorio vengono sviluppate con l'aiuto di studenti coadiutori e sotto la guida di un ricercatore. Il programma dettagliato delle esercitazioni è fornito ogni anno all'inizio del corso in funzione delle disponibilità del laboratorio.

Al termine di ciascuna esercitazione lo studente è tenuto a redigere una breve relazione scritta in buon italiano e corredata da schizzi e/o disegni eseguiti con cura. È raccomandato l'uso di appositi programmi di WP e di CAD.

## BIBLIOGRAFIA

Teoria ed aspetti generali:

F. Giusti, M. Santochi, *Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione*, Ed. Ambrosiana, Milano.

S. Kalpakjian, *Manufacturing engineering and technology*, Addison-Wesley.

Macchine utensili:

A. Secciani, G. Villani, *Produzione metalmeccanica. Vol. 2*, Cappelli, Bologna.

## ESAME

La prova finale si articola in due parti: una scritta ed una orale. La prova scritta comprende argomenti di teoria, esercizi di calcolo, lo sviluppo di un semplice ciclo di fabbricazione e/o di un ciclo di lavorazione su macchina a CN. Il raggiungimento di una valutazione sufficiente su tale parte è essenziale al fine del superamento dell'esame. La prova orale inizia con la discussione dell'elaborato e prosegue con un colloquio che può toccare argomenti dell'intero programma del corso.

**E 569 1****Tecnologie e materiali per  
l'elettronica 1**

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6 (ore settimanali)  
80 (nell'intero periodo)

Docente: Gian Paolo Bava

Scopo del corso è di fornire una visione sufficientemente ampia, approfondita ed aggiornata delle attuali tecnologie di realizzazione dei dispositivi elettronici ed optoelettronici di maggiore impiego (in silicio e semiconduttori composti) e per la realizzazione delle fibre ottiche. Si introdurranno anche nozioni relative alla funzionalità ed alle prestazioni dei dispositivi, e indicazioni sulle linee di sviluppo che si prevedono nella realizzazione di dispositivi d'avanguardia, con cenni sulle tecnologie richieste e sulle prestazioni attese.

**REQUISITI**

Oltre alle nozioni fondamentali di *fisica e chimica*, le conoscenze di base sui *dispositivi elettronici*.

**PROGRAMMA**

- Strutture cristalline perfette e difettive; struttura a bande per materiali di volume, eterostrutture e strutture quantistiche. [8 ore]
- Caratterizzazione dei materiali semiconduttori: microscopia elettronica e microanalisi, caratterizzazioni strutturali, elettriche ed ottiche. [10 ore]
- Aspetti generali della tecnologia; tecnologia del vuoto e camere depolverizzate. [6 ore]
- Preparazione dei materiali monocristallini. Crescita dei substrati e crescite epitassiali con diverse tecnologie. [6 ore]
- Tecniche fotolitografiche: ottica, elettronica, ionica ed olografia. Tecniche di deposizione ed incisione; deposizione dei metalli e dei dielettrici, incisioni per via umida (chimica) e via secca (ionica). [10 ore]
- Drogaggio con tecniche di diffusione e di impiantazione ionica ed *annealing*. [6 ore]
- Tecnologia delle fibre ottiche. Tecniche di produzione di fibre, fibre attive, cavi ottici. [4 ore]
- Tecnologia dei dispositivi elettronici integrati al silicio; bipolari, MOS ed all'arseniuro di gallio. [10 ore]
- Tecnologia dei dispositivi optoelettronici; laser DFB, laser MQW, amplificatori ottici, dispositivi fotonici e fotorivelatori. [10 ore]
- *Packaging* dei dispositivi, accoppiamento fibra – dispositivo ed applicazione nei sistemi. Tecniche di interconnessione elettriche ed ottiche, *multi-chip module* e tecnologia dei circuiti stampati. [8 ore]
- Qualità ed affidabilità dei dispositivi elettronici ed optoelettronici e fisica dei guasti. [4 ore]

## ESERCITAZIONI

Non sono previste esercitazioni di calcolo né di laboratorio. Di solito vengono effettuate due visite ai laboratori tecnologici dello CSELT.

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento: Sono disponibili dispense che verranno distribuite durante il corso.

Testo ausiliario: S.M. Sze, *Dispositivi a semiconduttore*, Hoepli, 1991.

## ESAME

L'esame consiste in una prova orale sugli argomenti sviluppati nel corso e tende ad accertare l' "aver acquisito una mentalità tecnologica" (non dimostrazioni, ecc.).

**E 569 2****Tecnologie e materiali per  
l'elettronica 2**

Anno: periodo 5:2

Docente: *da nominare*

Il corso è un naturale complemento di *Tecnologie e materiali per l'elettronica 1*, affrontando in particolare le problematiche connesse alle proprietà chimico-fisiche e alla preparazione e caratterizzazione di materiali e strutture avanzati dell'elettronica e optoelettronica basati su multieterostrutture esibenti proprietà quantistiche.

**REQUISITI**

*Dispositivi elettronici 1, Tecnologie e materiali per l'elettronica 1.* Sono inoltre consigliati *Elettronica dello stato solido*.

**PROGRAMMA**

*Proprietà dei materiali semiconduttori e eterostrutture.*

Rapporto tra composizione chimica, struttura cristallina e proprietà fisiche di materiali.

Strutture quantistiche: *quantum well, quantum wire, quantum dot* e *tunneling* risonante.

Teoria della nucleazione e crescita degli strati epitassiali e delle multistrutture.

Proprietà strutturali, ottiche ed elettriche di materiali massivi e a multieterostruttura.

*Caratterizzazioni avanzate dei semiconduttori.*

Caratterizzazioni microanalitiche e composizionali (microanalisi X, AES, SIMS, RBS).

Caratterizzazioni strutturali e morfologiche (SEM, TEM, HRXRD, DCDXRT, STM, AEF, CL).

Caratterizzazioni elettriche: effetto Hall in temperatura, magnetoresistenza, fotoconduzione.

Caratterizzazioni ottiche (LTPL, assorbimento e saturazione da assorbimento, IR, Raman).

Laboratori di caratterizzazione (esercitazioni pratiche).

*Tecnologie speciali.*

Litografia elettronica EBL.

Studio di un processo tecnologico completo di un dispositivo elettronico o optoelettronico avanzato.

Tecniche speciali di crescita epitassiale (ALE, ricrescita selettiva).

Tecnologie di materiale amorfo.

**ESERCITAZIONI**

Sono previste esercitazioni di caratterizzazione in laboratorio.

**E 571 0****Tecnologie metallurgiche**

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 70+30+10 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Mario Rosso

Il corso è volto all'approfondimento dei processi e delle tecnologie di formatura dei metalli e delle loro leghe. Dopo un'introduzione dei principi fondamentali su cui si basano i processi di deformazione plastica, di fonderia, della metallurgia delle polveri e delle tecniche di giunzione, vengono esaminati i processi e gli impianti utilizzati. In particolare vengono studiate ed analizzate le applicazioni delle predette tecnologie per la fabbricazione di pezzi finiti e costituiti da leghe ferrose, leghe a base di nichel, cobalto, cromo, zinco, alluminio, magnesio e titanio, nonché rame, bronzi ed ottoni, metalli antifrizione e composti a matrice metallica. Un aspetto fondamentale del corso riguarda la valutazione di caratteristiche e proprietà del prodotto finito, in relazione anche alla tecnologia adottata, mettendo in primo piano gli aspetti legati alla difettologia ed al controllo qualità.

**REQUISITI**

E' necessaria la conoscenza degli argomenti di carattere metallurgico trattati nei corsi fondamentali.

**PROGRAMMA***Processi di deformazione.* [16 ore]

A caldo, in semicaldo e a freddo, richiami dei fondamenti teorici. Fucinatura, stampaggio, estrusione diretta e inversa, trafilatura, laminazione, formatura delle lamiere sottili. Tensioni residue e difetti più comuni dopo lavorazione, leghe assoggettabili ai processi di deformazione plastica, proprietà e caratteristiche dei pezzi ottenuti, controllo qualità.

*Fonderia.* [16 ore]

Richiami ai principi di solidificazione delle leghe, Diagramma di flusso e ciclo di lavorazione tipico di una fonderia. Modelli, forme ed anime, modalità di formatura e processi speciali di formatura. Colata in gravità e centrifuga, pressocolata. Formatura di leghe e compositi allo stato semisolido: processi tipo Rheocasting e Thixoforming. Lavorazioni di finitura e controllo dei getti, leghe tipiche da fonderia e loro settori di impiego, assicurazione della qualità.

*Metallurgia delle polveri.* [15 ore]

Analisi del ciclo completo di produzione dei sinterizzati. Polveri, produzione, miscelazione, compattazione e forme limiti ottenibili. Aspetti termodinamici del processo di sinterizzazione, forni e atmosfere di sinterizzazione. Processi particolari di compattazione, pressatura isostatica a freddo ed a caldo, powder injectionmolding. lavorazioni secondarie dei sinterizzati: trattamenti termici, calibratura, infiltrazione e impregnazione. Metalli e leghe idonei al processo, loro caratteristiche ed applicazioni. Controllo di qualità e finitura.

*Tecniche di giunzione.* [8 ore]

Processi di saldatura e metallurgia della saldatura. Brasatura. Giunzione mediante collanti. Verifica e controllo delle giunzioni.

*Criteri di scelta e costi.* [15 ore]

Progetto di un processo di formatura, progetto degli utensili, fattori di forma, confronti tra le differenti tecnologie, alternative e criteri di scelta. Ottimizzazione tecnico economica ed indici di costo.

## ESERCITAZIONI E LABORATORIO

Le esercitazioni in aula consistono nello sviluppo di esempi applicativi e di calcolo sugli argomenti oggetto delle lezioni. Comprendono calcoli di forze e potenze richieste, scelta dei tipi di impianti utili per i diversi processi studiati. Per quanto riguarda i processi di fonderia: calcolo di materozze, attacchi e canali di colata, baricentro termico, progettazione delle forme.

Per quanto riguarda la Metallurgia delle Polveri: determinazione degli sforzi per la compattazione delle polveri e scelta delle presse. Calcolo di atmosfere e tempi di sinterizzazione.

Analisi economica e valutazione dei costi. Progetto del ciclo di formatura di pezzi specifici e confronto tecnico economico tra diverse ipotesi alternative. Le prove in laboratorio riguardano le caratteristiche di formabilità, l'esame delle proprietà e delle caratteristiche microstrutturali dei materiali assoggettati alle diverse tecnologie, osservazione e analisi di pezzi finiti.

## BIBLIOGRAFIA

G. Dieter, *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill, Tokyo, 1988.

R.A. Higgins, *Engineering Metallurgy*, vol. I e II, ELBS, Kent, 1986.

E. Mosca, *Metallurgia delle polveri*, AMMA, Torino, 1983.

Appunti del corso.

## ESAME

Per l'esame non sono previste modalità particolari e consiste nella classica prova orale.

## Indici alfabetici per insegnamento e per docente

<b>ANALISI MATEMATICA I E0231</b> CAIRE LUISELLA .....	13
<b>ANALISI MATEMATICA II E0232</b> BACCIOTTI ANDREA .....	15
<b>ANALISI MATEMATICA III (R) E0234</b> TEPPATI GIANCARLO .....	17
<b>CALCOLO NUMERICO (R) E0514</b> MONEGATO GIOVANNI .....	18
<b>CHIMICA E0620</b> PRIOLA ALDO .....	20
<b>CORROSIONE E PROTEZIONE DEI MATERIALI METALLICI E0910</b> MAJA MARIO .....	74
<b>COSTRUZIONE DI MACCHINE/DISEGNO TECNICO INDUSTRIALE E0945</b> ROCCATI GIOVANNI .....	22
<b>DISPOSITIVI ELETTRONICI I E1441</b> NALDI CARLO .....	24
<b>DISPOSITIVI ELETTRONICI III/ELETTRONICA ALLO STATO SOLIDO E1445</b> NALDI CARLO .....	76
<b>ECONOMIA E ORGANIZZAZIONE AZIENDALE E1530</b> FRAQUELLI GIOVANNI .....	27
<b>ELEMENTI DI MECCANICA TEORICA E APPLICATA E1660</b> SORLI MASSIMO .....	33
<b>ELETTRONICA APPLICATA E1710</b> ZAMBONI MAURIZIO .....	35
<b>ELETTROTECNICA E1790</b> DANIELE VITO .....	38
<b>FISICA DEGLI STATI CONDENSATI E1920</b> REGGE TULLIO .....	79
<b>FISICA DELLE SUPERFICI (R) E1994</b> TRESSO ELENA .....	80
<b>FISICA I E1901</b> MIRALDI ELIO .....	40
<b>FISICA II E1902</b> MINETTI BRUNO .....	44
<b>FISICA TECNICA E2060</b> CALI' MICHELE .....	48

<b>FONDAMENTI DI INFORMATICA E2170</b>	
da nominare .....	52
<b>GEOMETRIA E2300</b>	
RIVOLO MARIA TERESA .....	55
<b>IMPIANTI METALLURGICI E2740</b>	
ROSSO MARIO .....	57
<b>MACCHINE E3110</b>	
ANDRIANO MATTEO .....	59
<b>MATERIALI METALLICI E3180</b>	
da nominare .....	61
<b>MECCANICA DEI MATERIALI/METALLURGIA MECCANICA (I) E3265</b>	
ROSSETTO MASSIMO .....	82
<b>MISURE ELETTRONICHE E3670</b>	
ARRI ERNESTO .....	29
<b>OPTOELETTRONICA E3870</b>	
MONTROSSET IVO .....	84
<b>OTTICA E3880</b>	
MIRALDI ELIO .....	86
<b>PROPRIETA' TERMOFISICHE DEI MATERIALI E4370</b>	
RUSCICA GIUSEPPE .....	88
<b>SCIENZA DEI MATERIALI E4590</b>	
GIANOGLIO CARLO .....	66
<b>SCIENZA DELLE COSTRUZIONI E4600</b>	
BALLATORE ENRICO .....	62
<b>SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI CERAMICI E4630</b>	
AMATO IGNAZIO .....	68
<b>SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI COMPOSITI E4640</b>	
MARINO FRANCESCO .....	92
<b>SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI POLIMERICI I E4681</b>	
da nominare .....	70
<b>SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI POLIMERICI II E4682</b>	
PRIOLA ALDO .....	93
<b>STRUTTURA DELLA MATERIA (SPERIMENTALE) E5341</b>	
GONNELLI RENATO .....	95
<b>STRUTTURA DELLA MATERIA E5340</b>	
MAZZETTI PIERO .....	72
<b>SUPERCONDUTTIVITA' (R) E5404</b>	
RASETTI MARIO .....	96
<b>TECNOLOGIA MECCANICA E5640</b>	
IPPOLITO ROSOLINO .....	98
<b>TECNOLOGIE E MATERIALI PER L'ELETTRONICA I E5691</b>	
BAVA GIAN PAOLO .....	100
<b>TECNOLOGIE E MATERIALI PER L'ELETTRONICA II E5692</b>	

da nominare ..... 102

## **TECNOLOGIE METALLURGICHE E5710**

ROSSO MARIO ..... 103

### **A**

#### **AMATO IGNAZIO**

dip. Scienza dei materiali e ing. chimica tel. 4667

Ricevimento = lunedì 8.30-10.30

E4630 SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI CERAMICI ..... 68

#### **ANDRIANO MATTEO**

dip. Energetica tel. 4409

E3110 MACCHINE ..... 59

#### **ARRI ERNESTO**

dip. Automatica e informatica tel. 7022 e-mail arri@polito.it

E3670 MISURE ELETTRONICHE ..... 29

### **B**

#### **BACCIOTTI ANDREA**

dip. Matematica tel. 7548 e-mail bacciotti@polito.it

Ricevimento = concordato all'inizio del corso.

E0232 ANALISI MATEMATICA II ..... 15

#### **BALLATORE ENRICO**

dip. Ing. strutturale tel. 4846

Ricevimento = giovedì, venerdì 11.00-12.00

E4600 SCIENZA DELLE COSTRUZIONI ..... 62

#### **BAVA GIAN PAOLO**

dip. Elettronica tel. 4070

E5691 TECNOLOGIE E MATERIALI PER L'ELETTRONICA I ..... 100

### **C**

#### **CAIRE LUISELLA**

dip. Matematica tel. 7512 e-mail luisella@polito.it

E0231 ANALISI MATEMATICA I ..... 13

#### **CALI' MICHELE**

dip. Energetica tel. 4424

E2060 FISICA TECNICA ..... 48

### **D**

#### **DANIELE VITO**

dip. Elettronica tel. 4068 e-mail daniele@polito.it

E1790 ELETTROTECNICA ..... 38

### **F**

#### **FRAQUELLI GIOVANNI**

dip. Elettronica tel. 4000

E1530 ECONOMIA E ORGANIZZAZIONE AZIENDALE ..... 27

### **G**

#### **GIANOGGIO CARLO**

dip. Scienza dei materiali e ing. chimica tel. 4667

Ricevimento = mercoledì 16.30-18.30	
E4590 SCIENZA DEI MATERIALI .....	66

**GONNELLI RENATO**

dip. Fisica tel. 7350	
E5341 STRUTTURA DELLA MATERIA (SPERIMENTALE) .....	95

**I****IPPOLITO ROSOLINO**

dip. Sistemi di produz. e economia dell'az. tel.	
E5640 TECNOLOGIA MECCANICA .....	98

**M****MAJA MARIO**

dip. Scienza dei materiali e ing.chimica tel. 4638	
E0910 CORROSIONE E PROTEZIONE DEI MATERIALI METALLICI.....	74

**MARINO FRANCESCO**

dip. Scienza dei materiali e ing.chimica tel. 4686	
Ricevimento = martedì 8.30-10.30	
E4640 SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI COMPOSITI.....	92

**MAZZETTI PIERO**

dip. Fisica tel. 7342 e-mail mazzetti@polito.it	
E5340 STRUTTURA DELLA MATERIA .....	72

**MINETTI BRUNO**

dip. Fisica tel. 7317 e-mail minetti@polito.it	
E1902 FISICA II .....	44

**MIRALDI ELIO**

dip. Fisica tel. 7339	
Ricevimento = lunedì 14.30-16.30	
E1901 FISICA I .....	40
E3880 OTTICA .....	86

**MONEGATO GIOVANNI**

dip. Matematica tel. 7517	
E0514 CALCOLO NUMERICO (R).....	18

**MONTROSSET IVO**

dip. Elettronica tel. 4059 e-mail montrosset@polito.it	
E3870 OPTOELETTRONICA .....	84

**N****NALDI CARLO**

dip. Elettronica tel. 4069 e-mail naldi@polito.it	
E1441 DISPOSITIVI ELETTRONICI I.....	24
E1445 DISPOSITIVI ELETTRONICI II/ELETTRONICA ALLO STATO SOLIDO .....	76

**P****PRIOLA ALDO**

dip. Scienza dei materiali e ing.chimica tel. 4656 e-mail priola@polito.it	
Ricevimento = lunedì 14.30-16.30	
E0620 CHIMICA .....	20
E4682 SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI POLIMERICI II .....	93

**R****RASETTI MARIO**

dip. Fisica tel. 7324 e-mail rasetti1@polito.it

E5404 SUPERCONDUTTIVITA' (R) ..... 96

**REGGE TULLIO**

dip. Fisica tel. 7352 e-mail regge@athena.polito.it

E1920 FISICA DEGLI STATI CONDENSATI ..... 79

**RIVOLO MARIA TERESA**

dip. Matematica tel. 7546

E2300 GEOMETRIA ..... 55

**ROCCATI GIOVANNI**

dip. Meccanica tel. 6932

E0945 COSTRUZIONE DI MACCHINE/DISEGNO TECNICO INDUSTRIALE ..... 22

**ROSSETTO MASSIMO**

dip. Meccanica tel. 6923

E3265 MECCANICA DEI MATERIALI/METALLURGIA MECCANICA (I) ..... 82

**ROSSO MARIO**

dip. Scienza dei materiali e ing. chimica tel. 4664

Ricevimento = venerdì 8.30-10.30 o su appuntamento

E2740 IMPIANTI METALLURGICI ..... 57

E5710 TECNOLOGIE METALLURGICHE ..... 103

**RUSCICA GIUSEPPE**

dip. Energetica tel. 4434

Ricevimento = bacheca del dipartimento (1. piano, lato macchine)

E4370 PROPRIETA' TERMOFISICHE DEI MATERIALI ..... 88

**S****SORLI MASSIMO**

dip. Meccanica tel. 6948

E1660 ELEMENTI DI MECCANICA TEORICA E APPLICATA ..... 33

**T****TEPPATI GIANCARLO**

dip. Matematica tel. 7508

E0234 ANALISI MATEMATICA III (R) ..... 17

**TRESSO ELENA**

dip. Fisica tel. 7355

Ricevimento = mercoledì 9.30-11.30

E1994 FISICA DELLE SUPERFICI (R) ..... 80

**Z****ZAMBONI MAURIZIO**

dip. Elettronica tel. 4079 e-mail zamboni@polito.it

E1710 ELETTRONICA APPLICATA ..... 35