



## UNIVERSITÀ DI PISA

### PROGETTO DI SUPPORTI E DISPOSITIVI DI LUBRIFICAZIONE

---

#### ENRICO CIULLI

Anno accademico	2023/24
CdS	INGEGNERIA MECCANICA
Codice	401II
CFU	6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
PROGETTO DI SUPPORTI E DISPOSITIVI DI LUBRIFICAZIONE	ING-IND/13	LEZIONI	60	ENRICO CIULLI

#### Obiettivi di apprendimento

##### *Conoscenze*

Il corso si propone di fornire agli allievi nozioni ed elementi essenziali su lubrificazione e relativi supporti e dispositivi. La conoscenza degli aspetti legati ai sistemi con lubrificanti consente una corretta progettazione tribologica, di particolare importanza sia al fine del risparmio energetico sia per la riduzione dell'usura degli elementi.

Il corso vuole fornire conoscenze aggiornate nei settori della tribologia ed in particolare della lubrificazione. Esso vuole mettere in grado gli allievi di:

approfondire la conoscenza degli aspetti fondamentali della lubrificazione e degli accoppiamenti lubrificati;

saper verificare i più comuni supporti lubrificati;

possedere conoscenze sufficienti per una progettazione, per lo meno preliminare, di sistemi lubrificati.

##### *Modalità di verifica delle conoscenze*

Per l'accertamento delle conoscenze sarà svolto un esame finale.

Parte della prova finale può essere sostituita da un progettino.

##### *Capacità*

Al termine del corso:

- lo studente conoscerà gli aspetti fondamentali della lubrificazione e le relative applicazioni ai componenti ed ai sistemi meccanici;
- lo studente sarà in grado di affrontare problemi di verifica e di progetto dei principali supporti lubrificati;
- lo studente sarà in grado di cimentarsi con problematiche diverse per la riduzione dell'usura e delle perdite per attrito;
- lo studente avrà una professionalità immediatamente spendibile in ogni azienda.

##### *Modalità di verifica delle capacità*

Durante la verifica finale lo studente deve dimostrare la sua conoscenza degli argomenti trattati nel corso e di saper svolgere esercizi di verifica e progetto dei principali supporti lubrificati.

##### *Comportamenti*

Lo studente potrà acquisire e/o sviluppare sensibilità alle problematiche tribologiche volte anche al risparmio energetico e dei materiali. In particolare dovrebbe acquisire la capacità di affrontare svariate problematiche diverse fra loro.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### Modalità di verifica dei comportamenti

Durante l'esame finale saranno verificati:

- Conoscenza critica e non mnemonica delle principali equazioni e leggi.
- Conoscenza delle problematiche fondamentali delle principali coppie lubrificate.
- Saper verificare le condizioni di corretto funzionamento di accoppiamenti lubrificati avendo acquisito i principi fisici su cui si basa il sostentamento fluidodinamico e fluidostatico.
- Conoscenza degli aspetti fondamentali degli impianti di lubrificazione.

### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

#### *Dai corsi di Matematica:*

Derivate totali e parziali, operatori differenziali, integrali, equazioni differenziali.

#### *Dai corsi di Fisica:*

Grandezze fisiche e unità di misura, concetti di forza, lavoro, energia, potenza; equazioni cardinali.

#### *Dai corsi di Disegno:*

Saper interpretare schemi e disegni meccanici.

#### *Dal corso di Meccanica Applicata alle Macchine:*

Equazioni e concetti base di lubrificazione, attrito, usura.

#### *Dal corso di Tecnologia Meccanica:*

Rugosità superficiale.

### Indicazioni metodologiche

Il corso si articola in lezioni teoriche ed esercitazioni. In particolare le esercitazioni comprendono sia lo svolgimento di esercizi sui vari tipi di supporti lubrificati, sia la conoscenza diretta di alcuni degli elementi studiati, sia possibili visite a laboratori ed impianti industriali.

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

**ELEMENTI DI TRIBOLOGIA** - Regimi di lubrificazione e curva di Stribeck; spessore specifico del film lubrificante. Elementi di meccanica dei contatti: contatti Hertziiani; superfici reali. Attrito di strisciamento e di rotolamento. Usura; classificazione dei principali meccanismi; usura nelle coppie lubrificate; quantificazione dell'usura; fattore pv. Attrezzature e prove sperimentali per la misura dell'altezza del meato, dell'attrito e dell'usura.

**LUBRIFICANTI** - Fluidi: Newtoniani; viscosità dinamica e cinematica. Comportamenti non Newtoniani; viscosità equivalente. Lubrificanti liquidi: oli animali e vegetali, minerali, sintetici. Misura della viscosità. Leggi di variazione della viscosità con la temperatura e con la pressione. Variazione della viscosità con lo scorrimento. Classificazione degli oli. Altre caratteristiche chimico-fisiche degli oli; additivi. Lubrificanti aeriformi; grassi; lubrificanti solidi. Prove standard per la caratterizzazione dei lubrificanti (in particolare test tribologici).

**TEORIA DELLA LUBRIFICAZIONE A FILM COMPLETO** - Equazioni fondamentali della teoria elementare; equazione di Reynolds (lubrificazione idrodinamica, idrostatica, per accostamento). Significato fisico dei termini dell'equazione di Reynolds. Forme diverse dell'equazione di Reynolds: in coordinate polari e cilindriche; per lubrificanti gassosi; per flusso turbolento; generalizzata. Equazione di bilancio energetico semplificata per meato sottile.

**SUPPORTI DI SPINTA IDRODINAMICI** - Flusso monodimensionale: problematiche di cavitazione e di scarsa alimentazione; condizioni al contorno. Slitta piana: andamenti della pressione e delle altre grandezze caratteristiche. Diagrammi di Raimondi e Boyd e formule di Stahl e Jacobson nel caso di flusso bidimensionale per pattino piano ad inclinazione fissa e orientabile. Criteri di verifica: altezza minima ammissibile. Criteri di progetto: diagrammi per la scelta di valori ottimizzati. Tipologie di pattini; rivestimenti superficiali.

**SUPPORTI IDRODINAMICI PORTANTI** - Problema piano. Soluzione e numero di Sommerfeld: determinazione delle grandezze caratteristiche. Soluzione half-Sommerfeld con diverse condizioni al

## UNIVERSITÀ DI PISA

con contorno. Soluzione di Ocvirk per cuscinetto corto. Soluzione numerica dell'equazione di Reynolds completa; problematiche di alimentazione, frontiere di cavitazione e di riformazione del meato. Diagrammi di Raimondi e Boyd. Tipologie di cuscinetti. Cuscinetti in condizioni di funzionamento severe. Criteri di verifica e di progetto dei cuscinetti portanti. Dinamica dei cuscinetti radiali: half-speed whirl; coefficienti rotodinamici. Instabilità dei cuscinetti radiali: metodo di Lund; massa e velocità critica; diagrammi di stabilità per cuscinetti diversi.

**LUBRIFICAZIONE DI COPPIE NON CONFORMI** - Soluzione dell'equazione di Reynolds nel caso di coppie non conformi. Aspetti fondamentali della lubrificazione elastoidrodinamica (EHL). Equazioni per la soluzione del problema dei contatti di linea in regime isotermodinamico; gruppi adimensionali; andamenti caratteristici di forma del meato e di pressione; influenza di carico e velocità. Formule e diagrammi per il calcolo dell'altezza minima del meato in contatti di linea e di punto nei vari regimi di lubrificazione. Effetti di scarsa alimentazione, termici, dell'orientamento della rugosità. Applicazioni a cuscinetti a rotolamento, denti di ruote dentate, accoppiamenti camma-piattello, protesi d'anca. Attrezzature e prove sperimentali su cuscinetti, ingranaggi e dischi.

**SUPPORTI IDROSTATICI** - Principio di funzionamento, elementi di compensazione a capillare e a orifizi, Supporti di spinta a pattino circolare: andamento della pressione e delle altre grandezze caratteristiche. Risultati in forma grafica. Rigidezze dei supporti idrostatici con alimentazioni diretta e compensata. Supporti a pattini contrapposti: principio di funzionamento. Cuscinetti radiali.

**SUPPORTI A BASSISSIMO ATTRITO** - Supporti lubrificati a gas. Sostentamento magnetico passivo.

**LIMITI TRIBOLOGICI** - Limitazioni fisiche degli accoppiamenti lubrificati; diagrammi per la scelta del tipo di cuscinetto. Principali danneggiamenti di coppie lubrificate.

**IMPIANTI DI LUBRIFICAZIONE** - Sistemi di applicazione dei lubrificanti. Sistemi a tutta perdita: ad erogazione intermittente e ad erogazione continua. Sistemi a reimpiogo: a bagno d'olio, a sbattimento, a circolazione forzata. Componenti degli impianti, serbatoio e suo dimensionamento; esempi di pompe volumetriche. Depurazione dell'olio in servizio: livello di contaminazione; metodi di depurazione (sedimentazione, filtrazione, centrifugazione); tipologie e caratteristiche dei filtri e loro posizionamento. Sistemi di applicazione dei grassi. Esempi di impianti; principali segni grafici di sistemi oleodinamici. Impianti per lubrificazione di vari componenti di banchi prova.

### Bibliografia e materiale didattico

Enrico Ciulli, Bruno Piccigallo, "Lubrificazione teorica e applicata", Edizioni Ledi Publishing, Milano, 2023.

<https://www.ledizioni.it/prodotto/lubrificazione-teorica-e-applicata/>

e alcuni appunti sulla parte relativa ai sistemi di lubrificazione.

Per eventuali approfondimenti:

E. Ciulli, B. Piccigallo, "Complementi di Lubrificazione", SEU, Pisa, 1996.

B.J. Hamrock, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

J. Halling, "Principles of Tribology", Scholium Int., 1975.

### Indicazioni per non frequentanti

Il libro di testo più le dispense integrative sono generalmente sufficienti per comprendere gli aspetti base degli argomenti del programma (a parte le visite a laboratori e industrie).

### Modalità d'esame

L'esame è composto da una prova orale sul programma e sugli esercizi svolti a lezione e presenti nel materiale didattico.

La prova orale consiste normalmente in tre domande principali a cui il candidato può rispondere in parte buona parte per scritto (trattandosi di equazioni e di impostazione e soluzione di esercizi e progettini con grafici) e in parte oralmente.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

La prova orale è superata se:

- il candidato mostra di aver studiato e compreso i concetti fondamentali della materia;
- non sono riscontrate lacune su materie di base essenziali per gli argomenti del corso.

Il voto finale tiene conto della preparazione mostrata dal candidato, sia in base allo studio effettuato, sia in base alla comprensione della materia. È considerata anche la capacità di esprimersi in un linguaggio tecnico appropriato.

### Note

#### **Istruzioni ed informazioni per Student stranieri Erasmus**

Il docente è disponibile ad indicare materiale didattico, effettuare ricevimenti e fornire supporto sia in lingua italiana che in lingua inglese.

Le lezioni sono in lingua italiana, tuttavia il docente è disponibile a fornire approfondimenti in lingua inglese anche durante le lezioni ordinarie se richieste dallo studente.

*Ultimo aggiornamento 07/08/2023 18:23*