



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## TRANSPORT PHENOMENA IN MATERIALS

**ANTONIO BERTEI**

Anno accademico

2023/24

CdS

MATERIALS AND  
NANOTECHNOLOGY

Codice

727II

CFU

6

Moduli  
TRANSPORT  
PHENOMENA IN  
MATERIALS

Settore/i  
ING-IND/24

Tipo  
LEZIONI

Ore  
48

Docente/i  
ANTONIO BERTEI  
MARCO LAGNONI

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

Lo studente acquisirà le conoscenze necessarie dei fondamenti del trasporto di energia, massa, specie e quantità di moto secondo l'approccio dell'ingegneria chimica, cercando l'unificazione dei diversi meccanismi di trasporto. Lo studente imparerà le equazioni costitutive di flussi convettivi e diffusivi così come le leggi di conservazione al fine di modellare sistemi fisici ed ottenere le distribuzioni di specie, temperatura e campo di velocità. L'insegnamento fornisce esempi pratici ed equazioni immediatamente applicabili per cogliere i comportamenti caratteristici dei fenomeni di trasporto e le relative quantità adimensionali, costruendo le fondamenta per applicazioni più avanzate. Specifiche esercitazioni utilizzeranno fogli di calcolo e codici numerici per assistere la risoluzione numerica e rafforzare le competenze computazionali. Il corso è volto ad omogeneizzare i diversi background degli studenti.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

Durante l'esame finale orale, il livello di conoscenza sarà verificato attraverso esercizi quantitativi da essere impostati e risolti dal candidato. Gli esercizi copriranno i concetti chiave del trasporto di calore e di specie chimica, imitando ed andando oltre a quelli presentati nel corso. La capacità del candidato di evidenziare l'unificazione dei fenomeni di trasporto ed il framework delle soluzioni matematiche, facendo parallelismi tra branche diverse, è apprezzata. La propria terminologia tecnica e la capacità di tradurre i concetti per diverse applicazioni sono anch'essi oggetto di valutazione.

#### *Capacità*

Al termine del corso lo studente:

- possiede una profonda conoscenza dei fondamenti dei fenomeni di trasporto (specie, calore e quantità di moto) secondo una prospettiva unificata dell'ingegneria chimica
- è in grado di utilizzare bilanci quantitativi (stazionari e dinamici) e di impostare modelli semplici, con o senza soluzione analitica
- avrà una comprensione generale che gli permetta di applicare la teoria ad applicazioni più avanzate
- possiede una certa esperienza pratica sulla simulazione numerica di fenomeni di trasporto con codici commerciali

#### *Modalità di verifica delle capacità*

Durante la prova finale verranno svolte esercitazioni pratiche per valutare la capacità dello studente di impostare la loro corretta implementazione. Per l'ammissione alla prova finale non sono richiesti progetti specifici o compiti a casa, ma il candidato è libero di presentare una applicazione da lui preparata.

#### *Comportamenti*

Lo studente svilupperà una corretta intuizione e un punto di vista unificato sulla conservazione di massa, specie, energia e quantità di moto, costruendo un approccio ingegneristico e fisico alla soluzione matematica, anche in applicazioni non discusse durante il corso.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*

Durante la prova orale, l'esaminatore valuterà il grado di approfondimento acquisito dallo studente nella sua capacità di applicare i concetti al di là di quanto discusso durante il corso. La padronanza della materia sarà valutata chiedendo connessioni tra diversi campi e indagando la comprensione dei fondamenti fisici.



## UNIVERSITÀ DI PISA

### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

Derivate e integrali, algebra and operazioni matriciali, conoscenza di base di equazioni differenziali ordinarie ed alle derivate parziali.

### Indicazioni metodologiche

L'erogazione avviene in aula con potenziale streaming on-line su piattaforma MS Teams. Si consiglia la frequenza alle lezioni.

Gli incontri con il docente devono essere organizzati direttamente via email.

Attività didattiche:

frequentare le lezioni

frequentare e svolgere tutorial partecipandovi attivamente

essere coinvolto nelle discussioni in classe

Metodi didattici: lezioni frontali + esercitazioni in aula

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

INTRODUZIONE. Equilibrio locale, definizione di flussi convettivi e diffusivi, proprietà di trasporto dei materiali, numeri adimensionali (Reynolds, Prandtl, Schmidt, Peclet, ecc), origine delle equazioni diffusive e random walk. EQUAZIONI DI GOVERNO MICROSCOPICHE. Derivazione di equazioni di bilancio microscopiche (generale, massa, specie, energia interna, quantità di moto), approcci euleriani e lagrangiani, notazione tensoriale e operatori. CONDUZIONE DI CALORE STAZIONARIA. Equazione di governo e condizioni al contorno, legge di Newton del raffreddamento, numeri di Biot e Nusselt, conduzione termica unidirezionale (coordinate lineari, cilindriche e sferiche), conduzione termica effettiva dei materiali compositi, conduzione termica con sorgente di calore. CONDUZIONE DEL CALORE DIPENDENTE DAL TEMPO. Risposta al gradino in una lastra semi-infinita, soluzioni autosimili, risposta all'impulso di calore. FONDAMENTI DEL TRASPORTO DI MATERIA. Flussi e velocità di specie, convezione vs diffusione, massa vs base molare, equazioni costitutive della diffusione (legge di Fick), equazioni di bilancio e condizioni al contorno. TRASPORTO DI MATERIA STAZIONARIO. Diffusione in un film stagnante, coefficiente di trasporto di massa efficace, numero di Sherwood, semplificazioni nel limite diluito, diffusione con reazione eterogenea, diffusione con reazione omogenea, modulo di Thiele e fattore di efficacia, scala dei regimi (cinetico, interno ed esterno). TRASPORTO DI MATERIA NEL TEMPO. Diffusione unidirezionale in lastra semi-infinita con condizione al contorno di tipo Robin (soluzione di Crank). IL TRASPORTO DI QUANTITÀ DI MOTO. Flussi laminari e turbolenti, profili di velocità in un tubo, fluidi non newtoniani, flusso in mezzi porosi, effetti di Knudsen. ESERCITAZIONI. Utilizzo di Microsoft Excel e dei codici in Comsol Multiphysics: utilizzo di base dei codici, scambio isotopico, cottura di un mattone ceramico con trasformazione di fase. SEMINARI. Fenomeni di trasporto nelle batterie agli ioni di litio.

### Bibliografia e materiale didattico

Dispense fornite dal docente, che contengono specifiche indicazioni a testi di riferimento (non strettamente necessari), tra i quali:

Mauri, Transport Phenomena in Multiphase Flows, Springer 2015, ISBN: 978-3-319-15792-4

R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport Phenomena 2nd ed., Wiley 2002, ISBN: 0-471-41077-2

Crank, The Mathematics of diffusion 2nd ed., Clarendon Press 1975, ISBN: 0-19-853344-6

### Indicazioni per non frequentanti

Nessuna variazione per i non frequentanti

### Modalità d'esame

La valutazione globale dei risultati di apprendimento viene effettuata con una prova orale (1h in media). L'esame consiste in 2-3 esercizi pratici da svolgere e risolvere a cura del candidato, riguardanti gli argomenti chiave del corso (trasporto di specie e calore, soluzioni stazionarie e transitorie). Sulla base degli esercizi verranno valutate le conoscenze generali sul significato di grandezze adimensionali, comportamenti asintotici, correlazioni tra diversi campi. La corretta esecuzione delle esercitazioni pratiche è un criterio necessario per superare l'esame.

### Altri riferimenti web

MS Team: 727II - TRANSPORT PHENOMENA IN MATERIALS [WNT-LM] a.a.23/24

Ultimo aggiornamento 31/07/2023 14:10