UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

SYLLABUS DEL CORSO

Mineralogia Industriale ed Ambientale

2526-2-F7401Q100

Obiettivi

Il corso si propone di approfondire le conoscenze di base acquisite nella Laurea Triennale in ambito giacimenti minerari – georisorse s.l., approfondendo gli aspetti di interesse industriale ed ambientale. Verrà trattata nel dettaglio l'evoluzione della crosta terrestre dall'Archeano al Fanerozoico, con particolare riguardo ai fenomeni metallogenici. Materie prime e metalli "critici" per l'industria: PGE (*Platinum Group Elements*), REE (*Rare Earth Elements*), Sb, Be, Co, Ga, Ge, In, Li, Mg, Nb, Re, Ta e W; per ognuno verranno fornite le conoscenze di base mineralogiche, giacimentologiche, industriali e le relative problematiche ambientali. Verrà approfondito il settore delle ceramiche, vetri, leganti (calce e cementi) e refrattari, con particolare riguardo alle materie prime, alla loro caratterizzazione ed ai processi industriali. Infine, verranno trattate le fibre minerali s.l. (amianti ed altre fibre minerali, FAV), dagli aspetti mineralogici a quelli industriali, fino alle problematiche igienistiche ed analitiche (aria, suoli, terre e rocce da scavo, manufatti).

Conoscenze e capacità di comprensione
Conoscenze di base ed approfondite sulle caratteristiche dei giacimenti minerari in rapporto al tempo geologico (Archeano, Proterozoico e Fanerozoico). Aspetti genetici, con particolare riguardo ai processi idrotermali. Materie prime critiche e strategiche, caratteristiche dei giacimenti, aspetti industriali, economici ed ambientali. Fibre e polveri minerali, in ambiente naturale ed antropico, con relative misure di mitigazione. Aspetti industriali ed ambientali nella produzione di leganti (es. calce, cemento), vetri, ceramiche e refrattari.

Conoscenza e capacità di comprensione applicate
Lo studente sarà in grado di applicare le conoscenze teoriche per analizzare e interpretare dati sperimentali per la ricerca e la caratterizzazione di depositi minerari, la valutazione degli aspetti ambientali, dei processi industriali e di mitigazione del rischio.

Autonomia di giudizio
Al termine del corso, lo studente sarà in grado di valutare criticamente modelli teorici e risultati sperimentali riguardanti le caratteristiche e le proprietà delle materie prime critiche (e non), degli aspetti industriali ed ambientali. Sarà inoltre capace di selezionare le tecniche analitiche più appropriate per la caratterizzazione dei materiali e per la valutazione dell’impatto ambientale.

Abilità comunicative
Lo studente acquisirà un linguaggio tecnico adeguato alla descrizione dei giacimenti minerari e dei relativi processi genetici, e sarà in grado di comunicare efficacemente concetti complessi relativi a processi estrattivi, industriali ed ambientali. Durante il corso, sarà inoltre incoraggiato a sperimentare la comunicazione scientifica in lingua inglese, con lettura di articoli scientifici selezionati ed interpretazione di dati sperimentali derivanti da analisi di laboratorio.

Capacità di apprendere
Il corso mira a fornire agli studenti un metodo scientifico solido e flessibile, che consenta loro di affrontare in modo autonomo e critico lo studio dei giacimenti minerari e dei materiali geologici di interesse industriale. Le competenze acquisite saranno trasferibili anche ad altri ambiti scientifico/tecnici e professionali, come la ricerca di depositi minerari, la caratterizzazione tecnica dei materiali e l'interpretazione di dati ambientali.

Contenuti sintetici

1) **Concetti base in ambito giacimentologico**: *ore* & *industrial mineals*, tenore, tonnellaggio, Clarke, morfologia dei corpi minerari, tessiture ed *ore dressing*, principali giacimenti di origine magmatica, idrotermale, metamorfica, sedimentaria, residuale ed arricchimento supergenico.

2) **Evoluzione della crosta terrestre e fenomeni metallogenici dell'Archeano**: *greenstone belts*, komatiiti e giacimenti a Fe-Ni-Cu-PGE, Algoma-type BIF, graniti TTG, mineralizzazioni a Au-U.

3) **Evoluzione della crosta terrestre e fenomeni metallogenici del Proterozoico**: complessi basici stratificati (Es. Bushveld Complex), mineralizzazioni a Cr-V-PGE, carbonatiti, kimberliti, giacimenti SEDEX.

4) **Evoluzione della crosta terrestre e fenomeni metallogenici del Fanerozoico**: porphyry a Cu-Mo-Au-Sn, MVT (*Mississippi Valley Type*), VMS (*Volcanogenic Massive Sulphide*), placer, filoni mesotermali orogenici, lateriti, arricchimento supergenico.

5) **Processi idrotermali**: origine dei fluidi, sorgenti dei metalli, meccanismi di circolazione dei fluidi, leganti clorurati e solforati, meccanismi di deposizione, tecniche di studio (es. inclusioni fluide).

6) **Metalli "critici"**: REE, PGE, Sb, Be, Co, Ga, Ge, In, Li, Mg, Nb, Re, Ta e W. Proprietà chimiche e fisiche, mineralogia, giacimenti minerari, applicazioni industriali, problematiche ambientali, sostituzioni.

7) **Ceramiche silicatiche e ceramiche "speciali", vetri, leganti inorganici (calce, cementi) e refrattari**: materie prime, caratterizzazione mineralogica e chimica, processi industriali.

8) **Amianto ed altre fibre minerali**: mineralogia, giacimenti minerari, usi industriali, problematiche ambientali, patologie legate all'esposizione a fibre di amianto, tecniche analitiche per lo studio e la quantificazione in aria ed in materiali massivi (manufatti, suoli, terre e rocce da scavo), FAV (fibre artificiali vetrose).

Programma esteso

Concetti base, *ore geology* & *industrial minerals*, giacimenti minerari

Introduzione al corso, *ore minerals* & *industrial minerals*, tenore e tonnellaggio, cut-off. Corpi minerari singenetici ed epigenetici, filoni, vene, pipes, mantos, corpi stratiformi e stratabound. Giacimenti magmatici, cristallizzazione frazionata e liquazione. Giacimenti idrotermali, fattori chiave nella loro genesi. Giacimenti sedimentari, chimici, residuali, arricchimento supergenico. Giacimenti metamorfici.

Tettonica e metallogenesi nell'Archeano

Terreni a gneiss-granuliti e *greenstone belts*, stratigrafia dei *greenstone belts*. Lave komatiitiche e mineralizzazioni a solfuri massicci di Fe-Ni-Cu-PGE. Evoluzione dell'atmosfera, cianobatteri, sviluppo della vita nell'Archeano. Eventi orogenetici ed intrusioni granitoidi TTG, mineralizzazioni associate.

Tettonica e metallogenesi nel Proterozoico

Principali eventi tettonici nel Proterozoico: accrescimento della crosta continentale, magmatismo anorogenico, rifting intracontinentale, catene orogeniche ensialiche. Complessi basici stratificati: l'esempio del Bushveld Complex. Modello di Irvine: cristallizzazione della cromite per contaminazione di rocce crostali e per mescolamento di un magma evoluto con un magma primitivo. Carbonatiti, giacimenti a REE, Nb, Ti. Kimberliti e diamanti, genesi di magmi kimberlitici. Il mercato industriale e gemmologico del diamante. Banded Iron Formations, GOE (*Great Oxidation Event*), mineralogia dei BIF e nomenclatura.

Tettonica e metallogenesi nel Fanerozoico

Crosta oceanica, cicli di Wilson, relazioni con la metallogenesi. Ofioliti e cromiti podiformi. Giacimenti MVT (Mississippi Valley Type), porphyry, VMS (*volcanogenic massive sulphide*), filoni mesotermali orogenici, lateriti, arricchimento supergenico.

Processi idrotermali

Origine dei fluidi, acque magmatiche, metamorfiche, meteoriche, miste. Sorgenti di metalli e meccanismi per la circolazione dei fluidi (*thermally-driven, gravity-driven, fault-dilatancy-driven, orogeny-driven*). Leganti clorurati e solforati, metalli e leganti soft e hard. Meccanismi di deposizione: variazioni di pH, Eh, T, P, rocce reattive, *boiling*, mixing, brecce idrauliche. Diagrammi pH - Eh, inclusioni fluide, geotermometri e geobarometri su solfuri, isotopi stabili. Fenomeni di alterazione idrotermale, wall rock-alteration, giacimenti porphyry, epitermali, mesotermali ed ipotermali.

REE: giacimenti, applicazioni industriali, problematiche ambientali

REE: geochimica e mineralogia. Giacimenti: primari e secondari, carbonatiti, rocce magmatiche alcaline, placer, residuali. Applicazioni industriali delle REE e problematiche ambientali. Mercato mondiale delle REE, prospettive, sostituzioni, riciclaggio.

Metalli "critici" per l'industria

Critical metals, applicazioni industriali, mercato globale, riciclaggio. **Antimonio**, **Berillio, Cobalto, Gallio, Germanio, Indio, Litio, Magnesio, PGM – Platinum Group Metals, Renio, Niobio, Tantalio, Tungsteno.** Per ogni metallo verranno approfondite le proprietà chimiche e fisiche, mineralogia, principali giacimenti minerari, ore dressing & treatment, applicazioni industriali, problematiche ambientali, risorse e riserve, prezzi, prospettive future e materiali alternativi.

Ceramiche, vetri, leganti e refrattari

Ceramiche silicatiche, ceramiche “speciali”, vetri, leganti inorganici (calce e cementi), refrattari. Materie prime e loro caratterizzazione mineralogica e chimica, processi industriali, proprietà tecniche e caratterizzazione dei manufatti, criticità ed aspetti innovativi.

Amianto ed altre fibre minerali

Introduzione alla problematica amianto: mineralogia, serpentino ed anfiboli, concetto di abito asbestiforme, produzione mondiale e distribuzione dei giacimenti minerari. Amianto: proprietà tecniche del crisotilo e degli amianti di anfibolo. NOA: *naturally occurring asbestos*. Manufatti contenenti amianto, friabili e compatti. Principali tecniche

di rimozione di MCA, smaltimento in discarica, inertizzazione, incapsulamento, confinamento. Principali patologie legate all'esposizione professionale ed occasionale ad amianto. Determinazione del contenuto di amianto in campioni massivi e in polveri aerodisperse, criticità analitiche. Cenni alle FAV (Fibre Artificiali Vetrose).

Prerequisiti

Conoscenze di base di mineralogia, petrografia, chimica e *ore geology*.

Modalità didattica

2 CFU frontali, 3 CFU di laboratorio, 1 CFU di didattica campus abroad (escursione didattica sul terreno di due giorni, oppure due escursioni giornaliere). Erogato in italiano o in inglese (in caso di presenza di studenti stranieri).

a) 11 lezioni da 2 ore in presenza, Didattica Erogativa

b) 15 attività di laboratorio da 2 ore in presenza, Didattica Interattiva

c) 2 uscite sul campo (Campus Abroad) da 6 ore in presenza, Didattica Interattiva

In caso di emergenze sanitarie le lezioni si svolgeranno in modalità mista: parziale presenza (laboratorio e campus abroad) e lezioni videoregistrate asincrone.

Materiale didattico

Slide del corso (disponibili su e-learning), appunti e dispense distribuiti durante il corso. Testi consigliati dal docente.

Ore geology - introduzione

Pirajno (2009) - Hydrothermal processes and mineral systems. Springer, 1250 pp.

Ridley (2013) - Ore deposit geology. Cambridge University Press, 398 pp.

Robb (2021) - Introduction to ore forming processes., 2nd edition. Blackwell Publishing, 456 pp.

Kogel, Trivedi, Barker & Krukowski (2006) - Industrial minerals and rocks. Commodities, markets and uses (VII edition). Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), 1548 pp.

Boudreau (2019) - Hydromagmatic Processes and Platinum-Group Element Deposits in Layered Intrusions. Cambridge University Press, 275 pp.

Primavori (1999) - Planet Stone. Giorgio Zusi editore, 336 pp.

Critical metals & raw materials

Gunn (2014) - Critical metals handbook. AGU Wiley, 439 pp.

Caratterizzazione di ore & industrial minerals

Christidis (2011) - Advances in the characterization of industrial minerals. EMU notes in Mineralogy, Vol. 9, The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 485 pp.

Amianto ed altre fibre minerali

Gualtieri (2017) - Mineral fibres: crystal chemistry, chemical-physical properties, biological interaction and toxicity. EMU notes in Mineralogy, Vol. 18, The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 536 pp.

Ceramiche, leganti, vetri & refrattari

Carter & Norton (2007) – Ceramic Materials: science and Engineering. Springer, 716 pp.

Askeland, Fulay & Wright (2010) – The Science and Engineering of Materials – VI Edition. Cengage Learning, 921 pp.

Schroeder (2018) - Clays in the Critical Zone. Cambridge University Press, 246 pp.

Periodo di erogazione dell'insegnamento

I semestre

Modalità di verifica del profitto e valutazione

Prova scritta preliminare della durata di 15 minuti, test a risposte chiuse (15 quesiti, 2 punti per ogni risposta corretta). Viene valutata la correttezza delle risposte. La prova preliminare incide per il 20% sul voto finale.

Successiva prova scritta (durata 2 ore) con una decina di domande aperte (da 2 a 4 punti per ogni risposta corretta e completa, in funzione della complessità dell'argomento). Vengono valutate la correttezza delle conoscenze, la capacità espositiva e di sintesi. Questa prova scritta incide per il 40% sulla votazione finale.

Esame orale finale (durata 20-30 minuti), colloquio sugli argomenti svolti a lezione: da 3 a 4 domande aperte. Vengono valutate la correttezza delle conoscenze, la chiarezza espositiva, il linguaggio appropriato, nonchè la capacità di estendere a casi reali le conoscenze teoriche. L'esame orale contribuisce per il 40% all'esito finale.

Orario di ricevimento

Lunedì dalle 10:30 alle 12:30, oppure su appuntamento (edificio U4, I piano, stanza 1027).

Sustainable Development Goals

ENERGIA PULITA E ACCESSIBILE | IMPRESE, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE | CONSUMO E

PRODUZIONE RESPONSABILI