

**Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.
Unidad Saltillo**

**Plan de Estudios
Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica**

Objetivos del Plan de Estudios

El Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica tiene como objetivo principal que el(la) alumno(a) desarrolle habilidades analíticas de pensamiento. Estas habilidades incluyen a la investigación de información, el análisis de datos, el pensamiento crítico, la comunicación eficiente y la creatividad para la resolución de problemas. Adicionalmente, el(la) alumno(a) profundizará su entendimiento de los fundamentos de ciencia de materiales, termodinámica, fenómenos de transporte, cinética química, que se requieren para el desarrollo de su proyecto de tesis. Finalmente, el(la) alumno(a) adquirirá experiencia profesional en el desarrollo de una tesis teórico-práctica enfocada a dilucidar una hipótesis de interés científico, o a encontrar posibles soluciones a problemas de productividad y/o calidad en una línea de producción, o a proponer y evaluar las condiciones de laboratorio para la síntesis de nuevos materiales o de nuevos tratamientos para el aprovechamiento de materiales diversos.

Metas del Plan de Estudios

Los objetivos del Programa se alcanzan mediante el cumplimiento de las metas siguientes:

1. Aprobar un total de 10 cursos durante los primeros dos semestres del Programa. El(la) estudiante se dedicarán tiempo completo a esta actividad.
2. Preparar una propuesta de desarrollo de tesis, que será sometida a un revisor de forma previa a su presentación oral frente al Colegio de Profesores del Programa. Esta propuesta debe contener una investigación del estado del arte en el tema de la tesis, un protocolo metodológico que se pretende seguir, y una calendarización de las actividades de la tesis. Esta propuesta se presentará al iniciar el tercer semestre.
3. Presentar dos reportes de avance de tesis, que enfatizen los resultados parciales que se han obtenido hasta ese momento. Estos reportes se presentan al finalizar el tercer y cuarto semestres y seguirán el mismo formato escrito y de presentación oral que la propuesta de tesis.
4. Preparar un documento de tesis, someterlo a la consideración de dos revisores, uno interno a la Institución y otro invitado externo. Una vez aprobado por ambos, se procede a realizar el examen de grado de forma oral.

Perfil de Ingreso

La Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica está dirigida a egresados de carreras que comparten algún nivel de afinidad con la ingeniería metalúrgica. Como ejemplos, se pueden citar las siguientes carreras:

Ingeniería: Química, Física, Mecánica, en Materiales, en Minería, Industrial, en Geociencias, Metalúrgica.
Licenciatura en: Química, Física.

Además, se requiere que el aspirante tenga interés en desarrollar sus habilidades analíticas de pensamiento.

Perfil de Egreso

El cumplimiento de los objetivos del Programa deberá conducir a la formación de un(a) profesional de la metalurgia capaz de incidir positivamente en su entorno, sea un entorno académico o industrial. Poseerá conocimientos teórico-prácticos en la especialidad superiores a los obtenidos en estudios a nivel de licenciatura y recibidos de profesores-investigadores activos y con una productividad académica consistente. Finalmente, la experiencia profesional obtenida en el desarrollo de su tesis le permitirá participar propositivamente en equipos de trabajo para la resolución de problemas.

Calendario Escolar

El calendario escolar de los estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica exige una dedicación de tiempo completo de parte del (de la) estudiante, y tiene las características siguientes.

Período lectivo: Semestral.

Periodicidad de nuevo ingreso: Anual.

Duración oficial: 24 meses.

Total de períodos lectivos: 4.

Opciones de Graduación

La única opción de graduación es mediante la preparación de una tesis escrita y su defensa oral en un examen de grado.

Ingreso al Programa

Para ingresar al Programa de Maestría, además de reunir la papelería y documentación que avale la información del aspirante, se requiere acreditar los exámenes de 4 materias:

Matemáticas en ingeniería
Métodos numéricos aplicados
Termodinámica metalúrgica
Fundamentos de química

El Programa ofrece anualmente y en línea, a través de la plataforma institucional “Teams”, estos 4 cursos propedéuticos con una duración de 30 horas cada uno durante el mes de junio. Los cursos se ofrecen de forma consecutiva y al término de cada curso, se aplica el examen correspondiente. Para mayor información comunicarse a la Coordinación Académica del programa, a la dirección electrónica siguiente.

coordinación.mcim@cinvestav.edu.mx

La Maestría tiene una distribución semestral, con una duración total de 4 semestres. Los primeros 2 semestres incluyen solamente la acreditación de cursos, mientras que los últimos 2 semestres están reservados para la realización de la tesis. La reprobación de una materia causa baja del Programa. Los cursos de cada semestre se describen a continuación.

Cursos o Materias del Programa

Primer semestre – Se requiere acreditar 5 cursos obligatorios con una duración de 48 horas cada uno. Dichos cursos se ofrecen en el período de agosto a diciembre y se describen a continuación.

Fenómenos de transporte en ingeniería metalúrgica

Se presentan los principios de ingeniería para el estudio de los procesos metalúrgicos, que son: Principios de continuidad, de conservación de masa, momentum y energía, y ecuaciones constitutivas. Ecuaciones diferenciales de conservación y sus condiciones iniciales y a la frontera. Ley de Newton de la viscosidad, soluciones de la ecuación de movimiento en flujo laminar. Ley de Fourier de la conductividad térmica, soluciones de la ecuación de conducción de calor en estado estable y transitorio, convección natural y forzada, coeficiente de transferencia de calor. Leyes de Fick para la difusión, transferencia de masa por convección y coeficiente de transferencia de masa. Ejemplos ilustrativos seleccionados del campo de procesamiento de materiales.

Termodinámica de procesos metalúrgicos

Presenta aspectos de enlace químico (iónico y covalente) y periodicidad (elementos del bloque s, p y d). Examina la termodinámica de vidrios fundidos, escorias y matas, tratando aspectos como: entropías y actividades de mezcla, curvas de actividad ideal y regular, teorías de fundidos iónicos, e.g. teoría de Temkin y

Flood. Se tratan las propiedades termodinámicas y de estructura de haluros, óxidos, carbonatos, silicatos y fosfatos fundidos. Se discute la solubilidad de azufre, agua, hidrógeno y nitrógeno de escorias. Se discuten propiedades termodinámicas de matas. Se examina la termodinámica de soluciones acuosas de metales, discutiendo aspectos de soluciones acuosas de electrolitos, actividad iónica y teoría de Debye-Huckel. Se cubre conducción electrolítica, i.e. mediciones de conductividad, conductividad molar y variación de la conductividad con la concentración. Examina aspectos electroquímicos revisando cuestiones sobre potenciales de electrodo, electrodo metálico, mecanismo de celda, ecuación de Nerst, variación del potencial redox con el pH, leyes de Faraday de electrólisis, eficiencia de corriente, eficiencia de energía, polarización, sobrepotencial, voltaje de descomposición y potencial de descarga. Se estudian los fundamentos de partición de solutos entre fases inmiscibles relevantes a extracción e intercambio iónico. Se examina el equilibrio en sistemas complejos de reacción (sistemas heterogéneos) usando métodos convencionales, interactivos y de minimización de energía libre para determinar el equilibrio.

Estructura y caracterización de materiales

La metalurgia física se encarga del estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los metales o aleaciones y su dependencia con la composición química, procesamiento mecánico o termomecánico y tratamiento térmico. Estas tres variaciones determinan de manera conjunta la estructura cristalina, la que cambia durante las diferentes etapas del procesamiento de los metales. La estructura cristalina es la característica más importante pues determina la funcionalidad de cualquier material ingenieril por su efecto final sobre las propiedades físicas y mecánicas. El curso se enfoca al estudio de la estructura cristalina, se revisan los fundamentos de la cristalografía de los metales, las técnicas para su estudio y caracterización, las imperfecciones cristalinas, las transformaciones de fase y se emplean los diagramas de fase binarios y ternarios como herramienta para la predicción de la microestructura final.

Deformación, microestructura y propiedades mecánicas de materiales sólidos

Uno de los objetivos fundamentales de la metalurgia mecánica es estudiar la respuesta de los metales a la acción de fuerzas durante el servicio de algún componente estructural. En particular, es imperativo conocer las magnitudes y direcciones de las fuerzas que puede soportar un metal sin que falle de manera catastrófica. El presente curso está diseñado para que al final el estudiante maneje los fundamentos metalúrgicos relacionados con los aspectos estructurales de la deformación plástica y la fractura. El énfasis del curso está puesto en la atomística del flujo plástico y la fractura y la forma en que la estructura metalúrgica afecta estos procesos. Se introduce el concepto de dislocación y se analizan las propiedades de las dislocaciones de tal forma que permitan racionalizar cualitativamente fenómenos tales como: endurecimiento por deformación, puntos de cedencia, endurecimiento por dispersión de fases y fractura. Finalmente, se revisan los aspectos ingenieriles de las técnicas de ensayo de la falla mecánica de metales (tensión, torsión, dureza, fatiga, termofluencia y fractura) poniendo especial interés en la interpretación de los resultados de los ensayos y sobre los efectos de las variables metalúrgicas sobre el comportamiento mecánico de los metales.

Cinética de procesos

Este curso presenta los principios y la práctica de las más importantes técnicas de procesamiento y caracterización de materiales, tales como: difracción de rayos X, microscopía electrónica de transmisión, microscopía óptica, espectroscopia óptica, análisis atómico, microscopía electrónica de barrido, análisis térmico diferencial, calorimetría diferencial de barrido, ensayos destructivos y no destructivos, y hornos.

Segundo semestre- Se requiere acreditar 5 cursos optativos con una duración de 48 horas cada uno. Todos estos cursos se ofrecen en el período de enero a mayo y presentan los contenidos que se describen a continuación.

Análisis y diseño de experimentos

Se presenta el papel del diseño de experimentos, la utilización de distribuciones de referencia externa para comparar dos medias, el muestreo aleatorio y la declaración de independencia estadística, la aleatorización y la formación de bloques con comparaciones apareadas, el contraste de significación e intervalos de confianza para medias, varianzas, proporciones y frecuencias, experimentos para comparar medias de k tratamientos, bloques

aleatorizados y diseños factoriales de dos factores, diseños con más de una variable de bloque, modelado empírico, diseños factoriales a dos niveles, diseños factoriales fraccionales a dos niveles, optimización de procesos con metodología de superficie de respuesta, modelado de dependencia, introducción a la filosofía seis sigma.

Solidificación de metales y aleaciones

Este curso aborda primeramente, desde un punto de vista macroscópico, la transferencia de calor durante la solidificación de piezas vaciadas en moldes de arena o permanentes. Enseguida, a través de un repaso de los diagramas de energía libre-composición, se define la fuerza motriz para la transformación líquido-sólido tomando en cuenta el efecto de la capilaridad. Después se revisan los conceptos para la nucleación homogénea y heterogénea como la primera etapa en el proceso de formación de la microestructura. A continuación se estudian los mecanismos atomísticos para el crecimiento y se establecen las ecuaciones que rigen la cinética del crecimiento en el frente de solidificación. Se analizan los criterios termodinámicos y dinámicos que permiten al frente de solidificación definir la morfología en función de las condiciones de enfriamiento. Posteriormente, se estudia la segregación de solutos en el proceso tanto a nivel micro como macroscópico para enseguida abordar el crecimiento de estructuras eutécticas, peritécticas y dendríticas. La macroestructura de un lingote describiendo la distribución de granos y la transición equiaxial-columnar se revisa como parte final de las etapas de formación de la estructura de solidificación.

Fluidinámica computacional

Este curso consiste en la presentación y empleo de una técnica numérica enfocada a resolver las ecuaciones diferenciales de conservación de momentum, masa y energía que se cubrieron previamente en el curso de “fenómenos de transporte en ingeniería metalúrgica”. Este curso incluye sesiones prácticas mediante el empleo de software en donde se ha implementado dicha técnica numérica. Por ejemplo, cuando se presenta la técnica del volumen finito o integral, se ha empleado el código abierto “CONDUCT” o bien los códigos comerciales “PHOENICS” o “ANSYS-Fluent”. Se hace énfasis en su utilización en casos de procesamiento primario de metales.

Tópicos selectos de procesamiento de minerales

El curso aborda los fundamentos físicos, químicos y fisicoquímicos involucrados en los diferentes procesos de separación empleados industrialmente para concentrar minerales, haciendo énfasis particular en los procesos y tecnologías de mayor importancia económica: la trituración y molienda, la concentración mediante flotación y la concentración gravimétrica de minerales. En este contexto, el objetivo del curso consiste en dotar al alumno de la información que le permita analizar, evaluar y diseñar etapas y circuitos de concentración de minerales específicos.

Análisis de procesos de extracción de metales

Pretende introducir al alumno a los fundamentos de los procesos de beneficio de minerales y a los principios, modelos y técnicas de extracción y recuperación hidrometalúrgica de valores metálicos y no metálicos presentes en minerales y residuos industriales. Temas: Fuentes de imperfección de los procesos de beneficio de minerales: complejidad del mineral (liberación), aspectos fundamentales de los procesos de separación física y naturaleza del equipo de separación (régimen de mezclado). Modelos de los procesos y equipos de conminución de minerales. Concentración de minerales mediante flotación (celda mecánica y columna de flotación). Termodinámica de soluciones acuosas relevantes a procesos hidrometalúrgicos importantes (diagramas de Pourbaix). Naturaleza química y electroquímica de sistemas de interés. Modelos cinéticos de reacciones heterogéneas sólido-solución acuosa. Tratamiento de soluciones de lixiviación: extracción con solventes y precipitación de valores metálicos. Análisis de procesos hidrometalúrgicos importantes: proceso de cianuración de oro, lixiviación de minerales de sulfuros complejos. Se presentan y analizan los procesos pirometalúrgicos en base a los fundamentos de la termodinámica, de los fenómenos de transporte y de la cinética química. Con este lineamiento se estudian los principios que rigen el comportamiento de los reactores y las diferentes operaciones pirometalúrgicas de interés industrial. Acondicionamiento de materiales, tostación de sulfuros, fusión, conversión, transformación de óxidos y refinación de metales, son los principales temas que se analizan en el curso.

Procesamiento por deformación de materiales

La importancia de los metales en la tecnología moderna se debe, en gran parte, a la factibilidad con la cual se pueden obtener productos útiles tales como: tubos, varillas, alambres, envases y placas o láminas. Estos productos se generan por dos rutas básicas: 1. Procesos de deformación plásticas, en los cuales el volumen permanece constante. 2. Procesos de maquinado, en los cuales el exceso de material es removido para obtener la forma final.

De igual importancia en la obtención de formas útiles por estas dos rutas es el control de las variables y su efecto sobre la microestructura y propiedades mecánicas del producto. El alumno al final del curso obtendrá amplios conocimientos de los fundamentos del conformado mecánico de los materiales en los procesos de manufactura de los productos metálicos, además de comprender el efecto de las variables de los procesos y sus efectos sobre la microestructura y propiedades mecánicas de los productos. Los procesos a estudiar son: laminación, forja, extrusión, trefilado, formado y maquinado de los materiales.

Ingeniería de fundición

El objetivo de este curso es proporcionar al estudiante los conocimientos necesarios a la manufactura de piezas mediante el proceso de fundición. El curso trata las diferentes operaciones de este método de fabricación como son: la fusión de metal, las diversas técnicas de moldeo, la fabricación de moldes, el diseño de alimentadores, colada y piezas, el análisis de defectos y las propiedades de los materiales colados. Los temas son presentados haciendo énfasis en los fundamentos que rigen los fenómenos implicados en cada operación desarrollada en la tecnología de fundición.

Microestructura y metalografía cuantitativa

El objetivo es dar a conocer a los estudiantes los principios básicos de la preparación metalográfica de los metales y sus aleaciones, así como los de las técnicas que se emplean para la determinación de sus principales características microestructurales. Al final del curso el alumno será capaz de identificar los constituyentes microestructurales de los principales sistemas de aleación, así como las diferentes técnicas que se emplean para determinarlos. Contenido específico: introducción, principios de microscopía óptica y electrónica, interfases y microestructura, preparación metalográfica, interpretación microestructural, metalografía óptica cuantitativa, análisis de imágenes, casos de estudio, prácticas de laboratorio.

Transformaciones de fase en ingeniería microestructural

El objetivo es dar a conocer a los estudiantes los mecanismos involucrados durante las diferentes transformaciones de fase que se llevan a cabo en los metales y sus aleaciones y que dan origen a las diversas microestructuras conocidas. Asimismo, conocer las resultantes propiedades físicas y mecánicas de los sistemas de aleación comercialmente importantes como función de los cambios en sus microestructuras a través de los tratamientos térmicos. Contenido específico: introducción, nucleación, crecimiento, cinética de las transformaciones de fase; polimórficas, orden-desorden, masivas, perlíticas, bainíticas, endurecimiento por precipitación, martensíticas. Por otra parte, analizar los principios tecnológicos de la tecnología de las transformaciones de fase, mediante casos de estudio y prácticas de laboratorio.

Procesamiento electroquímico y corrosión de metales

Se presentan los principios electrometalúrgicos: termodinámica y cinética de los procesos de electrodo, transferencia de carga y de masa, control mixto. Propiedades termodinámicas y de transporte de electrolitos. Se presta especial atención al análisis teórico y experimental de los procesos de electrodo por métodos estacionarios y transitorios como escalones y rampas de potencial y corriente, electrodo disco rotatorio y espectroscopía frecuencial, incluyendo la solución analítica y numérica de las ecuaciones que gobiernan los procesos. Se estudian los procesos electrometalúrgicos: electro-recuperación y electro-refinado de metales (Cu, Zn, Au, Ag, Cd y Al, etc.), leyes de electrólisis, balance de voltaje, energía y potencia del electrolizador así como su dimensionamiento. Dentro del procesado electrometalúrgico, se estudia la distribución primaria y secundaria de densidad de corriente, así como las ecuaciones hidrodinámicas, transferencia de masa y calor durante convección libre y forzada en electrolizadores, además del transporte iónico a un electrodo plano y electrodos porosos. Las bases termodinámicas y cinéticas de las reacciones de electrodo presentadas permiten

también abordar los mecanismos de corrosión acuosa de metales y aleaciones y relacionar el conjunto de reacciones de electrodo al diseño de aleaciones.

Tercer semestre- No hay cursos formales, pero el(la) estudiante se inscribe en la materia “**Proyecto de investigación**” para acreditar su avance en el desarrollo de su tesis. Al inicio de este semestre se prepara y presenta de forma escrita y oral ante Colegio de Profesores una propuesta calendarizada de trabajo de tesis. En la misma forma, al finalizar el semestre también se presenta un primer reporte de avance de tesis ante el Colegio de Profesores.

Cuarto semestre- Tampoco hay cursos formales, y el estudiante se inscribe nuevamente en la materia “**Proyecto de investigación**” para acreditar su avance en el desarrollo de su tesis. Justo antes de finalizar este semestre, se presenta un segundo reporte de avance de tesis ante Colegio de Profesores.

Se espera que el(la) estudiante presente su examen de grado al poco tiempo después de finalizar el cuarto semestre.

Preparó:

Dr. Francisco Andrés Acosta González
Coordinador Académico
Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica
E-mail: andres.acosta@cinvestav.edu.mx

Ramos Arizpe, Coahuila, a 4 de Noviembre de 2022