

1. Datos Generales de la asignatura

Nombre de la asignatura:	Solidificación
Clave de la asignatura:	MAI-1025
SATCA¹:	4-0-4
Carrera:	Ingeniería en Materiales

2. Presentación

Caracterización de la asignatura

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero en Materiales la capacidad para analizar y explicar fenómenos involucrados en la solidificación de materiales y entender la formación de su la microestructura.

Los materiales, en alguna etapa de su procesamiento pasan del estado líquido al sólido y es en esta etapa en donde los materiales adquieren sus principales características microestructurales que a su vez gobiernan las propiedades. El entendimiento de los fenómenos involucrados en la solidificación como la transferencia de calor, el cambio y estabilidad de fases, la nucleación, la difusión y segregación de soluto, el crecimiento, efectos capilares entre los principales permiten entender la formación de la microestructura y así poder obtener las propiedades deseadas en los materiales. Por el contenido que engloba y la extensión del campo de aplicación, el curso de solidificación es una parte importante en la formación de un Ingeniero en Materiales.

Para integrarla a la curricula esta asignatura requiere de competencias previas como son: construcción e interpretación de Diagramas de Equilibrio que le permitirán predecir las temperaturas y estructuras que se formarán durante el proceso de solidificación tanto en condiciones de equilibrio como fuera de él. Conceptos y principios fundamentales de la Termodinámica para la solución de problemas relacionados con solidificación, conocer y aplicar las ecuaciones de transferencia de calor vistas en fenómenos de transporte para relacionar con el proceso de solidificación.

Esta asignatura servirá de apoyo a otras como Tratamientos Térmicos en las que se puede modificar las heterogeneidades químicas y estructurales generadas por el proceso de solidificación por nuevas estructuras con propiedades adecuadas según la aplicación. También sirve de apoyo a las asignaturas de Análisis de Fallas Mecánicas y Corrosión y Degradación, en las que se debe analizar la influencia de la microestructura sobre el mecanismo de falla de un material en función de las condiciones de carga y medio ambiente a que se encuentren sujetas las piezas durante el servicio.

Puesto que la asignatura requiere del soporte de otras asignaturas directamente vinculadas con el desempeño profesional; ésta se ubica en la parte intermedia de la retícula. De manera particular, los conocimientos adquiridos en esta asignatura se aplicarán en el estudio de las piezas vaciadas, colada continua, soldaduras, diseño y optimización de nuevas aleaciones, entre otras.

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

Intención didáctica

La asignatura está organizada en seis temas. Se analiza progresivamente las diferentes etapas de solidificación, así como las formas o tipos de solidificación más importantes.

En el primer tema, Se hace una introducción a los procesos de manufactura en donde la solidificación juega un papel clave, como en los procesos de fundición y soldadura y en procesos especiales como solidificación dirigida, solidificación rápida, proceso Czochralski. Se continúa con el análisis de la transferencia de calor en el proceso de solidificación y al final del primer tema se presentan las aplicaciones de la transferencia de calor para el cálculo de tiempo de solidificación de piezas vaciadas y el diseño de mazarotas o alimentadores secundarios para a eliminación de porosidades y rechupes de las piezas vaciadas.

En el segundo tema, se abordan los aspectos termodinámicos que serán aplicados para explicar el proceso de nucleación en la etapa inicial de solidificación de materiales. Al final del tema se presentan las aplicaciones prácticas de la teoría de la nucleación para la inoculación y el refinamiento de grano de aleaciones metálicas.

En el tercer tema, se analiza el crecimiento del núcleo sólido cuando alcanza el tamaño crítico dentro del líquido e inicia su crecimiento, el cual comienza con la estabilidad del frente de crecimiento, sigue con efecto de segregación de soluto y con la teoría de estabilidad de la interfase y cinética de crecimiento del sólido.

El cuarto tema se enfoca en el crecimiento de eutécticos y otras reacciones invariantes en aleaciones de metales analizados de manera conceptual, partiendo de la identificación de los puntos invariantes durante el curso para que el estudiante adquiera la competencia de identificar los mismos aspectos durante su etapa profesional.

El tema cinco contiene las condiciones y procesos de obtención de estructuras amorfas en materiales desde el punto de vista teórico-práctico, para que el estudiante sea capaz de identificar las estructuras y relacionarlas con sus propiedades mecánicas, y de esta forma sugerir su posible aplicación industrial.

El tema seis contempla los principales defectos de solidificación y la formación de los mismos, para de esta forma precisar su efecto sobre las propiedades mecánicas de las piezas solidificadas. Adicionalmente, se aplican los conceptos de nucleación y crecimiento en aleaciones que pueden presentar reacciones invariantes y que inherentemente producen defectos durante la solidificación.

Es recomendable que, para la impartición de esta asignatura, el docente posea una amplia y reconocida experiencia en procesos de fabricación de materiales, a fin de sustentar con casos teórico prácticos los temas propuestos.

3. Participantes en el diseño y seguimiento curricular del programa

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Evento
Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec del 9 al 13 de noviembre de 2009.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Superior de Calkiní, Chihuahua, Superior de Irapuato, Morelia, Saltillo, Superior de Tlaxco y Zacatecas.	Reunión Nacional de Diseño e Innovación Curricular para el Desarrollo y Formación de Competencias Profesionales de las Carreras de Ingeniería en Materiales, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial.
Instituto Tecnológico de Zacatecas del 12 al 16 de abril de 2010.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Superior de Calkiní, Chihuahua, Superior de Irapuato, Morelia, Saltillo, Superior de Tlaxco y Zacatecas.	Reunión Nacional de Consolidación de los Programas en Competencias Profesionales de las Carreras de Ingeniería en Materiales, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial.
Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, del 24 al 27 de junio de 2013.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Cd. Victoria, Chihuahua, Irapuato, Morelia, Querétaro, Saltillo y Zacatecas.	Reunión Nacional de Seguimiento Curricular de las Carreras de Ingeniería en Energías Renovables, Ingenierías en Geociencias, Ingeniería en Materiales y Licenciatura en Biología del Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos.
Instituto Tecnológico de Toluca, del 10 al 13 de febrero de 2014.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Saltillo.	Reunión de Seguimiento Curricular de los Programas Educativos de Ingenierías, Licenciaturas y Asignaturas Comunes del SNIT.

4. Competencia(s) a desarrollar

Competencias específicas de la asignatura
Experimenta y reconoce los fenómenos y fundamentos de solidificación para mejorar las propiedades de los materiales obtenidos por procesos fundición y soldadura.

5. Competencias previas

<ul style="list-style-type: none"> • Aplica y construye diagramas de equilibrio de fases en sistemas unitarios, binarios y ternarios para diseñar, analizar, controlar, mejorar y desarrollar los materiales. • Integra los conceptos y principios fundamentales de la termodinámica para la solución de problemas de la ciencia e ingeniería de materiales. • Aplica los conceptos y principios de los fenómenos de transporte en el proceso de solidificación.

6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1	Procesos de Solidificación y Transferencia de Calor	1.1 Procesos de fusión y vaciado 1.2 Procesos de soldadura 1.3 Procesos especiales 1.3.1 Fusión de zona 1.3.2 Proceso Czochralski 1.3.3 Solidificación unidireccional 1.3.4 Esprayado térmico (Thermal Spraying) 1.3.5 Refusión superficial 1.4 Transferencia de calor en los procesos de solidificación 1.4.1 Balance de calor en el frente de solidificación 1.4.2 Transferencia de calor en el proceso de fusión de zona 1.4.3 Transferencia de calor en la solidificación de un medio semiinfinito 1.5 Regla de Chvorinov y aplicaciones 1.5.1 Tiempo de solidificación de piezas coladas 1.5.2 Diseño de mazarotas
2	Nucleación	2.1 Aspectos termodinámicos. 2.1.1 Temperatura de solidificación al equilibrio en sistemas macroscópicos de un constituyente. 2.1.2 Intervalo de solidificación de un sistema policonstituido. 2.2 Nucleación homogénea. 2.2.1 Teoría clásica. 2.2.2 Observaciones experimentales Turnbull et al. 2.3 Nucleación heterogénea. 2.3.1 Cinética de nucleación en el caso de un sustrato plano de talla infinita. 2.3.2 Inoculación de líquidos (refinación de grano). 2.3.3 Efecto de la estructura del sustrato. 2.3.4 Distribución de sitios de nucleación.
3	Crecimiento	3.1. Estabilidad del frente de crecimiento en un sistema con un constituyente. 3.1.1. Caso de solidificación columnar. 3.1.2. Caso de solidificación equiaxial. 3.2. Efecto de segregación de soluto. 3.2.1. Perfil de concentración de soluto delante de la interfase de solidificación. 3.2.2. Criterio de sobre-enfriamiento

		<p>constitucional.</p> <p>3.2.3. Definición de la capa límite equivalente.</p> <p>3.3. Formación de estructuras en un frente de solidificación no plano.</p> <p>3.3.1. Estructura celular.</p> <p>3.3.2. Estructura dendrítica.</p> <p>3.4. Teoría dinámica de la estabilidad de la interfase.</p> <p>3.4.1. Teoría de Mullins y Sekerka.</p> <p>3.4.2. Comparación de las predicciones de criterio de sobre-enfriamiento constitucional.</p> <p>3.5. Cinética de crecimiento dendrítico.</p> <p>3.5.1. Teoría de crecimiento al extremo.</p>
4	Crecimientos eutécticos y otros	<p>4.1 Eutécticos.</p> <p>4.1.1 Tipos de estructuras eutécticas</p> <p>4.1.2 Relación entre espaciado laminar, sobre-enfriamiento y velocidad de crecimiento en un eutéctico regular.</p> <p>4.2 Peritéticos.</p> <p>4.2.1 Descripción de las etapas de solidificación.</p> <p>4.3 Monotéticos.</p> <p>4.3.1. Descripción de las etapas de solidificación.</p>
5	Solidificación del estado amorfo	<p>5.1 Cinética de la nucleación en vidrios amorfos.</p> <p>5.2. Condición de obtención de metales amorfos.</p>
6	Defectos de solidificación	<p>6.1. Segregación.</p> <p>6.1.1. Microsegregación.</p> <p>6.1.2. Macrosegregación.</p> <p>6.2. Porosidad.</p> <p>6.2.1. Porosidad gaseosa.</p> <p>6.2.2. Porosidad por contracción.</p> <p>6.2.3. Microporosidad.</p> <p>6.2.4. Contracción (rechupe) y su control.</p>

7. Actividades de aprendizaje de los temas

Procesos de Solidificación y Transferencia de Calor.	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica: Identifica los procesos de solidificación y su empleo en la manufactura partes. Comprende los fundamentos de la transferencia de calor en el proceso de solidificación. Entiende y aplica el concepto de tiempo de solidificación para control de la solidificación de piezas.</p> <p>Genéricas:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar y exponer la importancia de la solidificación en los procesos de fabricación. • Analizar el efecto de la forma de la extracción de calor durante la solidificación. • Calcular el tiempo de solidificación de piezas fundidas. • Diseñar alimentadores secundarios para la eliminación de porosidad en piezas vaciadas.

<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de investigación. • Habilidad para buscar, procesar y analizar información. 	
Nucleación	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica: Comprende y aplica los factores que intervienen en el proceso de nucleación para conseguir un mayor control durante el proceso de solidificación.</p> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de investigación. • Habilidad para buscar, procesar y analizar información. • Capacidad de trabajo en equipo. • Capacidad para plantear, identificar y resolver problemas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar los conceptos básicos de termodinámica en el proceso de nucleación homogénea y heterogénea. • Simular los parámetros que afectan a la nucleación homogénea y heterogénea. • Interpretar los resultados obtenidos por simulación. • Investigar y relacionar el concepto de inoculación con los mecanismos de nucleación.
Crecimiento	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica: Comprende los mecanismos que regulan el crecimiento de la fase sólida a partir del líquido para conseguir un mayor control de los fenómenos de solidificación.</p> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de investigación. • Habilidad para buscar, procesar y analizar información. • Capacidad de trabajo en equipo. • Capacidad para plantear, identificar y resolver problemas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar los factores que influyen en la estabilidad de la interfase sólido/líquido. • Reconocer los diferentes tipos de solidificación dendrítica y su efecto en la solidificación de los materiales. • Analizar el comportamiento de la distribución soluto durante la solidificación de aleaciones binarias.
Crecimientos eutécticos y otros	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica: Comprende e interpreta los factores que afectan el crecimiento de los productos provenientes de reacciones eutécticas, peritéticas y monotéticas para predecir y controlar las microestructuras solidificadas.</p> <p>Genéricas:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender las variables que afectan la morfología y la cantidad de eutéctico en sistemas binarios. • Analizar y discutir en grupo la relación entre espaciado laminar, sobre-enfriamiento y velocidad de crecimiento en las estructuras eutécticas.

<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de investigación. • Habilidad para buscar, procesar y analizar información. • Capacidad crítica y auto-crítica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar los métodos prácticos de modificación de estructuras eutécticas. • Predecir mediante una curva de enfriamiento la naturaleza de la estructura de solidificación: eutécticas, peritéticas y monotéticas.
Solidificación del estado amorfo	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica: Comprende y controlar el proceso de solidificación para obtener un producto de estructura amorfa.</p> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y auto-crítica. • Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. • Compromiso con la calidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conocer las condiciones de solidificación bajo las cuales se pueden obtener materiales de estructuras amorfas. • Aplicar los conceptos de termodinámica fuera del equilibrio para predecir la obtención de una estructura amorfa.
Defectos de solidificación	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica: Comprende y controla los defectos de solidificación, para evitar o minimizar su influencia nociva sobre las propiedades de un producto terminado.</p> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y auto-crítica. • Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. • Compromiso con la calidad. • Capacidad para tomar decisiones. • Conocimiento sobre el área de estudio y la profesión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debatir sobre los mecanismos de formación de poros, fenómenos de contracción, segregación y control. • Emplear TIC's para predecir defectos de solidificación. • Analizar casos prácticos para controlar la contracción durante la solidificación.

8. Prácticas

<ul style="list-style-type: none"> • Experimentos con líquidos gaseosos para analizar los mecanismos de nucleación • Experimentos de solidificación en sustancias transparentes. • Solidificación en molde de arena y análisis de estructuras. • Solidificación en molde con sistema de enfriamiento y análisis de estructuras. • Solidificación en molde metálico y análisis de estructuras.
--

9. Proyecto de asignatura

El objetivo del proyecto que planteé el docente que imparta esta asignatura, es demostrar el desarrollo y alcance de la(s) competencia(s) de la asignatura, considerando las siguientes fases:

- **Fundamentación:** marco referencial (teórico, conceptual, contextual, legal) en el cual se fundamenta el proyecto de acuerdo con un diagnóstico realizado, mismo que permite a los estudiantes lograr la comprensión de la realidad o situación objeto de estudio para definir un proceso de intervención o hacer el diseño de un modelo.
- **Planeación:** con base en el diagnóstico en esta fase se realiza el diseño del proyecto por parte de los estudiantes con asesoría del docente; implica planificar un proceso: de intervención empresarial, social o comunitario, el diseño de un modelo, entre otros, según el tipo de proyecto, las actividades a realizar los recursos requeridos y el cronograma de trabajo.
- **Ejecución:** consiste en el desarrollo de la planeación del proyecto realizada por parte de los estudiantes con asesoría del docente, es decir en la intervención (social, empresarial), o construcción del modelo propuesto según el tipo de proyecto, es la fase de mayor duración que implica el desempeño de las competencias genéricas y específicas a desarrollar.
- **Evaluación:** es la fase final que aplica un juicio de valor en el contexto laboral-profesión, social e investigativo, ésta se debe realizar a través del reconocimiento de logros y aspectos a mejorar se estará promoviendo el concepto de “evaluación para la mejora continua”, la metacognición, el desarrollo del pensamiento crítico y reflexivo en los estudiantes.

10. Evaluación por competencias

Para evaluar las actividades de aprendizaje se recomienda solicitar: reportes de prácticas, reportes de visitas industriales, mapas conceptuales, problemas resueltos, cuestionarios y exámenes.

Para verificar el logro de las competencias del estudiante se recomienda utilizar:

Exámenes, Portafolio de evidencias, Lista de cotejo, Matrices de valoración y Rúbricas.

11. Fuentes de información

1. Flemings M.C. (1974) *Solidification Processing*, McGraw-Hill.
2. Kurz, W. (1998) *Fundamentals of solidification*, Trans Tech Publications.
3. Stefanescu, D.M. (2009) *Science and Engineering of Castings Solidification*, Springer.
5. Verhoeven, J.D. (1987) *Fundamentos de Metalurgia Física*, Limusa.
6. Askeland, D.R. (2005) *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Cengage Learning.
7. Philbert, B.J. (1973) *Metalurgia General*, Hispano Europea.
8. Leslie, W.C. (1991) *The Physical Metallurgy of Steels*, Tech-Books.
9. Reed-Hill, R.E. (1986) *Principios de Metalurgia Física*, Continental.
10. Smith, W.F., (2006) *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. McGraw-Hill.