

MODELOS E INGENIERÍA METALÚRGICA

Patricia M. Dardati

*Dpto. Mecánica y CIII, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional,
Maestro López esq. Cruz Roja Argentina s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina,
pdardati@industrial.frc.utn.edu.ar*

Keywords: Modelos, simulación, ingeniería.

Abstract. Los modelos son instrumentos metodológicos de gran importancia en las ciencias que constituyen elementos esenciales en el desarrollo de la mayoría de ellas. La ingeniería, considerada como un saber práctico, no es una excepción. El ingeniero, en su tarea de hacer lo que todavía no existe, debe predecir y elaborar paradigmas poiéticos (de fabricación); para ello, no sólo hace uso de los modelos de otras disciplinas, fundamentalmente de la física y la matemática, sino que además debe crear los propios de manera tal que le sirvan para simular aquello que aún no es. Debido al carácter poiético de la ingeniería el valor de verdad de los modelos que ella propone difiere de aquel requerido para las ciencias teóricas. Las diversas ramas de la ingeniería progresan en forma constante y cada vez a ritmos mas acelerados en un devenir dialéctico con las ciencias. Los modelos, en su función de representar y simular la realidad, acompañan dicha evolución incorporando los nuevos conocimientos y aprovechando los progresos de algunas herramientas, especialmente las informáticas, pero también siendo a su vez motores de los avances científicos generales.

En este trabajo se presentan modelos utilizados en la ingeniería metalúrgica para la solidificación de aleaciones para ejemplificar distintos aspectos relacionados con la función, la evolución y el valor de verdad de los modelos predictivos en la ingeniería.

1. INTRODUCCIÓN

En distintas épocas y según las diferentes corrientes de la filosofía de la ciencia, se han dado a los modelos variada importancia. Han sido considerados desde simples elementos interpretativos en los que la teoría se satisface, hasta instrumentos fundamentales y esenciales en el desarrollo del conocimiento científico o filosófico. Actualmente, suscitan en especial un marcado interés metodológico y epistemológico, y son numerosas las publicaciones que tratan sobre ellos. Y conjuntamente con un incremento del interés por ellos se manifiesta una aceptación generalizada de su importancia.

Son muchas las definiciones que pueden encontrarse en la bibliografía sobre qué son los modelos y para qué sirven y también muy diversas las clasificaciones que de ellos se hace en el marco de las ciencias en general. No son tantos, sin embargo, los trabajos dedicados a analizar el tema de los modelos y su valor de verdad en el campo concreto de la ingeniería como saber eminentemente práctico-poiético (fabricador). El objeto de la ingeniería es claramente diferente al de las ciencias puras aún cuando algunas de éstas constituyan pilares esenciales e insustituibles de aquélla. Por ese motivo resulta de interés analizar el tema desde el punto de vista particular de la ingeniería, diferenciándolo, cuando sea posible o necesario, del correspondiente a las ciencias teóricas.

Este trabajo no tiene como objeto un análisis exhaustivo sino más bien dejar planteado el tema y sus problemas para futuras discusiones.

En la sección 2 se discute qué son y para qué sirven los modelos. La diferencia entre ciencia e ingeniería queda planteada en la sección 3. En las secciones 4, 5 y 6 se analizan el valor de verdad, los tipos y las distintas complejidades de los modelos. Por último, en la sección 7 se ejemplifican los temas tratados con modelos del ámbito de la metalurgia.

2. ¿QUÉ SON Y PARA QUÉ SIRVEN LOS MODELOS?

Como ya se adelantara, los modelos se adscriben al ámbito de la epistemología y la metodología en general; ellos constituyen instrumentos necesarios para la investigación científica y tecnológica, la formulación de teorías y la transmisión de conocimientos. De hecho, ellos resultan esenciales en la adquisición, formación y transmisión de conocimiento en las ciencias y en las técnicas.

Su diversidad de clases y funciones impide que sea posible llegar, en pocas líneas, a una noción conceptual única, precisa y general, o a dar una respuesta definitiva a cuestiones tales como cuándo un modelo es válido y cuáles son los pasos a seguir para crearlo. Por eso hemos de limitarnos tan sólo a introducir el tema y el problema de los modelos desde el punto de vista de los saberes prácticos y más específicamente desde el punto de vista de la ingeniería.

Giere (1998) propone un concepto general capaz de abarcar tal pluralidad y expresa que un modelo es aquello que representa un sistema en estudio. Como él mismo reconoce, de esta definición surge inmediatamente la necesidad de esclarecer cuándo algo representa a otra cosa y, considerando que la condición de isomorfismo es demasiado restrictiva, habla entonces de similitud entre el objeto representado y el modelo. Por cierto, el concepto de *similitud* constituye, desde los tiempos de Platón a nuestros días, una de las cuestiones dialécticas más importantes y difíciles, en tanto resulta de una mezcla o compromiso entre lo idéntico y lo distinto; problema, éste, que no puede afrontarse ahora, pero que conviene dejar señalado.

Si, por un lado, nos concentramos en los fines específicos que dicha representación suele tener en las ciencias y en las técnicas y, por otro, nos contentamos con una noción empírica y

casi intuitiva, los modelos pueden caracterizarse como medios, materiales o abstractos, distintos al objeto de estudio, que permiten (sin pretender ser exhaustivos en la enumeración), describir, explicar, comunicar, predecir y regular.

Las funciones enumeradas de los modelos pueden constituirse en una adecuada base para clasificarlos independientemente de la disciplina en la que se apliquen; aunque debe advertirse que, como es evidente en el ejercicio de la investigación, un modelo puede pertenecer a más de un grupo y cumplir más de una función a la vez y que, como ya se dijo, existen otros muchos criterios posibles.

La representación que ellos hacen de la parte del mundo en consideración es en todos los casos limitada. Los modelos son simplificaciones o bien idealizaciones de la realidad y, en general, sólo tienen en cuenta algunos aspectos de la misma. Tanto se restringe el número de variables que se considera o el rango de valores que pueden tomar, como el número de las relaciones que entre dichas variables se establecen. A veces se hacen suposiciones que claramente se apartan de la realidad en su integralidad con el fin de simplificar aún más el problema. En ocasiones las limitaciones introducidas en el modelo son el resultado de una elección, motivada por diversos factores; sin embargo en algunos casos se deben simplemente a ignorancia.

Las suposiciones que se hacen con el fin de disminuir la complejidad del modelo naturalmente restringen su similitud con la realidad y esto debe ser tenido en cuenta cuando se lo emplea, cualquiera sea la finalidad de su utilización. Sólo el conocimiento y cuidado respecto de sus limitaciones permite un uso correcto del modelo.

Una misma realidad puede ser representada por modelos distintos. Es decir, dos modelos diferentes pueden tener el mismo objeto material y el mismo objeto formal. En el proceso teórico de adquisición de un conocimiento suelen establecerse cadenas de modelos, es decir modelos de modelos, como se verá más adelante.

3. CIENCIAS TEÓRICAS E INGENIERÍA

Los modelos que se usan en las ciencias y técnicas están en función del objeto de cada saber específico, de modo que sus funciones pueden ser diversas según el ámbito epistémico en el que operen. Esto implica la necesidad de distinguir las ciencias teóricas de las técnicas que, como la ingeniería, si bien hacen uso de aquéllas (principalmente, física y matemáticas) tienen un objeto y finalidad distintos.

Para dilucidar cuál sea la diferencia entre ciencia teórica e ingeniería (considerando a esta última como técnica científica), es un criterio clásico adoptar el objeto formal respectivo como principio especificador. De esta manera, suele decirse que el objeto de la ciencia es el conocimiento universal y por sus causas de un sector de la realidad, mientras que el de la ingeniería es el saber hacer algo. Es decir, la ciencia pura sería un saber teórico y la ingeniería uno práctico.

Dicha distinción, que en principio resulta clara para la epistemología clásica (de matriz aristotélica), no lo es tanto respecto de la ciencia moderna. En efecto, tal criterio puede complicarse cuando lo que se busca es establecer qué tipo de actividad realiza un agente determinado (científico o ingeniero) en el desarrollo de su trabajo; entonces, y sobre todo en la actualidad, la línea demarcatoria entre ambos saberes es bastante difusa. Cada vez son más los científicos que investigan movilizados por desafíos planteados por el acelerado avance de la tecnología y cada vez es mayor la ambición de los hombres por dominar la naturaleza y beneficiarse de este dominio. Además, si se tiene en cuenta que para el ingeniero no sólo cuenta alcanzar el fin propuesto (eficacia), garantizando la seguridad, sino también alcanzarlo de la manera más económica posible (eficiencia), se advierte rápidamente la

necesidad de una mejor y más profunda comprensión y conocimiento de la naturaleza. Propiamente hablando, no puede existir una técnica basada sólo en la experiencia, sin aplicación de principios y sin conocimiento de causas; toda técnica supone una racionalidad superior a la de la mera experiencia; y en nuestra época, una técnica cuyos principios no sean científicos, no se considera suficiente, al menos si se busca mejorar continua y rápidamente. ¿Existe actualmente en las ciencias naturales el deseo de saber por el saber mismo? ¿se realiza investigación sin un objetivo de aplicación inmediata? Al parecer el avance de la tecnología y los crecientes desafíos del dominio técnico de la naturaleza constituyen un motor que arrastra sin tregua a la ciencia.

Suele afirmarse que la ingeniería se ocupa de lo artificial mientras que la ciencia lo hace de lo natural. Pretroski (2000) cita de Theodore von Kármán lo siguiente: “Un científico estudia lo que es mientras que un ingeniero crea lo que nunca fue” (“A scientist studies what is, whereas an engineer creates what never was”). En estas visiones de la diferencia entre ciencia e ingeniería las dificultades para establecer claramente el límite entre las actividades que un investigador realiza persisten. ¿No hace ciencia el investigador que estudia, con el único fin de conocer por sus causas algo que ha sido creado por el hombre? Por ejemplo, ¿investigando una nueva aleación?

No pretendo alcanzar en este trabajo un criterio definitivo respecto a la distinción epistemológica entre ciencia e ingeniería; sin embargo, parece apropiado mencionar el tema, haciendo hincapié en la ineludible función creadora o fabricadora del saber en la ingeniería, para tratar algunas diferencias que se plantean en aspectos tales como la verdad o los modelos y que serán abordados más adelante y desde el punto de vista de la ingeniería.

4. VALOR DE VERDAD DE LOS MODELOS EN LA INGENIERÍA

La ciencias teóricas construyen sus teorías como estructuras lógicas y coherentes apoyadas sobre pilares constituidos por principios y leyes que se consideran puntos de partida verdaderos. A partir de ellos, las afirmaciones y conclusiones a las que se llegue, si fueron alcanzadas a través de razonamientos correctos, serán también considerados verdaderos. Pero ocurre que a veces los principios y leyes básicas son postulados propuestos para situaciones ideales que no se verifican en la realidad (aun cuando hayan surgido de la observación de la realidad y la posterior abstracción), como suele ocurrir en la física o bien se trata de proposiciones abstractas que podrían tener más de una interpretación física como sucede en la matemática. Al parecer, pues, en las ciencias teóricas el valor de verdad se presenta en cierta forma disociado de la realidad o al menos podría estarlo, si los principios que se consideran verdaderos (y desde los que se parte) lo son para condiciones ideales que de ninguna manera se producen en el mundo real o bien si el punto de partida lo constituyen un conjunto de definiciones. Pero, entonces, ¿que valor tiene la vieja definición de verdad como *adaequatio intellectus rei*?

El tema y el problema de la verdad en las ciencias resulta una cuestión filosófica sumamente difícil y su discusión está lejos del propósito de este artículo, cuya pretensión, más modesta, es dejar planteada la discusión acerca de los modelos utilizados por los ingenieros y de aquellas que puedan ser sus características particulares y distintivas. Pero alguna alusión es inevitable, para que tenga sentido el problema que se afronta en este trabajo.

Para una actitud realista, la noción de verdad siempre incluye una relación entre el juicio de la inteligencia y la realidad, aunque ésta sólo sea entendida intuitiva o empíricamente. Todo científico, más allá de teorías, piensa que su tarea tiene que ver con las cosas. Es cierto que la ciencia moderna hizo suyo, en alguna medida, el modelo metodológico de la geometría euclídea, adoptando en muchos casos el método hipotético deductivo. Pero de esto no se

sigue un apartamiento definitivo de la realidad como pauta de verdad. A lo sumo, podrá hablarse de verdades hipotéticas y de verdades categóricas, según la verificabilidad empírica de los enunciados.

Entiendo que la cuestión es más sencilla en el caso de la ingeniería. El hacer cosas es el fin del ingeniero, por lo tanto su tarea concluye en la obra y no en el saber mismo, cuyos elementos teóricos, como ya fue mencionado, pueden ser tomados de otras ciencias. Parece razonable entonces proponer un valor de verdad práctico (Albisu, 2001) para el saber en la ingeniería diferente al de la verdad, que podríamos denominar teórica, de las ciencias puras. ¿Debería esta verdad práctica estar relacionada con el punto de partida (el conocimiento y experiencia de los cuales se parte para la concepción de la obra y donde deberíamos incluir a los modelos)? ¿o más bien con la acción realizadora de la obra? ¿o tal vez sólo con la obra misma como punto final del proceso?. ¿Deberían acaso considerarse los tres aspectos a la vez? Pienso que sí, pero siempre poniendo el acento en la perfección de la obra misma, como resultado de la inteligencia fabricadora del hombre.

Resulta obvio que aún cuando el ingeniero parta de conocimientos y modelos formalmente válidos, si éstos no son utilizados en la forma correcta difícilmente se llegue al fin deseado. Mucho más claro resulta el requisito imprescindible de partir de los conocimientos correctos. Pero, en definitiva, la verdad del saber de la ingeniería se mide por la perfección de la obra.

La verdad práctico-poiética, que bien podemos identificar con la verdad de la obra, no la constituye la propia existencia de ésta sino la eficacia, eficiencia y seguridad de su desempeño y también de su creación (fabricación), relacionadas, claro está, con los objetivos establecidos inicialmente. En tal caso la verdad o falsedad de un modelo estaría directamente relacionada con la verdad o falsedad de la obra concluida y de su construcción. Y teniendo en cuenta que entre el modelo y la obra media la acción del ingeniero resulta interesante notar que así relacionados la verdad del modelo en ingeniería no dependería solamente del modelo mismo sino también del correcto uso que de ese modelo se haga. Esta última resulta una particularidad fundamental de la ingeniería como ciencia práctica que no sólo plantea modelos sino que los usa en los procesos de realizaciones concretas que constituyen su fin último.

Es evidente que la verdad de un modelo, tal como fue planteada, en función de la verdad de la obra, no pretende obviar la validez del modelo en sí mismo verificada en los procesos que, justamente, llamamos de validación (ni olvidar la importancia de los procesos de verificación por ejemplo en los modelos computacionales) (Godoy y Dardati, 2001) sino simplemente agregar un aspecto fundamental que consiste en la importancia, cuando el fin es hacer, de la correcta utilización del modelo. En otras palabras, no podemos evitar la consideración de la intervención del que hace algo y del resultado de ese hacer.

Los modelos, no son la realidad misma sino, como ya se dijo, sólo una representación de ella y de esta manera no permiten acceder a verdades de máxima exactitud y verificabilidad empírica; son aproximativos o probables, y el grado de aproximación no debe ser desconocido a la hora de su aplicación, en el proceso de hacer.

Consultando cualquier revista científica dedicada a un tema específico podemos fácilmente comprobar cómo un mismo problema puede ser tratado con diferentes modelos. ¿Es acaso razonable decir que sólo uno de dichos modelos es verdadero y los otros falsos?. Desde el punto de vista poiético diría que, aún partiendo de la base de que todos han sido correctamente implementados, verificados y validados, todos podrían ser verdaderos o falsos según se cumpla o no con el restante requisito, igualmente importante, que consiste en el correcto uso del modelo. En otras palabras todos, o muchos, pueden conducir a decisiones y acciones correctas o incorrectas. La verdad del modelo no debe buscarse sólo en él mismo

sino en forma complementaria con el uso que del él se haga a través de la verdad o falsedad práctica de la obra final. Es decir, dependerá en gran medida de la experiencia y el conocimiento del fenómeno analizado y del mismo modelo que tenga el ingeniero que lo utilice.

Es fundamental conocer el campo de aplicación para el cual el modelo es válido, cuáles son los aspectos que es capaz de predecir, cuál es la incertidumbre de los resultados, la sensibilidad a los parámetros. Cuanto más conocimiento se tenga del modelo más segura será su aplicación. El hecho de que la ingeniería deba hacer lo que aún no existe implica que el modelo utilizado en la simulación no tendrá su validación final hasta que la obra no esté concluida y dicha validación evidentemente dependerá del uso dado al modelo y por lo tanto del conocimiento que el ingeniero tenga del mismo fundamentalmente en lo que respecta a su aplicabilidad y limitaciones.

5. TIPOS DE MODELOS USADOS EN INGENIERÍA

Una forma muy utilizada de clasificación general de los modelos está basada en la función de los mismos. Los modelos pueden tener, entre otros, fines explicativos, demostrativos, interpretativos, predictivos y regulativos. Desde este punto de vista los ingenieros, en el desempeño de las tareas inherentes a su profesión, emplean fundamentalmente dos de los mencionados tipos: los modelos predictivos y los modelos regulativos.

Con los modelos regulativos los ingenieros procuran guiar el desarrollo de la obra o proceso, por ejemplo, indicar los materiales y dimensiones previstas en el diseño o la correcta secuencias de tareas y la descripción de las mismas. En general, estos modelos surgen cuando las decisiones ya han sido tomadas pero, antes de llegar a esta instancia, en la etapa de estudio y análisis del problema es común el uso de modelos del tipo predictivo. El uso del modelo con el fin de generar información acerca del comportamiento del sistema que es representado se denomina simulación. Los modelos predictivos permiten al ingeniero realizar simulaciones de la realidad, posibilitándole así adquirir conocimientos sobre el objeto representado y extraer conclusiones útiles para ser utilizados en el proceso de diseño y desarrollo de nuevas obras y tecnologías, y también en la mejora y verificación de las ya existentes. Los ingenieros siempre han usado modelos predictivos; en ocasiones dichos modelos son materiales y constituyen réplicas a escala de la obra a realizar, o de partes de las mismas, o bien prototipos sobre los que se realizan pruebas experimentales tendientes a analizar su comportamiento y sobre los que se introducen modificaciones necesarias. En la actualidad es cada vez más frecuente el uso de modelos computacionales, que permiten la simulación virtual del comportamiento del sistema bajo estudio y que posibilitan, en muchos casos, el ahorro de tiempo y recursos. Los modelos computacionales predictivos son en general el resultado de una secuencia de modelos en los que podemos encontrar modelos tomados de las ciencias teóricas así como modelos específicos creados para el problema concreto a resolver. Como noción general se puede presentar la siguiente secuencia:

- Observación del fenómeno y experimentación.
- Planteo de la teoría o modelo explicativo del fenómeno.
- Generación de un modelo matemático.
- Generación de un modelo numérico.
- Generación del modelo computacional.

En general cada nivel dentro de la cadena de modelos incorpora nuevas suposiciones; algunas con fines simplificativos; otras, consecuencia del desconocimiento o de la falta de datos. ¿Podríamos inferir que de esta manera el modelo final se aleja de la verdad? Evidentemente, la similitud del modelo con la realidad o sistema que representa disminuirá

con cada simplificación que con respecto al sistema real se haga; sin embargo, planteada la verdad en el sentido práctico del que se habló más arriba, el modelo puede conducirnos igualmente a ella siempre que sea útil y ayude al ingeniero, en mayor o menor medida, a cumplir con el objetivo poético; en definitiva, mientras nos acerque y no nos aleje de dicho fin. Esto dependerá del uso que se haga del modelo y de la manera en que las predicciones que con él se realicen sean aplicadas al diseño o a la resolución del problema.

6. NIVELES DE COMPLEJIDAD, GRADOS DE REPRESENTATIVIDAD Y VALOR DE VERDAD

Concentrándonos en los modelos computacionales, es posible apreciar que, con el paso del tiempo, los modelos utilizados en un área determinada de conocimiento aumentan paulatinamente su complejidad en un proceso, que podríamos denominar dialéctico, de acercamiento a la realidad. El progreso y profundización lógicos en el conocimiento de los fenómenos tratados, así como el desarrollo de nuevas técnicas numéricas y el constante incremento en la capacidad de cálculo y almacenamiento de las computadoras, permiten reemplazar modelos fenomenológicos sencillos por modelos que toman en consideración mayor cantidad de variables y que combinan análisis a distintas escalas (Godoy, 2003). También es cada vez más frecuente el tratamiento conjunto y acoplado de diferentes fenómenos que intervienen en un mismo problema.

Siempre considerando modelos debidamente verificados y validados ¿Se aproxima más a la verdad un modelo cuanto mayor es su complejidad? Aún teniendo en cuenta que un modelo en ingeniería no posee la verdad en sí mismo, o al menos no completamente, ya que constituye una herramienta y no el fin de la tarea del ingeniero, es difícil negar que modelos más “sofisticados”, bien utilizados, permiten obtener resultados más completos y seguros y son herramientas más potentes a la hora del diseño y de la solución de problemas. Aunque, por supuesto, tampoco podemos desconocer que aún los más avanzados programas computacionales pueden arrojar resultados equivocados si son utilizados por operadores inexpertos y que, normalmente, cuanto mayor sea la cantidad de variables y fenómenos involucrados mayor será la cantidad de datos que será necesario ingresar al programa y que pueden constituirse en nuevas fuentes de error cuando sus valores son difíciles de obtener.

Para lograr incorporar más aspectos del fenómeno o sistema en análisis al modelo y para que más variables puedan ser identificadas es necesario profundizar el conocimiento del universo en estudio pero, a su vez, el mismo modelo se constituye en un laboratorio virtual que sirve de guía para la confirmación o revisión de algunos de los fundamentos físicos tomados como base.

7. EJEMPLOS EN LA INGENIERÍA METALÚRGICA

El objetivo de esta parte del trabajo es el de ejemplificar algunos de los aspectos relacionados con los modelos en la ingeniería y que han sido mencionados en las anteriores secciones. Se desea mostrar cómo, para una misma realidad o problema, se utilizan distintos tipos de modelos o bien de distinta complejidad y cómo la verdad o falsedad a la que los mismos conducen dependen no sólo de la propia validez del modelo sino también del uso que se hace él. Se ejemplifican también las aproximaciones sucesivas a la realidad que, a lo largo del tiempo, se producen en un determinado tema. Los ejemplos pertenecen al campo de la ingeniería metalúrgica y están relacionados con los procesos de enfriamiento que se desarrollan en la obtención de piezas por el método de colada y moldeo.

La metalurgia es una actividad milenaria. Basada en sus comienzos y durante muchos años sólo en la experiencia y habilidad del artesano es, cada vez más, una actividad

fundamentada en el saber científico. Esta disciplina no es ajena a los avances de la computación y al desarrollo que con ésta se produce en las prácticas de la ingeniería en general. En el campo de la producción de piezas fundidas, por ejemplo, se incrementa día a día el uso de modelos computacionales, al menos en las medianas y grandes empresas.

Complejidad del problema

Entre los múltiples métodos empleados para la obtención de piezas metálicas, el proceso de colada y moldeo es muy utilizado para la fabricación de elementos de formas complicadas, que serían muy costosos o incluso imposibles de obtener por deformación o maquinado. Sin embargo, esta práctica no resulta para nada sencilla y el conseguir piezas sanas y microestructuras adecuadas encierra innumerables dificultades. Los elementos obtenidos por fundición pueden presentar diversos defectos: deformaciones y dimensiones incorrectas, tensiones residuales, micro y macro-rechupes, porosidades, inclusiones y propiedades mecánicas del material inaceptables debido a microestructuras inadecuadas.

Los factores que intervienen en el resultado final son muchos, entre ellos pueden mencionarse la composición de la aleación, el tratamiento del líquido y la velocidad de enfriamiento pero, a su vez, cada uno de estos aspectos involucra a otros. Por ejemplo, la velocidad de enfriamiento depende de la forma de la pieza, el sistema de colada, la forma y material del molde, las propiedades térmicas del material fundido y su calor latente de transformación. Cada uno de estos aspectos admite también sus propias ramificaciones. Durante el proceso de enfriamiento del material colado se producen fenómenos de distinta naturaleza, que interactúan con fuerte acoplamiento, dando como resultado el producto final. Los aspectos comentados, alcanzan para dar una idea de la complejidad del problema y de la necesidad de contar con modelos predictivos que faciliten la tarea de diseño, tanto de la pieza como del proceso, y que contribuyan así a disminuir o eliminar costosos y largos procesos de prueba y error.

Con el fin de tener una visión más clara del tema, [Celentano \(1994\)](#) propone descomponer el proceso de la solidificación en tres fenómenos o problemas termodinámicamente interdependientes: el problema térmico, el problema metalúrgico y el problema mecánico. El análisis individual de cada uno simplifica notablemente el tratamiento, sin embargo, nos aleja de una consideración más realista del problema. Por otro lado, un estudio que tenga en cuenta el fuerte acoplamiento de los tres aspectos complica la resolución del problema y requiere un cuidadoso análisis para no incurrir en errores que alejen igualmente los resultados de los valores reales.

Evolución de los modelos

Defectos frecuentes en las piezas fundidas, tales como rechupes y porosidades, pueden originarse en sistemas de alimentación incorrectos o secuencias de enfriamiento inadecuadas. Puntos calientes que quedan rodeados de material ya solidificado o canales de llenado que solidifican prematuramente pueden producir cavidades causantes de rechazo. Lograr una solidificación convenientemente dirigida es uno de los objetivos principales en el diseño de la pieza, el molde y el sistema de colada. Uno de los primeros métodos que fueron empleados para lograr este fin consiste en la generación de una representación de la secuencia de solidificación de la pieza a través de los llamados módulos de solidificación. Los mismos consisten en una relación entre un volumen y una superficie y se suponen razonablemente proporcionales a la velocidad de enfriamiento. Según este método la pieza se divide en formas geométricas simples y luego se determinan los módulos de solidificación y la porción del volumen de cada segmento. Se traza entonces un diagrama acumulativo que indica la secuencia de enfriamiento y solidificación ([Karsay, 19976](#)). Resulta evidente que dicho

diagrama puede ser considerado como un modelo sencillo que representa sólo uno de los muchos aspectos involucrados en el proceso de enfriamiento de una pieza. Es obvio que la secuencia de enfriamiento será sólo aproximada y dicha aproximación dependerá en gran medida de la complejidad de la forma de la pieza. Sin embargo, este sencillo procedimiento ha ayudado a los ingenieros, y lo sigue haciendo en muchos casos, en los primeros pasos del diseño. Indudablemente la sencillez del modelo debe ser compensada con la experiencia y habilidad del operador para saber interpretar la información y aproximarse así a la realidad.

Los primeros modelos computacionales (cuyo planteo sigue en general la secuencia de modelos mencionada en la sección 5) desarrollados para el análisis de piezas que solidifican también se concentraron sólo en el aspecto térmico del proceso, enfocándolo desde un punto de vista macroscópico. Si bien en la literatura es posible encontrar distintas expresiones de los modelos matemáticos y numéricos empleados (Celentano, 1994), se pueden resumir que en general el material es considerado como un continuo en el que la temperatura se determina resolviendo, por alguna técnica numérica, una ecuación diferencial de conducción del calor. Las temperaturas de comienzo y final de cada cambio de fase que se produce durante el enfriamiento son datos del problema (determinadas experimentalmente) y el calor latente es liberado durante dichos intervalos según una fracción de cambio de fase que es función (en general lineal) de la temperatura. Para la resolución numérica de la ecuación es bastante generalizado el uso del método de los elementos finitos para la discretización espacial y el de las diferencias finitas para el tratamiento temporal, pero también se emplean otros. Las implementaciones computacionales más completas permiten tener en cuenta no sólo la pieza sino también el molde y el contacto entre ambos. Es común que los resultados se muestren como un mapa de colores, presentado sobre la geometría de la pieza, para un determinado tiempo (Ver Figura 1).

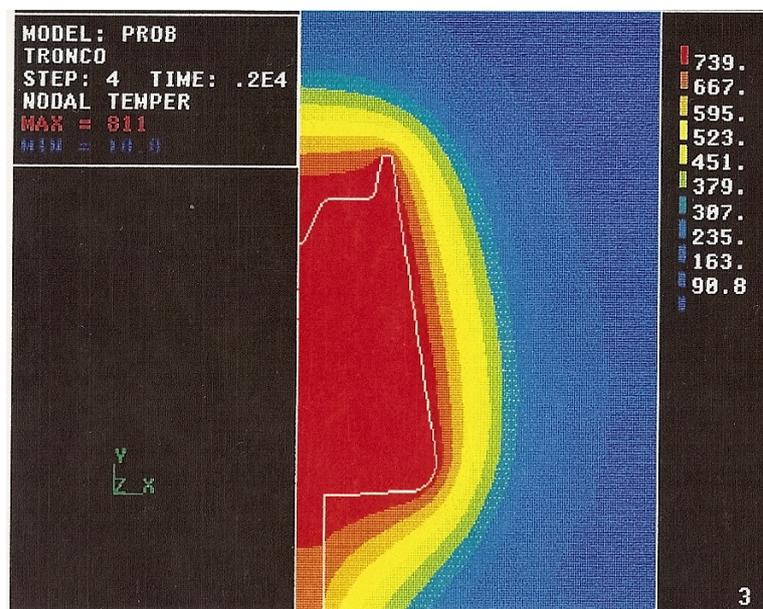


Figura 1: Representación de la temperatura como mapa de colores sobre la pieza y el molde. Extraído de Celentano (1994).

De esta manera es posible identificar las primeras y últimas zonas en solidificar. También es frecuente representar las curvas de enfriamiento de algún punto en particular. Estas permiten observar la evolución de la temperatura en función del tiempo y determinar la velocidad de

enfriamiento del punto en cuestión. Un ejemplo de una curva de enfriamiento obtenida con un programa que trata el enfriamiento de la fundición nodular, y que muestra la meseta correspondiente al primer cambio de fase (líquido - sólido), puede verse en la [Figura 2](#).

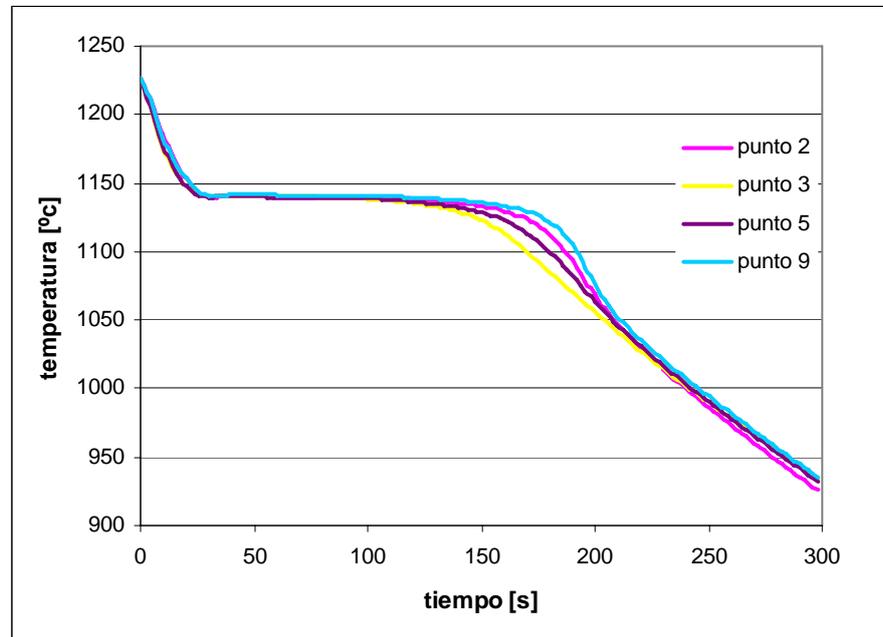


Figura 2: Curvas de enfriamiento para distintos puntos de una pieza.

Es evidente que un modelo computacional como el descrito resulta más complejo que el de los módulos de solidificación. Aún cuando ambos se concentran en el aspecto térmico macroscópico del problema, en el modelo computacional se tienen en cuenta más elementos, como por ejemplo la forma de la pieza, la temperatura puede analizarse para cada punto a lo largo del tiempo y la ubicación de los puntos calientes es más precisa. El ingeniero puede obtener más información del modelo que, en principio, se asemeja más a la realidad, pero debe contar también con más datos, tales como calor latente, temperaturas de inicio y finalización de cada cambio de fase, propiedades térmicas de la aleación y del molde, conductancia de los elementos de contacto, etc. Estos datos no siempre son fáciles de determinar y valores erróneos alejarán los resultados de la realidad y conducirán a decisiones equivocadas, independientemente de la cantidad de variables y correlaciones entre ellas que se tengan en cuenta.

Es interesante observar que los modelos mencionados no son capaces por sí mismos de dar una información directa sobre la microestructura obtenida a temperatura ambiente ni sobre posibles rechupes o porosidades. Sin embargo, un ingeniero capacitado puede inferir de manera aproximada dichos aspectos con un análisis minucioso de la velocidad de enfriamiento y de la evolución relativa de la temperatura en las distintas zona, supliendo de esta manera las carencias del modelo.

Hay modelos que incorporan la parte mecánica del problema. Un análisis termomecánico permite tener en cuenta los cambios de volumen y de algunas propiedades mecánicas del material producidos por la variación de la temperatura. Estas mismas consideraciones pueden hacerse para el molde. De esta manera se extiende la capacidad de información del modelo que puede, por ejemplo, brindar el aspecto deformado final de la pieza, sus tensiones residuales y señalar zonas de posibles fisuras. También es capaz de predecir la separación

entre las paredes de la pieza y del molde que tiene macada influencia sobre la velocidad de evacuación del calor (Ver Figura 3). La incorporación de los fenómenos mecánicos no sólo hace capaz al modelo de dar un nuevo tipo de resultados sino que, debido a la interrelación térmico-mecánica mencionada, permite tener en cuenta su influencia sobre la temperatura logrando, en principio una mejor aproximación de la misma.

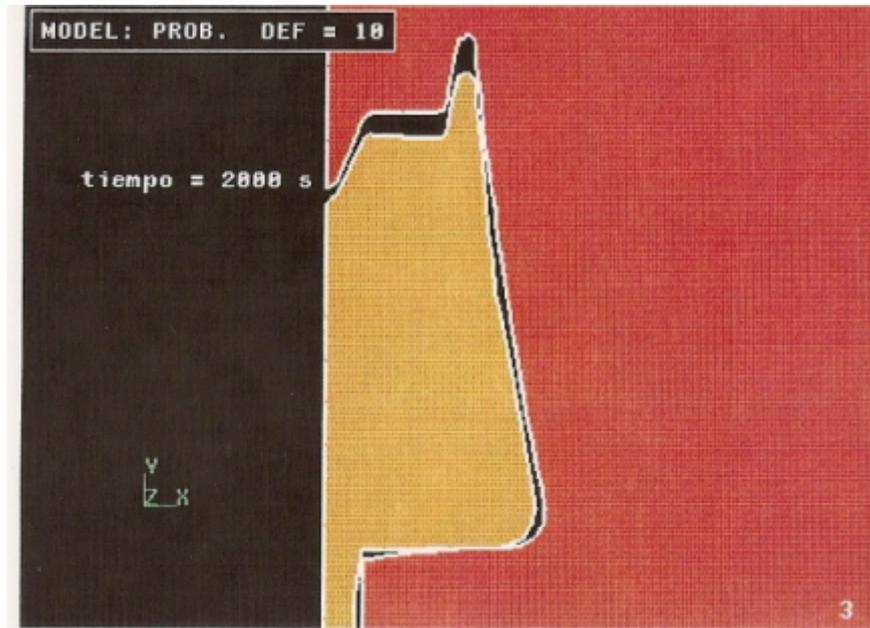


Figura 3: vista de la pieza y el molde deformados. Extraído de Celentano (1994).

Algunos modelos, aún más completos, incorporan los conocimientos de la mecánica de fluidos para considerar por ejemplo el llenado del molde y la convección del material en estado líquido, aspectos que influyen claramente sobre la variación temporal y espacial de la temperatura.

De lo hasta aquí mencionado, es posible ver cómo, aún cuando sólo se desee analizar la evolución de la temperatura, pueden proponerse modelos de variada complejidad que incluyen diferente cantidad de aspectos relacionados con el proceso; ninguno de dichos modelos, claro está, los tiene en cuenta a todos.

Hasta aquí sólo se han mencionado modelos que intentan representar el complejo proceso de enfriamiento a nivel macroscópico, tomando en consideración algunas variables de los fenómenos térmico y mecánico, pero nada dicen sobre la microestructura del material que, por lo tanto, debe inferirse a través de la experiencia y de otros conocimientos. En ellos se realizan simplificaciones tales como suponer la liberación del calor latente y las propiedades del material dependientes sólo de la temperatura. En ningún caso se tienen en cuenta los fenómenos de carácter metalúrgicos que se producen simultáneamente y que, por supuesto, son de fundamental importancia.

Los fenómenos metalúrgicos a los que se hace referencia están constituidos básicamente por los cambios de fase que experimentan los metales y aleaciones durante su enfriamiento. En general, en dichos cambios de fase pueden identificarse dos procesos: la nucleación y el crecimiento de la nueva fase. Es por ello frecuente que las consideraciones metalúrgicas se realicen a nivel microestructural y por medio de leyes de nucleación y crecimiento y que, de esa manera, se incorporen a los modelos térmicos o termomecánicos.

La consideración del aspecto metalúrgico, que en la actualidad es generalizada, complica

el planteo conceptual del modelo y, por supuesto, también su planteo matemático y resolución numérica. Sin embargo, abre un nuevo campo de predicciones y puede, incluso, mejorar las que ya se hacían con modelos más simples. Al incorporar leyes de nucleación y crecimiento de fases, las simulaciones pueden predecir algunas variables microestructurales como porcentaje de fases o tamaño de grano finales y también su evolución en el tiempo (Dardati et al, 2006). Por otro lado, el conocimiento de la microestructura del material es esencial en la predicción de sus propiedades mecánicas. Esto resulta importante no sólo para predecir las propiedades finales de la pieza sino que, además, permite que las propiedades mecánicas que se utilizan en un cálculo termomecánico, y que en dicho cálculo dependen sólo de la temperatura, sean función también de la microestructura del material. La evolución de la temperatura puede aproximarse mejor cuando los cambios de fase se incluyen en el cálculo a través de leyes de crecimiento, permitiendo, por ejemplo, que las curvas de enfriamiento puedan presentar fenómenos de recalescencia, frecuentes en los registros experimentales pero imposibles de simular con un modelo sólo hace consideraciones térmicas o térmicomecánicas del prolema.

Es importante señalar que, en general, tanto las leyes de nucleación como las de crecimiento pueden contener parámetros que deben determinarse experimentalmente para una composición y tratamiento del líquido determinados. De esta manera, la incorporación de un nuevo aspecto del problema, en este caso el metalúrgico, muestra, otra vez, tanto un aumento de información proporcionada por el modelo y una posible mejor aproximación de los resultados que ya se obtenían con modelos más sencillo, como un incremento de la cantidad de datos que se le deben suministrar al mismo.

Modelos microestructurales

En el proceso de solidificación, los dos tipos de modelos micromecánicos más empleados para la simulación de la evolución de la microestructura son:

- Los basados en la técnica de autómatas celulares (AC), que consiste en la subdivisión del dominio elegido en una cuadrícula de celdas de tamaño regular que almacenan información y sobre las cuales se aplican determinadas reglas (Dardati et al, 2005). En este tipo de análisis se suelen combinar leyes determinísticas y probabilísticas. Este método permite visualizar la microestructura y hace posible la comparación cualitativa directa con micrografías obtenidas de la pieza o probeta. (Ver [Figura 4](#)).

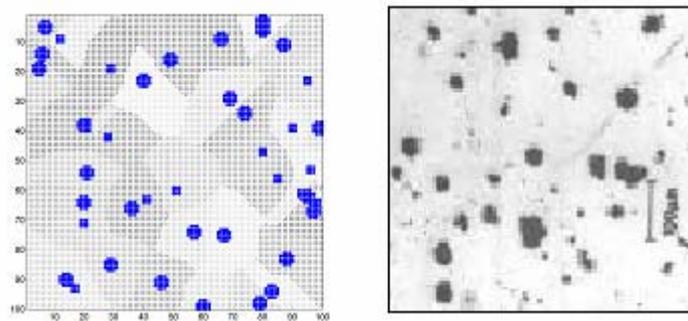


Figura 4: Comparación cualitativa de la microestructura obtenida mediante un modelo de AC y una micrografía de una fundición nodular.

- Los basados en la aplicación de leyes de carácter determinístico sobre volúmenes microscópicos representativos que, en general, están constituidos por un grano. En este caso se trabaja con promedios y porcentajes y no se puede visualizar directamente el aspecto de la microestructura.

En la [Figura 5](#) se representa, en forma esquemática, la discretización de una pieza para la aplicación del método de los elementos finitos y los volúmenes representativos a nivel microscópico para las dos formas de modelado mencionadas.

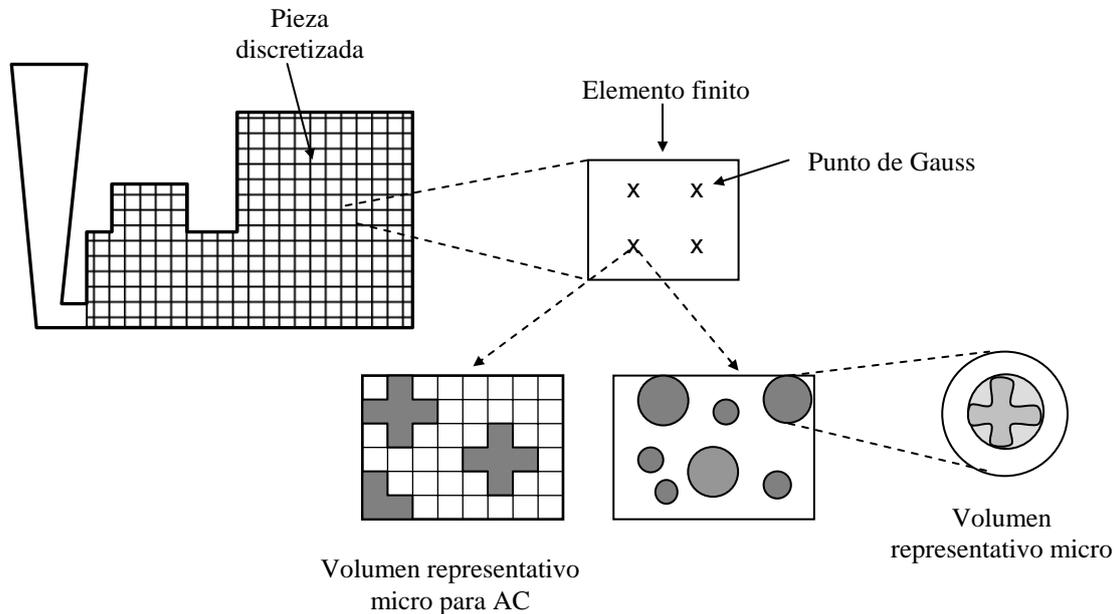


Figura 5: Discretización de la pieza y volúmenes representativos microscópicos.
Figura adaptada de [Stefanescu \(1995\)](#).

Para el desarrollo de un modelo que considere un cambio de fase a escala microestructural ya sea mediante la técnica de autómatas celulares o bien la de volumen representativo es necesario contar con una teoría o modelo descriptivo del proceso que, claro está, dependerá de cada aleación en particular. En muchas ocasiones, y por diversos motivos, eso puede no resultar sencillo. Veamos como ejemplo el caso de la fundición nodular, que es aquella en la que el grafito aparece en forma de pequeñas esferas, y cuyo proceso de solidificación es, todavía hoy, motivo de discusión.

En la primera mitad del siglo XX se descubrió que es posible la obtención de una fundición en la que el grafito se presenta en forma de esferas directamente en el proceso de solidificación de la pieza en el molde; de inmediato se iniciaron los esfuerzos para adquirir la experiencia necesaria para consolidar una técnica eficaz para su obtención y, en 1948, se patentaron dos. Paralelamente, con el objeto de asegurar una fabricación confiable y controlada del material que permitiera asegurar la obtención de la microestructura deseada, se iniciaron también las investigaciones para realizar la descripción del proceso y para dar una explicación del mismo en función de las causas. Esta tarea no resulta en absoluto sencilla debido a distintos motivos. El proceso de solidificación durante el cual se produce el grafito esférico se da a temperaturas superiores a los mil grados centígrados; además, dichas esferas sólo pueden observarse a través de microscopio, debido a que sus diámetros miden normalmente sólo decenas de micrones. A las complicaciones mencionadas se debe añadir que algunos componentes de la microestructura resultante de la solidificación no son observables a temperatura ambiente ya que cambian en una transformación de fase que ocurre durante el enfriamiento, cuando el material ya se encuentra en estado sólido. Entonces, dado que la observación directa del proceso de solidificación de la fundición dúctil es imposible, se idearon variados métodos indirectos como por ejemplo el enfriamiento brusco que permita

“congelar” el estado de la microestructura en el momento de su solidificación, la interrupción de la solidificación y eliminación del líquido remanente, la acción de la fuerza centrífuga sobre las probetas, la observación de los patrones de microsegregación y otros. Algunas de estas técnicas deben ser utilizadas con extremo cuidado ya que pueden producir interferencia en el normal desarrollo del proceso.

A pesar de las dificultades, a lo largo de los años, se propusieron numerosos modelos descriptivos del proceso de solidificación (Van de Velde) pero muchos de los esquemas propuestos fueron descartados y actualmente existen básicamente dos teorías: la teoría uninodular y la teoría plurinodular (Sikora et al, 2001). Dichas teorías o -deberíamos tal vez decir, modelos descriptivos hipotéticos- coinciden en algunos puntos; por ejemplo, ambas aseguran que las esferas de grafito nuclean directamente en el líquido, pero difieren en otros como, por ejemplo, en la naturaleza, dendrítica según una o esférica según otra, de la austenita. Estas diferencias no resultan triviales a la hora de diseñar el modelo. Aún cuando ambas teorías afirman que el crecimiento de las fases, grafito y austenita, se produce por la difusión del carbono, los escenarios geométricos en donde dicha difusión se desarrolla difieren. En la **Figura 6** se muestra de manera esquemática la diferencia mencionada para una unidad de solidificación (volumen representativo).

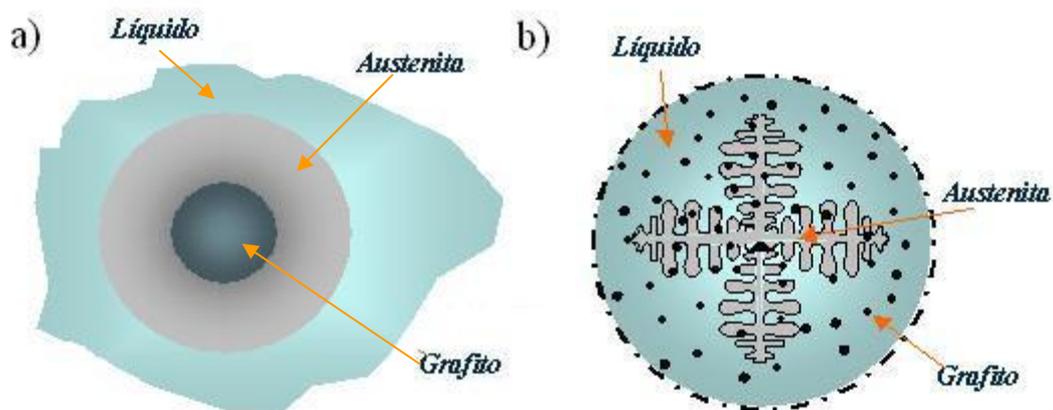


Figura 6: Esquema representativos de la unidad de solidificación en: a) la teoría uninodular, b) la teoría plurinodular.

Resulta obvio que habrá diferencias fundamentales en los resultados obtenidos con ambos modelos. Por ejemplo, más allá de que pudieran proporcionar porcentajes de fase similares, evidentemente el tamaño de grano de austenita y el patrón de microsegregación serán diferentes y esto, según lo demuestra la experiencia, influye directamente en el siguiente cambio de fase (transformación eutectoide) e indirectamente en la microestructura final.

8. CONCLUSIONES

Se ha intentado plantear algunos problemas metodológicos y epistemológicos de los modelos científicos en general y, en especial, en el campo de la ingeniería. Luego, y mediante ejemplos particulares propios de la ingeniería metalúrgica, se pusieron de manifiesto algunos aspectos importantes de dichos modelos:

- Su cualidad dialéctica, manifestada en la sucesiva aproximación a la realidad.
- La índole probable de su verdad práctico-poiética y, por lo tanto, la imposibilidad de la

certeza.

- La diferencia existente entre la validez del modelo y la verdad de la obra, siendo lo primero, aunque necesario, sólo una parte de lo segundo.
- La importancia que la experiencia y conocimientos del ingeniero que usa el modelo tienen en la predicción y por lo tanto en la obra final.
- La posibilidad de que modelos diferentes tengan el mismo el mismo objeto formal y el mismo objeto material.

En definitiva, y valga esto tanto para los modelos como para su utilización, la verdad, poseída con certeza o, cuando no resulta posible, al menos aproximadamente o con probabilidad, constituye siempre el objetivo y el horizonte de la investigación, no menos en la ingeniería que en las ciencias.

REFERENCIAS

- D.M. Albisu. Experiencia y verdad práctica, *MOENIA XXXIV*, 35-91, 2001.
- D. Celentano. Un Modelo Termomecánico para Problemas de Solidificación de Metales, *Ph. D. Thesis*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1994.
- P. M. Dardati, Simulación Micromecánica de la Solidificación de la Fundición Dúctil. *Tesis Doctoral*, Universidad Nacional de Córdoba, 2005.
- P. M. Dardati, L. A. Godoy, G. A. Cervetto y P. J. Paguaga, Simulación de la Micromecánica en la Solidificación de una Fundición de Grafito Esferoidal. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 21, 4, 327-344, 2005.
- P. Dardati, L. Godoy and D. Celentano. Microstructural simulation of solidification process of spheroidal-graphite cast iron. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, nº 6, 977-983, 2006.
- R. N. Giere. Using Models to Represent Reality. *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, E Proceedings of MBR, '98, Pavia, Italia, 41-57, 1998.
- L. A. Godoy y P. M. Dardati. Validación de Modelos en Mecánica Computacional. *Mecánica Computacional*, Vol. XX, 663-667, 2001.
- L. A. Godoy. Modelos y Enfoques para Problemas con Acoplamiento de Micro y Macro Estructuras, *Mecánica Computacional*, Vol. XXII, 1964-1984, 2003.
- S. I. Karsay. *Fundición con Grafito Esferoidal I – Producción*. Qit-Fer et Titane Inc., 1976.
- H. Petroski. Making Headlines. *American Scientist*. Vol. 88, Nº 3, 206-209, 2000.
- J. Sikora, R. Boeri y G. Rivera. Characteristics of Austenite in Ductile iron: its Influence on the Microstructure and Properties, *Proceedings of the International Conference on the Science of Casting and Solidification*, Rumania, 28-31, 2001.
- D. M. Stefanescu. Methodologies for Modeling of Solidification Microstructure and their Capabilities. *ISIJ International*, Vol. 35, Nº 6, 637-650, 1995.
- C. Van de Velde. A New Approach to the Solidification of Cast Iron. <http://members.tripod.lycos.nl/cvdiv>.