

# Análisis del comportamiento de procesos térmicos en materiales plásticos. Uso de modelos matemáticos en prácticas de laboratorio de una ingeniería

Santiago Ferrándiz, Marina Patricia Arrieta, Juan López

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

[sferrand@mcm.upv.es](mailto:sferrand@mcm.upv.es), [marienta@itm.upv.es](mailto:marienta@itm.upv.es), [jlopezm@mcm.upv.es](mailto:jlopezm@mcm.upv.es)

---

## Abstract

*Newton está considerado como uno de los mayores científicos de la historia. Asociado principalmente a la Mecánica, contribuyó también a todas las áreas de la Física, como son la viscosidad, energía, etc. y además desarrollo el cálculo integral y diferencial, junto a Leibniz, que le permitió avanzar en sus descubrimientos. Desde un punto de vista docente la ley de enfriamiento es una herramienta excelente ya que permite, de una manera sencilla, que el alumno aplique los conocimientos adquiridos en Matemáticas, en lo referente a integrales, gráficas lineales, potenciales, etc. a series de valores reales obtenidos experimentalmente por ellos mismos. De igual forma se pretende que el alumno sea capaz de linealizar las curvas obtenidas y determinar la ecuación que rige el fenómeno. La ley de enfriamiento de Newton indica que la temperatura de un cuerpo cambia a una velocidad que es proporcional a la diferencia de las temperaturas entre el medio externo y el cuerpo. La experiencia más utilizada es el seguimiento del enfriamiento de un líquido, pero nosotros dentro de las asignaturas del segundo ciclo de Ingeniería de Materiales, y su posterior reconversión en Máster Universitario, hemos adaptado la experiencia al calentamiento de un material plástico en estufa y al enfriamiento de placas por lo que además de su importancia como “Comportamiento electrónico y térmico de los materiales”, puede adaptarse a asignaturas más aplicadas relacionadas con la transformación de materiales plásticos.*

*Newton has been considered as one of the most important scientist in the history. Associated firstly with the mechanics, also he contributed with all areas of physics, such as viscosity, energy etc. Furthermore, he developed the differential and integral calculus with Leibniz, allowing him to advance in their discoveries. From a teaching point of view, the Law of cooling states is an excellent tool since it allows to the students apply their knowledge in mathematics, by a simple way. They could apply their knowledge?s in terms of integrals, graphical lines, potential, etc. to a series of real experimental values obtained by themselves. In the same way, it is intended that the student will be able to fitting the linear curves obtained and determine which is the equation governing the phenomenon. Newton’s Law of cooling shows that the rate of change of the temperature of a body is proportional to the difference in temperatures between its own temperature and the ambient temperature. The most widely used experimentation is monitoring a liquid cooling. But in the second cycle’s subject of Materials Engineering and its subsequent conversion to Master Degree, the experience have been adapted to the heating of plastic material in a furnace and the cooling of sheet, so that in addition to its importance in the “electronic and thermal behavior of materials”, can be accommodated to more applied subjects related to the processing of plastics.*

---

**Keywords:** Ley de enfriamiento de Newton, Ingeniería de Materiales.  
Newton’s Law of cooling, Materials Engineering

## 1 Introducción

Las prácticas en la Ciencia e Ingeniería de los Materiales De manera general, las clases de laboratorio son un pilar fundamental en el que se apoya la enseñanza de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, de hecho, hay algunos objetivos que son difíciles de conseguir si no es con la realización de prácticas de laboratorio, como son:

- Complementar y verificar los conocimientos teóricos a través de la comprobación de los mismos o de sus aplicaciones en la práctica
- Familiarizar al alumno con equipos, técnicas, e instrumentación que son de uso corriente en el área de los materiales.
- Motivar al alumno en el interés por los materiales, despertar su interés por los mismos y su capacidad de observación de forma que pueda ir completando su formación a través de su contacto con materiales habituales en la vida diaria.
- Facilitar el contacto personal profesor-alumno, el planteamiento de cuestiones relacionadas con la asignatura y sus aplicaciones prácticas.
- Potenciar las capacidades para trabajo en grupo del alumno.
- Empezar a enfrentarse por sí solo con determinados problemas o situaciones, lo que sin duda constituye una valiosa experiencia para su futura actividad profesional.

Por todo ello, la realización de las clases de prácticas de laboratorio debe basarse en métodos docentes independientes, no necesariamente supeditados a la teoría ([1, 2, 3]), y donde nosotros promovemos una combinación entre los métodos de trabajo en grupo y el sistema tutorial.

La preparación adecuada de las clases de laboratorio es fundamental para un aprovechamiento de las mismas. En la misma hay que tener en cuenta aspectos como:

- Número de subgrupos y de alumnos que se formarán dentro de cada sesión de prácticas.
- Adecuar las tareas al nivel de conocimientos de los alumnos
- Elaborar un guión de la práctica fácil de desarrollar.
- Planteamiento de preguntas por el profesor que obliguen a los alumnos a la reflexión y al análisis sobre las experiencias que están realizando y sobre la evaluación de los resultados.

Sin embargo el desarrollo de las prácticas se adecua a los medios disponibles, lo que en ocasiones produce que entre lo ideal y lo real se hayan grandes diferencias, pero hay un aspecto que puede fomentar la formación del alumno es la presentación de resultados, ya que permite la introducción de problemas y el trabajo sin supervisión directa del profesor. Este tratamiento de los datos por parte de los alumnos, con el fin de entregar la memoria de resultados, nos permite potenciar determinados aspectos. Así por ejemplo una presentación de memorias correcta, confeccionada con ordenador y utilizando programas de tratamiento de texto y calculo, nos permite fomentar la imagen de presentación de resultados que un futuro profesional debe mantener independientemente si se incorpora en el mundo de la empresa como si se incorpora a una labor científica.

Ya centrándonos en el campo específico de la Ingeniería de los Materiales, encontramos que la Ciencia de los Materiales engloba en su contenido ideas científicas básicas y aplicaciones técnicas, y pretende conjugar el conocimiento ordenado y racional de los materiales con las aplicaciones tecnológicas de los mismos, constituyéndose como una ciencia con proyección tecnológica. Debería en su enseñanza, coexistir dos vertientes, una de carácter científico y otra de carácter tecnológico. Sin embargo, es un área de conocimientos donde el profesorado viene de titulaciones muy dispares, ya que la propia Ingeniería de Materiales en España tiene y va a tener un recorrido muy corto. El profesorado proviene desde campos como la Física y la Química, a titulaciones relacionadas con las diversas Ingenierías Industriales (Mecánica, Química). Nuestro grupo de trabajo está formado por personal del área de Ciencia de los Materiales y del área de Procesos de Fabricación, y disponemos de esa capacidad interdisciplinar que aplicamos a la Investigación y que pretendemos transmitir a la Docencia impartida en la titulación de Ingeniería de Materiales (tabla 1). De acuerdo con estas consideraciones, nuestro grupo de trabajo busca cubrir las siguientes necesidades conceptuales:

- Conocimiento acerca de la estructura interna del material como base para el entendimiento y comprensión de sus propiedades y características.
- Conocimiento de los materiales de uso en Ingeniería, de su respuesta a los diferentes procesos y tratamientos a que puedan ser sometidos con objeto de mejorar sus propiedades y características.
- Conocimientos de los procesos de obtención y elaboración, destacando su influencia sobre dichos materiales; de su comportamiento en servicio así como de los requisitos de control de calidad y posibilidades de control; de su adecuado mantenimiento en servicio y viabilidad de reciclaje.

El primero de los apartados enunciados anteriormente, tiene un contenido eminentemente científico y constituye la base del empleo racional de los materiales. Sirve para explicar el por qué de la elección del material. Los conocimientos englobados en los otros dos apartados presentan un marcado carácter técnico, atendiendo a los materiales tecnológicos y al diseño que con ellos se realiza.

COMPORT. ELECTRÓNICO Y MAGNÉTICO DE LOS MATERIALES  
 COMPORT. MEC. DE LOS MAT.: PLASTICIDAD Y FRACTURA  
 COMPORT. MECÁNICO DE LOS MATERIALES: ELASTICIDAD  
 COMPORT. TÉRMICO Y ÓPTICO DE LOS MATERIALES  
 ESTRUCTURA DE LA MATERIA  
 TÉCNICAS DE ENSAYO Y COMPORTAMIENTO EN SERVICIO  
 TÉCNICAS DE PROCESADO DE LOS MATERIALES  
 TRANSFOR. DE ESTRUCTURA Y TÉC. DE CARACTERIZACIÓN

Tabla 1: Asignaturas troncales impartidas en la Titulación de Ingeniería de Materiales por las áreas de conocimiento de Ciencia de los Materiales y Procesos de transformación.

## 2 Prácticas sobre el comportamiento térmico de materiales plásticos

La Caracterización y Procesado de Materiales es un campo de conocimiento interdisciplinar que abarca el estudio de la estructura, propiedades, procesado y aplicaciones de todo tipo de materiales: metálicos, cerámicos, polímeros y biológicos. La caracterización y procesado de

materiales engloba no solamente a los tradicionales materiales estructurales sino también a los materiales funcionales, nanomateriales y biomateriales.

La importancia del conocimiento avanzado de materiales en la Ingeniería se refleja en la importancia que las asignaturas de este área de conocimiento tiene prácticamente en las ingenierías industriales, principalmente en la rama Mecánica y Diseño Industrial. Como tal el futuro Ingeniero habrá de tener un profundo conocimiento. Su especialización sobre los materiales se verá reflejada en sus conocimientos sobre la ciencia básica de los mismos, sobre su procesado, sus propiedades y aplicación al diseño de elementos y sistemas, e incluso sobre el propio diseño de nuevos materiales en la faceta de I+D industrial. Ya centrándonos en el comportamiento térmico [4, 5], encontramos dos tendencias que difieren del área de conocimiento que imparte la asignatura. Desde un punto de vista del área de Ciencia de los Materiales se prima la caracterización por si sola, y la metodología de obtención de las características que nos definen el comportamiento térmico.

El comportamiento térmico de los termoplásticos parcialmente cristalinos, se rige principalmente por dos temperaturas características y puntuales como son las figuras de transición, la temperatura de transición vítrea (o de congelación) y la temperatura de fusión de las cristalitas (Figura 1). Eso hace que no sea necesario un tratamiento profundo de los resultados

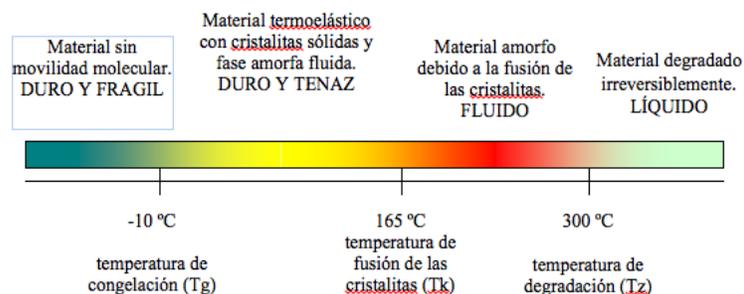


Figura 1: Evolución térmica de un termoplástico (polipropileno).

Ensayos importantes son los que determinan el reblandecimiento del material. Aunque es un proceso progresivo, desde el punto de vista práctico tan solo hemos de definir un punto en el que consideremos que el material se ha reblandecido y no es útil (Figura 2).

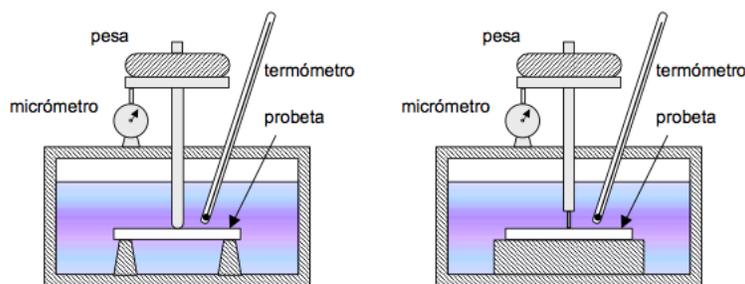


Figura 2: Disposición del ensayo Deflexión térmica y disposición del ensayo Vicat.

Otras prácticas que se realizan son las relacionadas con la dilatación. Al variar la temperatura, los materiales, alteran sus dimensiones. Este fenómeno se conoce como dilatación. Determinamos los coeficientes de dilatación representando el incremento de longitud o volumen ex-

perimentado por el material al aumentar un grado Kelvin (o centígrado) la temperatura del material. El coeficiente de dilatación del material será un factor a tener en cuenta a la hora de diseñar el molde, tanto para predecir problemas de desmoldeo, como para evitar problemas de tolerancias dimensionales de las piezas. Y también directamente relacionado con el proceso de transformación encontramos el ensayo de índice de fluidez, que mide la viscosidad del material a una determinada temperatura puntual.

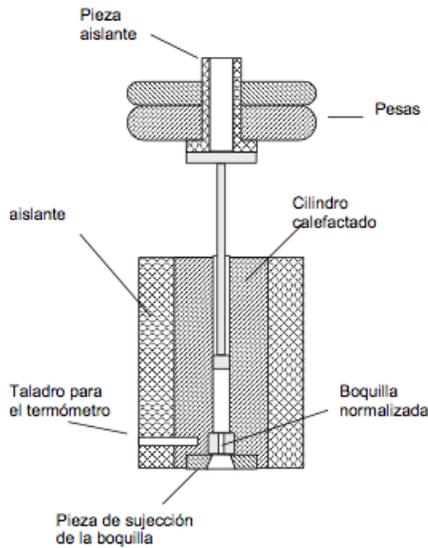


Figura 3: Equipo de ensayo del MFI normalizada.

Por tanto encontramos que en el caso de las prácticas dentro del área de la Ciencia de Materiales el tratamiento matemático de los resultados no va más allá de la determinación de valores puntuales o la confección de graficas visuales (Figura 4).

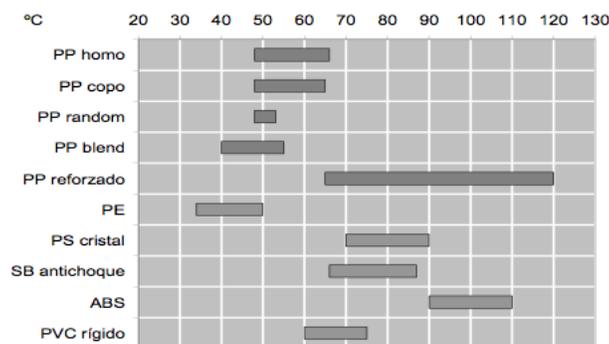


Figura 4: Resultados de las prácticas de determinación de las temperaturas de reblandecimiento .

En el otro extremo encontramos en las prácticas que se realizan en el área de procesos. Estas prácticas se basan en la utilización de Software que mediante el uso de modelos matemáticos permiten al alumno predecir el comportamiento térmico de los materiales y el comportamiento de los materiales poliméricos durante distintos procesos de transformación. Para el proceso de inyección [7, 8, 9] se utiliza el software Moldflow que nos permite calcular el comportamiento de la temperatura a lo largo de la pieza cuando ya esta llena, Figura 5 o bien el comportamiento de la pieza a medida que se va llenando, Figura 2.

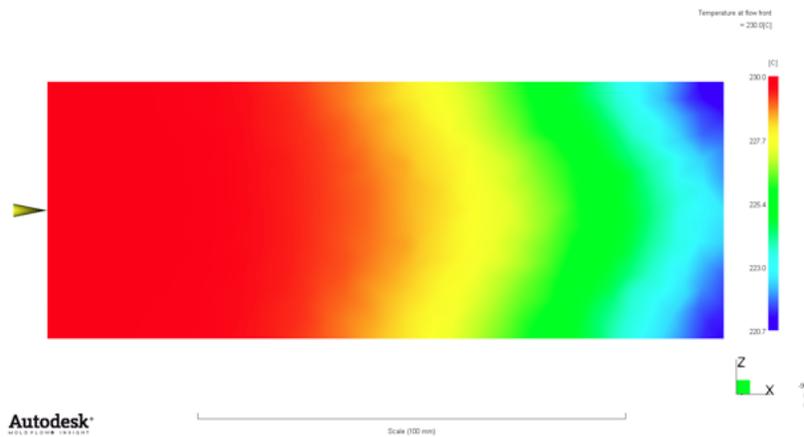


Figura 5: Evolución de la temperatura cuando la pieza está llena.

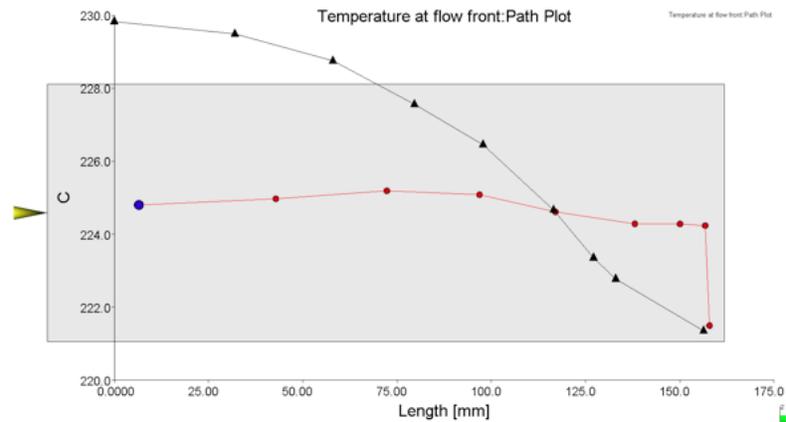


Figura 6: Evolución de la temperatura durante el llenado.

La expresión que suele utilizar el programa para el cálculo del enfriamiento es:

$$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 a_{eff}} \ln \left( \frac{4 \Theta_M - \Theta_w}{\pi \Theta_E - \Theta_w} \right). \quad (1)$$

Donde  $t_k$  es el tiempo empleado en enfriarse,  $a_{eff}$  es la difusividad térmica,  $s$  el espesor y los valores de tecla, son las razones entre las diferencias de temperatura entre la temperatura de procesamiento, temperatura de molde y la temperatura de expulsión. Hay que tener en cuenta que la temperatura de expulsión puede elegirse, según se trata del núcleo del material o la media de temperatura de la pared.

Para otros procesos de transformación, como el rotomoldeo utilizamos el software Ansys [6], para realizar el cálculo de evolución de la temperatura de la pared del polímero en contacto con el molde, que esta a temperatura mas baja. La Figura 7 muestra el calculo efectuado de evolución de la temperatura a en la pared del molde producido por material plástico de la cavidad. Podemos evaluar también como va poder enfriarse la misma pared a lo largo del tiempo.

La formulación empleada por el software para la obtención de resultados se basa en expresiones de cálculo de conducción. La *transmisión de calor* por conducción  $Q_c$ , por unidad de tiempo y superficie, está relacionada con la *distribución de temperaturas* mediante la ley de Fourier:

$$Q_c = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (2)$$

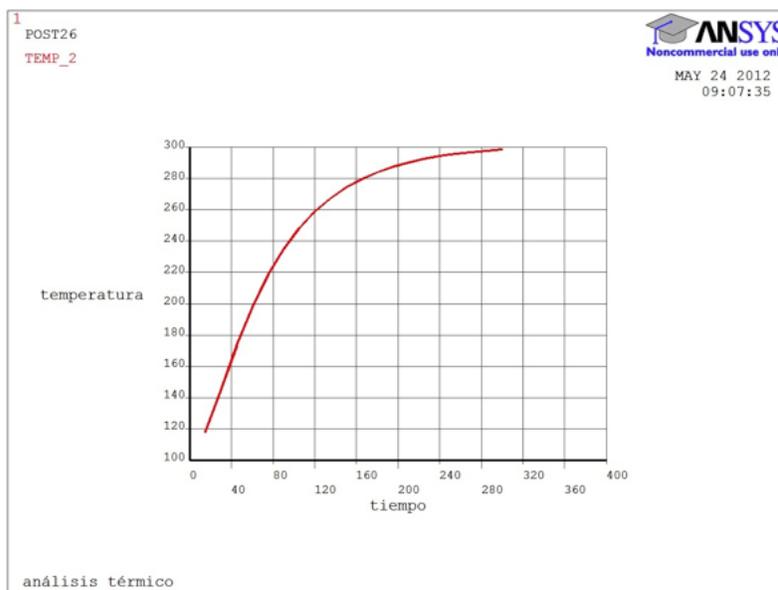


Figura 7: Evolución de la temperatura calculada con Ansys.

Podríamos seguir con más ejemplos, pero básicamente la conclusión es que en esta serie de prácticas el alumno se familiariza con modelos matemáticos complejos, pero por el contrario los resultados obtenidos son teóricos y se pierde el concepto de utilidad. Como resultado el alumno perdía la perspectiva matemática del comportamiento de la materia, y sobre todo en aquellos que más tarde iniciaban trabajos experimentales encontrábamos dos tendencias, el desconocimiento total más allá de las hojas de calculo más básicas, hasta alumnos con un gran dominio de programación, pero que en ocasiones perdían el significado físico de los análisis dando resultados erróneos.

### 3 Otros diseños experimentales

La experiencia más común relacionada con el comportamiento térmico de la materia es el enfriamiento de un recipiente con agua hirviendo, experiencia con unas necesidades materiales mínimas (un termómetro, un reloj) pero de gran efectividad. Otras propuestas son el seguimiento por ejemplo del calentamiento de una placa metálica al sol.

Para el caso de materiales plásticos hemos desarrollado un sistema económico y sencillo. El proceso de medición de temperaturas necesita para su aplicación de un tubo de cobre, dos tapones, uno de ellos con un orificio para poder introducir el termopar en el interior de la muestra, un horno, dos termopares, uno que se colocará en el interior de la muestra y el otro

que medirá la temperatura que se alcanza en el interior del horno, un receptor y un software de registro de las temperaturas y tiempo.

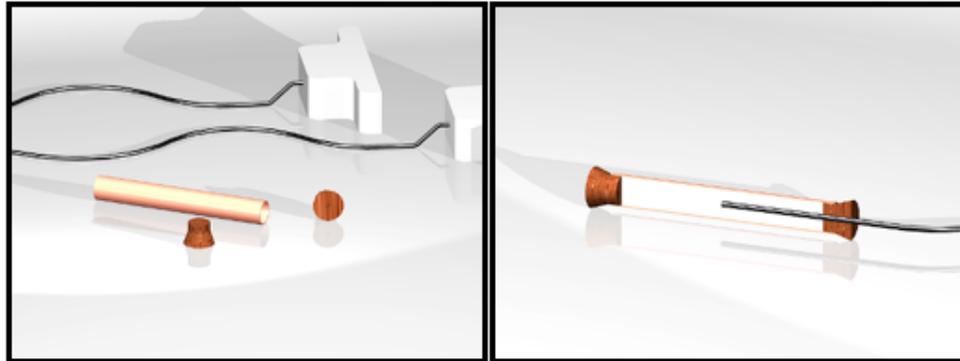


Figura 8: Elementos del ensayo.

Una vez el horno se encuentra a la temperatura deseada se introduce por una abertura que se encuentra en el lateral del mismo, el tubo de cobre con la muestra y el termopar, y un termopar exterior que medirá la temperatura del interior del horno situándolos sobre la bandeja del horno, y el software va registrando la temperatura que obtiene el termopar que se encuentra en interior del horno, que es constante, y la del segundo termopar que marca la temperatura del interior de la muestra, la cual va aumentando progresivamente observándose de esta manera la velocidad de la muestra en aproximarse a la temperatura del interior del horno.

A continuación se muestran los diferentes ensayos realizados a una serie de muestras diferentes, en las cuales se ha cambiado de plastificante y en cada una de las cuales se ha ido variando la temperatura. Las gráficas que se obtienen son gráficas asintóticas que permiten la aplicación de la ley de Newton.

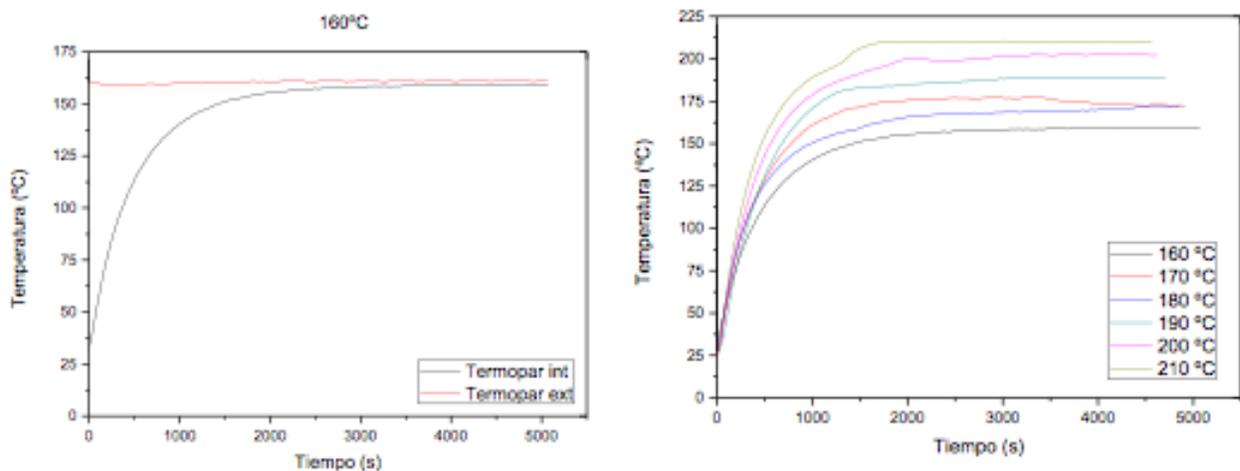


Figura 9: Temperatura máxima del horno 160°C. Comparativa temperaturas.

Los datos se capturan en EXCEL, donde tras una primera comprobación el alumno los exporta a un programa matemático que le permite trabajar con ajustes lineales

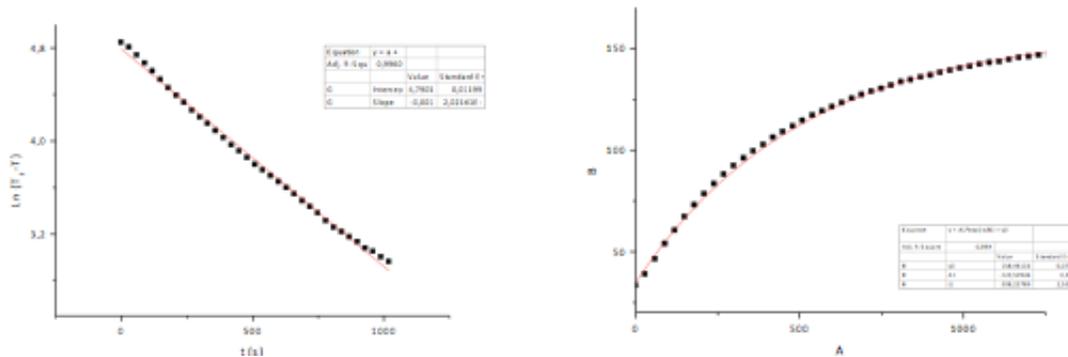


Figura 10: Ajuste lineal y exponencial de los datos experimentales.

Programas como el ORIGIN no solo te permiten utilizar un gran número de las potentes herramientas que incorporan sino además crear las tuyas propias.

### 4 Futuras experiencias

En la actualidad estamos trabajando en el desarrollo experimental que permitan trabajar con esta ecuación de enfriamiento/calentamiento, y que además acerque al alumno a tecnológicas atractivas. En el caso particular del enfriamiento estamos utilizando como sistema de determinación de la temperatura mediante cámaras infrarrojas. La utilización de cámaras infrarrojo tiene muchas aplicaciones en Ingeniería y Arquitectura, como puede ser la comprobación de instalaciones eléctricas o la evaluación del aislamiento térmico en edificios. Los nuevos desarrollos en estos equipos han conseguido trabajar su coste y permite su utilización en las prácticas de laboratorio. Un ejemplo es el seguimiento del ensayo Jominy. Este ensayo básico en las asignaturas de ciencia de materiales que nos permite conocer la templabilidad de un acero. Gracias a éstas técnicas el alumno puede seguir la evolución de la temperatura en el material como se puede observar en la Figura 11.

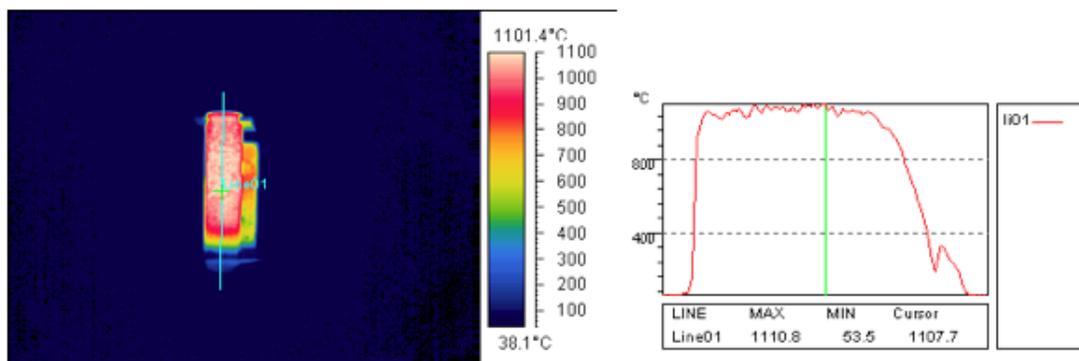


Figura 11: Aplicación de la técnica de cámara infrarrojos. Imagen térmica de la probeta de acero y gráfica del enfriamiento de la probeta con el tiempo.



# Referencias

- [1] D. G. Zill. Ecuaciones Diferenciales. *International Thomson Editores*. México, (1997).
- [2] R. Resnick, D. Halliday, K. Krane Física Parte I, Problema 2,3 Pág. 486. CECSA, México.
- [3] W. F. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young. Física, *Aguilar, Madrid*, Pág. 1134 (1981).
- [4] Ley de Enfriamiento de Newton, Profesor : Dr. Luis Vergara B., Integrantes: Loreto Lagos A.Edinson Contreras R.Alberto Lagos T.Ricardo Rochow S, [es.scribd.com/doc/.../Trabajo-Ley-de-Enfriamiento-de-Newton](https://es.scribd.com/doc/.../Trabajo-Ley-de-Enfriamiento-de-Newton).
- [5] E. Fuster-García, L.M. García Raffi, V. Romero-García. Obtenció Dels Modes De Resonancia A Una Geometria Complexa: Proposta Didàctica De Modelització Amb Elements Finitis, *Modelling in Science Education and Learning* **2**(6), (2009).
- [6] Thermal analysis guide. Ansys Inc. Manual, (2009).
- [7] J. Shoemaker. Moldflow Design Guide, Hanser, (2006).
- [8] AMI Automating Autodesk Moldflow Insight Tutorial, Autodesk<sup>©</sup> Moldflow<sup>©</sup> Insight (2012).
- [9] AMI Cool Analysis Results, Autodesk<sup>©</sup> Moldflow<sup>©</sup> Insight (2012).

