

Cálculo de la Transferencia de Calor en Estado Transitorio para una Probeta Estandarizada para el Ensayo Jominy

Calculation of Transient Heat Transfer for a Standardized Specimen for the Jominy Test

Cálculo da Transferência Transitória de Calor para um Espécime em Estábulo para o Teste de Jominy

108

Yimerson Gómez Guerrero^a
Edwin Gómez Naizaque^b
Daniel Maldonado Monroy^c
Yina Quintero Gamboa^d

^a Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Santo Tomás, seccional Tunja
Colombia. Email: yimerson.gomez@usantoto.edu.co

^b Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Santo Tomás, seccional Tunja,
Colombia. Email: edwin.gomezn@usantoto.edu.co

^c Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Santo Tomás, seccional Tunja,
Colombia. Email: daniel.maldonado@usantoto.edu.co

^d IMECI-USTA, Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Santo Tomás, seccional Tunja
Colombia. Email: yina.quintero@usantoto.edu.co

Resumen— En los tratamientos térmicos, usualmente, para determinar la efectividad del procedimiento se tienen en cuenta variables como la variación de temperatura, tiempo y método de enfriamiento; variables que permiten predecir un resultado aproximado. Este método se emplea para mejorar las propiedades de un material según las características deseadas y su aplicación. Por esto, se han estudiado teorías y estrategias para conocer la transferencia de calor; como las diferencias finitas, el cual soluciona ecuaciones de calor determinando la temperatura del elemento en diferentes puntos, dependientes de su ubicación e interacción con el ambiente en exposición. De esta manera, el trabajo de investigación explica el cálculo de la transferencia de calor en estado transitorio, con variables determinadas, para el proceso de enfriamiento de la probeta del ensayo Jominy, donde el acero es sometido a un tratamiento de temple con agua. Se plantearon las ecuaciones en el programa Excel, teniendo en cuenta las propiedades del metal, y el medio, centrándose en el coeficiente de convección, y conductividad térmica; por consiguiente, se determinó el cambio de temperatura en el tiempo, según lo especificado en la norma ASTM A255-20. Estos resultados se compararon con los del programa de ANSYS STUDENT R2, y la solución de las ecuaciones planteadas en el programa Python, combinando la lógica matemática con los códigos del programador.

Palabras clave Análisis numérico, enfriamiento, ensayo Jominy, mecánica computacional, Python, CAE.

Abstract— In heat treatments, usually, to determine the effectiveness of the procedure, variables such as temperature variation, time and cooling method are taken into account; variables that allow predicting an approximate result. This method is used to improve the properties of a material according to the desired characteristics and its application. For this reason, theories and strategies have been studied to know the heat transfer; such as finite differences, which solves heat equations by determining the temperature of the element at different points, depending on its location and interaction with the environment in exposure. In this way, the research work explains the calculation of the heat transfer in transient state, with determined variables, for the cooling process of the Jominy test specimen, where the steel is subjected to a quenching treatment with water. The equations were formulated in the Excel program, taking into account the properties of the metal and the medium, focusing on the convection coefficient and thermal conductivity; consequently, the temperature change over time was determined, as specified in the ASTM A255-20 standard. These results were compared with those of the ANSYS STUDENT R2 program, and the solution of the equations presented in the Python program, combining the mathematical logic with the programmer's codes.

Keywords— Numerical analysis, cooling, Jominy test, computational mechanics, Python, CAE.

Resumo — Nos tratamentos térmicos, variáveis como variação de temperatura, tempo e método de resfriamento geralmente são levadas em consideração para determinar a eficácia do procedimento; variáveis que permitem prever um resultado aproximado. Este método é utilizado para melhorar as propriedades de um material de acordo com as características desejadas e sua aplicação. Por esta razão, teorias e estratégias têm sido estudadas para conhecer a transferência de calor; como diferenças finitas, que resolve equações de calor determinando a temperatura do elemento em diferentes pontos, dependendo de sua localização e interação com o ambiente exposto. Desta forma, o trabalho de pesquisa explica o cálculo da transferência de calor em estado transitório, com determinadas variáveis, para o corpo de prova de Jominy, onde o aço é submetido a um tratamento de têmpera com água, apenas no processo de resfriamento. . As equações foram levantadas no programa Excel, levando em consideração as propriedades do metal e do meio, enfocando o coeficiente de convecção e a condutividade térmica; portanto, a mudança de temperatura ao longo do tempo foi determinada, conforme especificado em ASTM A255-20. Esses resultados foram comparados com os do programa ANSYS STUDENT R2 e com a solução das equações propostas no programa Python, combinando a lógica matemática com os códigos do programador

Palavras chave— Análise numérica, resfriamento, teste de Jominy, mecânica computacional, Python, CAE.

I. INTRODUCCION

El ensayo Jominy es un procedimiento estándar mediante el cual es posible determinar la templabilidad en aceros; las especificaciones y delimitaciones se enuncian en la norma ASTM A255-20 "Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel" [1]. Por tratarse de un procedimiento establecido bajo norma, se cuenta con un diseño de probeta estandarizado, como se observa en la Fig. 1., del acero que se analiza.

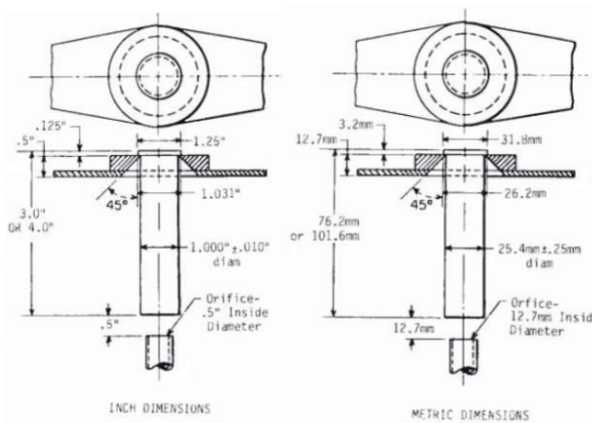


Fig. 1. Dimensiones de la probeta para el ensayo Jominy. Fuente: [1]

El test de Jominy se basa en templar la probeta fabricada bajo las dimensiones especificadas anteriormente. En este proceso, generalmente, se calienta la probeta en la mufla hasta llegar a la temperatura de austenización de manera uniforme, luego, se somete a un enfriamiento controlado con un chorro de agua, la cual corresponde a la temperatura de esta en la ciudad de Tunja, con variables específicas, como la velocidad de flujo y temperatura. El contacto del agua con la probeta se hace únicamente por la parte inferior (Fig. 2.). Esto produce un enfriamiento uniforme a lo largo de la misma, sumado a la interacción

con el aire del medio. Al terminar el procedimiento, se determina la dureza de la probeta bajo diferentes escalas, como los son las de Brinell, Rockwell B o C, Vickers, para determinar la efectividad del temple en el acero. Igualmente, las medidas de dureza obtenidas se encuentran en un rango establecido en la norma.

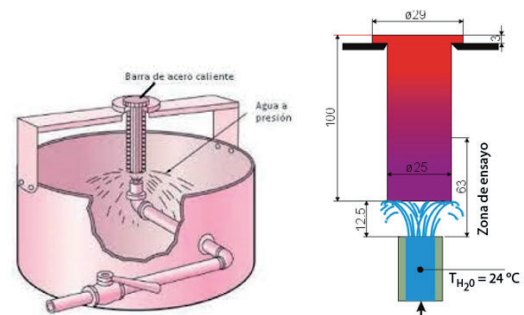


Fig. 2. Montaje y ejecución del ensayo Jominy. Fuente: [2]

Para modelar la transferencia de calor del tratamiento térmico, específicamente del proceso de enfriamiento rápido de la probeta, existen metodologías que solucionan las ecuaciones diferenciales parciales que definen el fenómeno físico de extracción de calor. En este caso particular, se plantean las ecuaciones de transferencia de calor bidimensional, y utilizando el método numérico de diferencias finitas es posible obtener las expresiones para los diferentes nodos de la probeta, según su ubicación: esquina externa con convección, superficie plana con convección y nodos internos. Se caracterizan las propiedades del material y del medio, como conductividad térmica y coeficiente de convección. Además, al ser un estudio de estado transitorio, se establece el diferencial del tiempo para el análisis (tiempo de duración del enfriamiento según la norma ASTM A255-20).

En el campo de investigación del test de Jominy, existen estudios que resultan pertinentes al momento de estimar y desestimar variables o comportamientos que llevan a respaldar esta investigación. Por ejemplo, el artículo de investigación "Representación en diferencias finitas de la transferencia de calor en la templabilidad del acero SAE 1045". En éste, se aborda el análisis térmico de la probeta del ensayo Jominy, con ayuda de la solución de ecuaciones diferenciales de transferencia de calor, por el método de diferencias finitas, teniendo en cuenta las propiedades termofísicas del material [3]. Se identificó la similitud entre los resultados obtenidos del software de simulación con los datos experimentales del ensayo, mediante las curvas de enfriamiento. Se aproximó la formación microestructural de martensita, vainita, ferrita y perlita, como producto del ensayo.

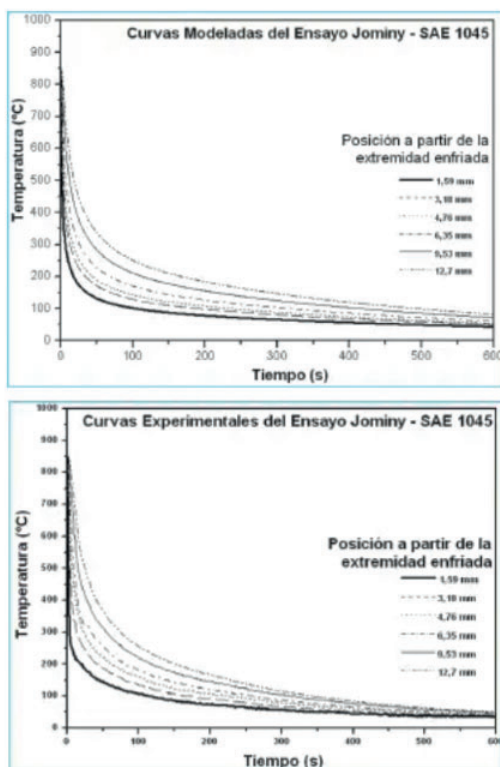


Fig. 3. Curvas de enfriamiento del ensayo Jominy. a) Datos obtenidos de la simulación. b) Datos experimentales. Fuente: [3]

Continuando con la línea de investigación, se destaca en la tesis académica "Simulación numérica del tratamiento térmico de carburizado y temple de aceros de baja aleación", en el cual se denota el cambio en la estructura del acero durante el tratamiento térmico de temple. Así mismo, plantea las ecuaciones para estudiar el comportamiento de la probeta y la formación de carbono que incrementa la dureza del acero [4].

Por su parte Lopez, et al. [5] y Pietrzyk M. & Kuziak R [6], implementaron soluciones numéricas con el método de diferencias finitas en 2D para resolver el problema acoplado de transferencia de calor y transformación de fase. Para ello, utilizaron los diagramas TTT para la predicción del temple de componentes metálicos y su correspondiente cambio de fase [5], [6].

Uno de los problemas que resaltan, y que es compartido por los autores de este artículo es que se desconocen la mayoría, si no todas, de las condiciones de las fronteras, por lo que necesitan ser estimadas o calculadas; en el caso de Lopez, et al [5]. utilizaron la solución del problema inverso de conducción de calor con el método de Beck para determinar el coeficiente de convección (h) del agua, y correlaciones basadas en nueros adimensionales para estimar el coeficiente de convección (h) del aire. Por su parte Pietrzyk M. & Kuziak R [6] utilizaron un coeficiente de convección (h) que variava con el radio de la probeta y la teperatura de la superficie.

Por último, es de destacar aspectos abordados en el artículo de investigación "Simulación térmica en CosmosWorks de un acero sometido a un ensayo de templabilidad Jominy". En este trabajo se realiza la simulación de enfriamiento del ensayo, teniendo en cuenta la pérdida de calor por convección forzada por agua en la base de la probeta, y en los laterales y cabeza por convección natural con el aire. Se estima la caracterización del refinamiento de malla para que los resultados de la curva de enfriamiento sean acertados, enfocándose en las zonas críticas del estudio [7].



Fig. 4. Refinamiento de malla de la probeta y puntos críticos de referencia.

Fuente: [4]

Con el fin de dar una aproximación al resultado del tratamiento térmico, se formulan las ecuaciones en programas que permitan conocer el comportamiento de cada nodo. De esta manera, se podría estimar el resultado del temple en el acero, y determinar si el procedimiento cumple con los parámetros requeridos para su

función y aplicación. Para el caso de estudio, se plantean las fórmulas en la hoja de cálculo Excel, en el programador Python y en el software de simulación ANSYS Student R2, y ahí entrar en una comparación de los datos obtenidos en los diferentes programas de cómputo. A lo largo del trabajo de investigación se presenta a detalle la caracterización de los diferentes elementos que intervienen en el análisis de enfriamiento, en la templabilidad del acero, del ensayo Jominy.

Además, se presenta el desarrollo para efectuar cada análisis por las tres estrategias simuladas, con sus variables y consideraciones óptimas para que los resultados obtenidos sean verídicos y aproximados a los resultados que se podrían obtener de forma experimental en el ensayo.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

El método de diferencias finitas para la aproximación numérica de la distribución de calor, la cual se presenta en un cuerpo, determina la temperatura en diferentes puntos de la probeta. En una variación de tiempo que se establece según la norma ASTM A 255, estimado en 10 minutos. Uno de los factores que influye en la aplicación de las diferencias finitas es la convergencia, con este define el grado de error entre la solución principal, comparado con la solución exacta de la ecuación diferencial.

Para obtener este valor es necesario conocer las variables influyentes en la obtención del dato, las cuales están reflejadas en la tabla 1.

Tabla 1. Datos iniciales del análisis.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Temperatura de la probeta	$T_{probeta} = 925$	°C
Temperatura del aire	$T_{aire} = 17$	°C
Temperatura del agua	$T_{agua} = 12$	°C
Constante de conductividad del acero	$K = 60,5$	W/m*K
Difusividad térmica del acero	$\alpha = 0,0000177$	m ² /s
Constante de transferencia de calor por convección del aire	$h_{aire} = 13,61$	W/m ² *K
Constante de transferencia de calor por convección del agua	$h_{agua} = 7947,68$	W/m ² *K
Tiempo	$t = 10$	min
Diferencial de distancia	$\Delta x = 0,0015875$	m

Fuente: autores

Algunos valores de los que están en la tabla 1, como lo es la temperatura del agua y aire se asumieron con un promedio de las temperaturas presentes en la ciudad de Tunja, Boyacá. Otros datos a su vez, como K y α fueron obtenidos de las propiedades de un acero al bajo carbono [8]. Las constantes de transferencia de calor por convección del agua y aire fueron determinados, con base en números adimensionales como el número de Prandtl, Nusselt, entre otros.

Para el cálculo de la divergencia (β) como se observa en la ecuación 1, se tiene la difusividad térmica del material, un diferencial de distancia que en este caso es de 1/16 de pulgada, debido a la norma ASTM A 255. Resalta que a estas distancias se debe tomar lectura de temperatura en la probeta. Un aspecto importante en la obtención de la convergencia es la diferencia de tiempo (Δt), ya que este define la periodicidad para evaluar el sistema.

$$\beta = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (1)$$

Los datos iniciales presentados en la tabla 1, también se utilizaron tanto en el análisis en lenguaje de Python como en la simulación en el software Ansys Student R2. En cada uno se desarrollaron metodologías diferentes que contribuyeron a la obtención de los perfiles de temperatura de la probeta.

A continuación, se mencionan variables importantes para una correcta interpretación del desarrollo metodológico en el análisis en lenguaje Python:

Tdt: Copia de la matriz C.

Tfin: Tiempo en que se realiza el análisis térmico.

A. Análisis en Microsoft Excel

Para comenzar con la aplicación del método de las diferencias finitas en Microsoft Excel, se deben conocer todos los datos correspondientes a la tabla 1, con los que se obtiene el valor de Δt (Diferencial de tiempo), que corresponde a la periodicidad con la que se evalúan los factores influyentes en la probeta. Estos puntos de incidencia se tienen en cuenta al instante de dar inicio al análisis, ya que se debe identificar las variables presentes en el objeto al que se realiza el estudio.

Las ecuaciones de los posibles casos son mostradas en la Fig. 5 hasta la Fig. 8. Note que la designación de subíndices 'm' y 'n' que denotan posición con referencia a 'x' y 'y' respectivamente; mientras el superíndice k denota la variación en el tiempo.

En esta investigación se utilizan tres casos, que corresponden a nodo interno, esquina externa con convección y superficie plana con convección. En base a estos se define el comportamiento en cada punto que representan, pero también con base en la ecuación 9 se debe tener en cuenta que el Δt (Diferencial de tiempo), sea menor a 1/4, ya que esto define la periodicidad con la que se realiza la medición de temperatura; a su vez este valor otorga la posibilidad de determinar el número total de iteraciones a generar para cumplir con el requerimiento mínimo de 10 minutos mencionado en la norma ASTM a 255.

• **Nodo interno**

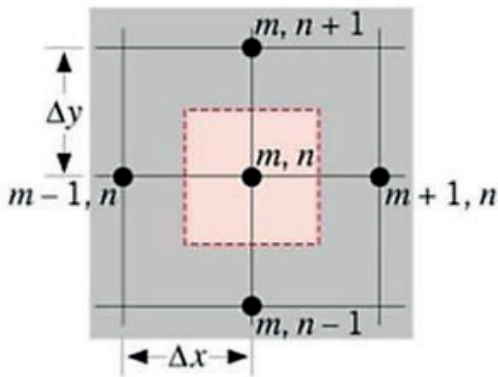


Fig. 5. Distribución de posición nodo interno. Fuente: [9]

$$T_{m,n}^{k+1} = \frac{2}{3}\beta \left(T_{m+1,n}^k + 2T_{m-1,n}^k + 2T_{m,n+1}^k + T_{m,n-1}^k + 2\frac{h\Delta x}{k} T_{\infty} \right) + \left(1 - 4\beta - \frac{4}{3}\frac{h\Delta x}{k}\beta \right) T_{m,n}^k \quad (2)$$

$$\beta \leq 1/4 \quad (3)$$

• **Nodo en esquina interna con convección.**

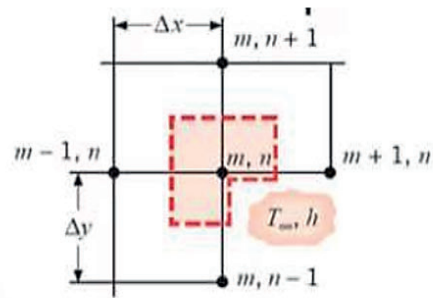


Fig. 6. Distribución de posiciones esquina interna. Fuente: [9]

$$T_{m,n}^{k+1} = \beta \left(T_{m+1,n}^k + T_{m-1,n}^k + T_{m,n+1}^k + T_{m,n-1}^k \right) + (1 - 4\beta) T_{m,n}^k \quad (4)$$

$$\beta \left(3 + \frac{h\Delta x}{k} \right) \leq 3/4 \quad (5)$$

• **Nodo en superficie plana con convección**

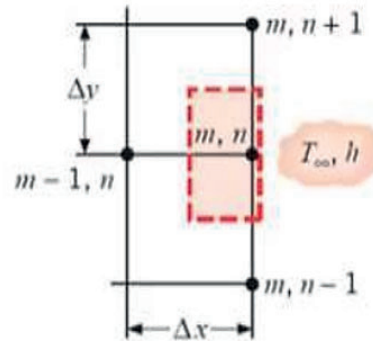


Fig. 7. Distribución de posición nodo interno. Fuente: [9]

$$T_{m,n}^{k+1} = \beta \left(2T_{m-1,n}^k + T_{m,n+1}^k + T_{m,n-1}^k + 2\frac{h\Delta x}{k} T_{\infty} \right) + \left(1 - 4\beta - 2\frac{h\Delta x}{k}\beta \right) T_{m,n}^k \quad (6)$$

$$\beta \left(2 + \frac{h\Delta x}{k} \right) \leq 1/2 \quad (7)$$

- **Nodo en esquina interna con convección**

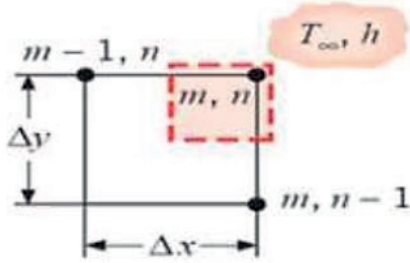


Figura 8. Distribución de posiciones esquina externa.
Fuente: [9]

$$T_{m,n}^{k+1} = \beta \left(T_{m-1,n}^k + T_{m,n-1}^k + 2 \frac{h\Delta x}{k} T_{\infty} \right) + \left(1 - 4\beta - 4 \frac{h\Delta x}{k} \beta \right) T_{m,n}^k \quad (8)$$

$$\beta \left(1 + \frac{h\Delta x}{k} \leq 1/4 \right) \quad (9)$$

A modo de ejemplo de la aplicación del método usando Excel, se muestra la implementación del caso de nodo interno en la Fig. 9, donde puede apreciarse la practicidad de la implementación, al relacionar visualmente posiciones y tiempos requeridos en la formula.

B. Análisis en lenguaje Python

Teniendo el análisis en Excel se procede a realizar la programación en lenguaje Python, y así tener otro punto de vista en la comparación de las diferentes formas de aplicar las diferencias finitas.

Con el lenguaje Python se quiere un proceso similar al aplicado anteriormente, pero gracias a este nuevo programa se genera de forma más automática y con la facilidad de comparar si existe algún error entre ellos. Para realizar la

programación se utiliza el software de acceso libre Spyder que utiliza el lenguaje de programación Python, en la Fig 9 se muestra un diagrama de flujo donde se denota de manera simplificada una ruta de pasos en la programación realizada; a continuación, se demuestra su explicación:

Datos		β				
Formula		$T_{m,n}^{k+1} = \beta(T_{m+1,n}^k + T_{m-1,n}^k + T_{m,n+1}^k + T_{m,n-1}^k) + (1-4\beta)T_{m,n}^k$				
		m-2	m-1	m	m+1	m+2
n+2						
n+1						
n						
n-1						
n-2						
		k				
		m-2	m-1	m	m+1	m+2
n+2						
n+1						
n				$=\beta*(T_{m-1,n}+T_{m-1,n}+T_{m,n-1}+T_{m,n-1})+(1-(4*\beta))*T_{m,n}$		
n-1						
n-2						
		k+1				

Figura 9. Ejemplo de aplicación del método usando Excel, para nodo interno.
Fuente: Autores

1) Parámetros de entrada.

En esta etapa se nombran los valores de: Temperatura de probeta, Temperatura del ambiente, Temperatura del agua, Coeficientes de convección del aire y del agua, Coeficiente de convección de la probeta (acero), difusividad térmica del acero [8], dimensiones de la probeta que al igual que en el procedimiento de Excel se utilizan las dimensiones dadas por el ensayo y así determinar la dureza del acero [1]. Además, se realiza el cálculo de Beta (β) como fue explicado en la sección del cálculo en Excel. Además del cálculo del

valor del tamaño de los nodos para que exista convergencia en el sistema y los resultados sean los más exactos.

Además, para la creación del análisis es necesario agregar la librería Numpy ya que con esta es posible la creación de las matrices y realizar las operaciones necesario para su creación [10].

2) Creación matriz "C"

En esta etapa se crea una matriz de nombre "C" que será donde se almacenaran los valores de la temperatura. Esta matriz tendrá un tamaño dado por los parámetros de entrada.

3) Creación matriz y modificación "Tdt"

Esta matriz que se crea será donde se realizaran los diferentes cálculos para todos los casos que se presenten en la probeta, como son el nodo interno, nodo en superficie plana con convección y nodo en esquina externa con convección.

4) Aplicación condicional a matriz "Tdt"

Para poder realizar el análisis térmico en régimen transitorio se realiza un condicional para la matriz Tdt en donde si el tiempo "t" no es igual al tiempo final "Tfin" dado en los parámetros de entrada, sea necesario volver a crear una copia de la matriz "Tdt" con el nombre de "C" y además se deba aumentar el tiempo. Pero si esta cumple la condición de que el tiempo "t" es igual al tiempo final "Tfin" se imprima la matriz y finalice el programa.

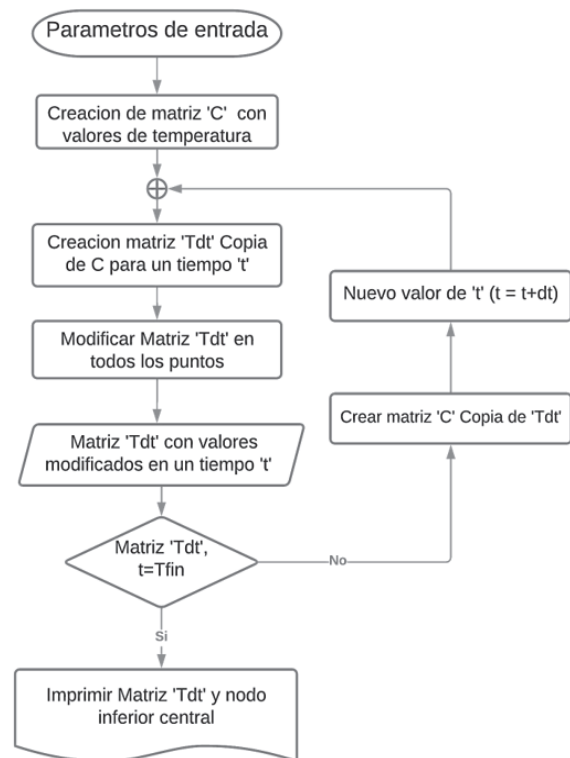


Figura 10. Diagrama de flujo programa Python. Fuente: Autores

Con los valores obtenidos en el programa, al igual que se realizó con el procedimiento de Excel se seleccionaron 6 valores cada uno a 1.5875 mm de separación iniciando desde la base inferior en contacto con el agua en donde se genera la gráfica de la Fig. 11.

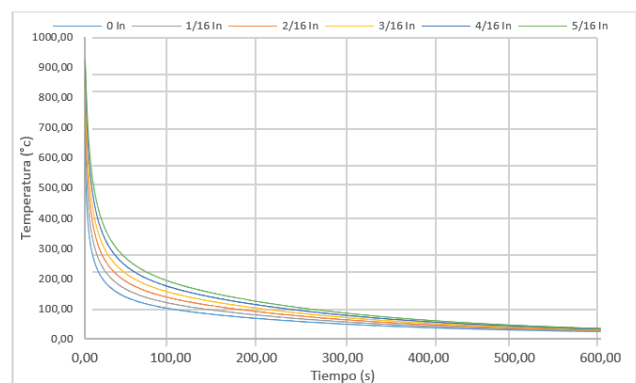


Figura 11. Curva temperatura vs tiempo de diferentes nodos (Python). Fuente: Autores

C. Simulación en Software CAE

Para finalizar se realizó una simulación térmica en estado transitorio, y comparar con los cálculos de diferencias finitas realizados en Excel y en el lenguaje de programación Python y ver el error que se presenta respecto a la simulación. Esta simulación se realizará en el software de diseño CAD y CAE ANSYS 2020 R2, donde se utiliza el módulo de térmico transitorio. Para esta simulación se tuvieron consideraciones como:

1) Material. Se creo un material nuevo ya que se quería seguir teniendo los mismos valores para las propiedades del material y el material que tenía la biblioteca de ANSYS no coincidían algunas propiedades.

2) Condiciones de frontera. Al igual que en los casos anteriores se utilizaron las mismas temperaturas, coeficientes y tiempo para realizar el análisis térmico transitorio

3) Modelo 3D. A diferencia de los otros análisis realizados este será en hecho con un modelo 3D con las medidas dadas por la norma ASTM A255 y eliminando la pestaña de 1/8 in que se encuentra en la parte superior al igual que en los otros análisis. Pero todas las medidas de comparación se realizarán en los puntos centrales de la probeta a las mismas distancias.

La malla utilizada en este caso es generada de forma automática y se tienen tamaños de elementos de 5mm, generando una malla con 23484 nodos y 5390 elementos. Además, se tiene en cuenta la calidad de la malla para poder verificar si es la más adecuada.

Para calificar la malla se utiliza la métrica de calificación Orthogonal Quality [1] en

donde los valores de calificación están entre cero (la peor calificación) y uno (la mejor calificación) como se muestra en la Fig. 11.

En el caso del mallado hecho para esta simulación se tiene un valor promedio de 0.976, en donde como se muestra en la Fig. 12. Se asume como un mallado excelente para este caso.

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 12. Criterio de calificación Orthogonal quality. Fuente:[11]

Teniendo todas estas condiciones se realiza la simulación térmica en estado transitorio obteniendo la Fig. 13, donde se muestran la probeta en los segundos 6 y 600 demostrando el enfriamiento que se presenta en ella con el tiempo.

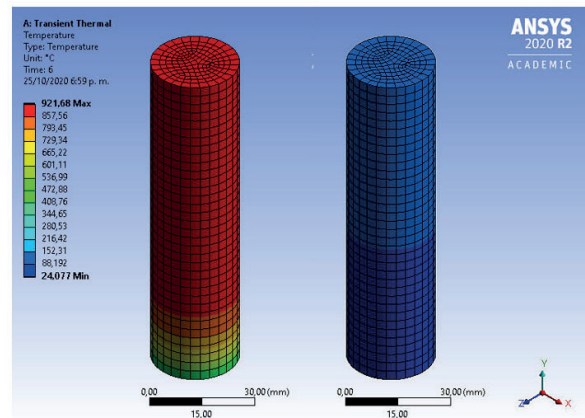


Figura 13. Simulación en los segundos 6 y 600. Fuente: Autores.

Al igual que en los otros casos se tomaron seis puntos de medición desde la base de la probeta, el primer punto se encontraría en la base y los otros 5 se tomaron a una distancia entre ellos de 1.5875 mm para poder realizar una comparación de estas temperaturas. Por lo que se crea la Fig. 14.

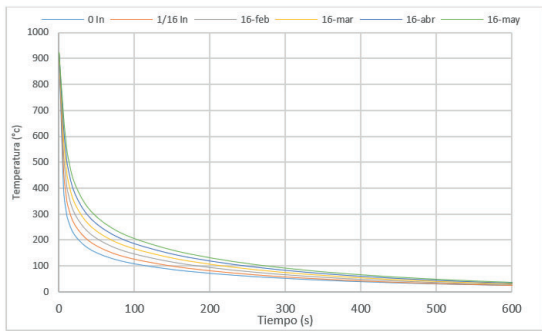


Figura 14. Curva temperatura vs tiempo en diferentes nodos (ANSYS).

Fuente: Autores

III. RESULTADOS

Los datos obtenidos mediante la simulación por diferencias finitas en Microsoft Excel, lenguaje de programación Python y en Ansys Student R2 en el proceso de enfriamiento con base en el test de Jominy, se presentan a continuación las gráficas en 2 tiempos importantes, como lo es a 35 segundos y 400 segundos.

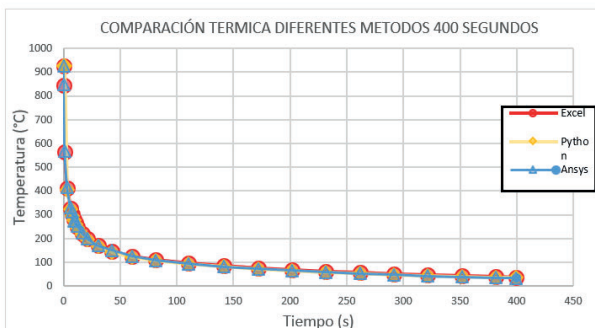


Figura 15. Resultados por los 3 métodos a 400 segundos de comenzado el enfriamiento. Fuente: Autores

Primeramente, se realizó la comparación del comportamiento del enfriamiento de la aproximación de probeta del test de Jominy en los 3 métodos transcurrido un tiempo de 400 segundos, esto debido a que, en el método de Microsoft Excel el tiempo se ve limitado por el número de celdas que tiene el archivo, debido a que la periodicidad con que se evalúa cada

momento es muy pequeña. Estas limitaciones generan que el análisis realizado en los otros métodos tenga que disminuir su tiempo para así poder realizar la comparación. Luego de realizada la comparación se observa con base en la Fig. 15, se observa que no se presenta ninguna diferencia significativa en el comportamiento de la temperatura de la probeta, esto debido a que el tiempo de análisis es muy grande y al final el comportamiento de la temperatura disminuye muy lentamente, pero también debido a que en los tres métodos se utilizan diferencias finitas, entonces el comportamiento de la temperatura debe ser similar.

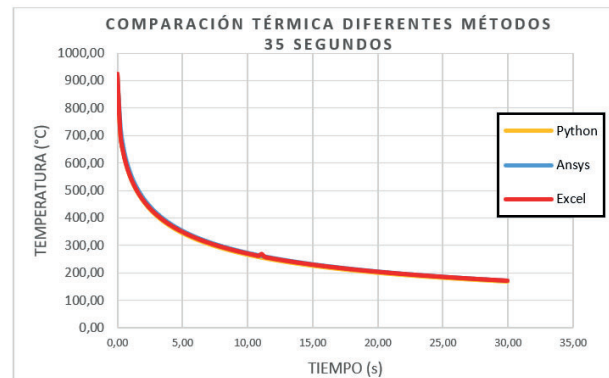


Figura 16. Resultados por los 3 métodos a 35 segundos de comenzado el enfriamiento.

Fuente: Autores

En la Fig. 16 se observa como es el comportamiento de la temperatura transcurridos 35 segundos desde cuando se empezó a realizar el enfriamiento de la probeta, este tiempo se seleccionó con base en la Fig. 15, debido a que en ese trayecto es cuando la temperatura presenta mayor tasa de reducción, y así determinar si en este lapso de tiempo crítico la temperatura variaba drásticamente en alguno de los métodos, pero como se puede observar no se presentan diferencias significativas en los

en los valores arrojados por los tres métodos, esto basado en que como se menciona antes, los tres métodos utilizan diferencias finitas para realizar la aproximación de la transferencia de calor que se presenta en la probeta.

IV. CONCLUSIONES

Al utilizar Microsoft Excel se puede comprender de forma muy sencilla el método de diferencias finitas y en este caso la transferencia de calor en el enfriamiento del test de Jominy siendo mucho más didáctico a comparación de la simulación realizada en el software Ansys o utilizando el lenguaje de programación Python.

Debido a que en el caso de Python es necesario tener un conocimiento intermedio del lenguaje de programación o al utilizar el software CAE se necesita un computador con especificaciones altas ya que no todos los computadores pueden ejecutar estas simulaciones. Pero si hacemos referencia a lo práctico que puede llegar a ser el utilizar Microsoft Excel, no es nada eficiente al momento de realizar simulaciones más exactas y precisas. Esto se debe a que Excel está limitado por el número de celdas que se puede tener en cada libro, además al tener tantos datos es necesario tener un computador con muy buenas especificaciones para poder procesar esta cantidad de valores dejando a un lado la parte práctica de este método. También se vuelve complicado la toma de datos de nodos específicos por la cantidad de matrices que se generan al final en estos libros.

Una solución para el problema que se genera al utilizar Microsoft Excel es utilizar el lenguaje de programación Python. Este además de optimizar los procesos de obtención de datos y realizar los cálculos necesarios de manera eficiente. Pero el método está limitado bajo conocimientos previos en programación e interpretación de códigos.

Al utilizar el software de simulación CAE Ansys Student R2 se denota las diferentes opciones de visualizar los datos obtenidos en la simulación facilitando la toma de datos para el análisis. Además, es una aplicación muy didáctica y de operación sencilla.

En cuanto a los resultados obtenidos por cada uno de los métodos, se obtiene resultados muy similares entre ellos. En el caso de Excel y Python. No se obtiene valores muy diferentes en todos los puntos de la simulación, debido a que para estos dos casos se utiliza el mismo método y las mismas condiciones.

Igualmente, al comparar estos métodos con la simulación realizada en el software CAE, no se tiene diferencias muy significativas entre ellos, ya que se utilizan las mismas configuraciones haciendo que el método utilizado en Ansys genere resultados cercanos. Por lo que utilizar cualquiera de los tres métodos tienden a brindar resultados similares diferenciándose solamente en su eficiencia.

Realizando una comparación con la figura 3 y 4 del artículo Representación en Diferencias Finitas de la transferencia de Calor en la Templabilidad del Acero SAE 1045 se puede observar que en el acero SAE 1080 y SAE 4130, las curvas de enfriamiento basadas en simulación numérica y elementos finitos, presentan similitudes con respecto a las presentadas en la investigación realizada, debido a que los métodos utilizados en todos los casos emplean métodos numéricos para simular el proceso.

V. REFERENCIAS

- [1] Rehm, B et al., 2008, "Manage Pressure ASTM, I. (2020). ASTM A255-20: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. West Conshohocken.
- [2] Abarca, L., Álvarez, M., Olivares, R., & Reyes, M. (2019). Laboratorio de tratamientos térmicos: Templabilidad. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- [3] Spim, J. A., & Carlos Alexandre dos Santos. (2011). Representación en diferencias finitas de la transferencia de calor en la templabilidad del acero SAE 1045 finite difference. Investigación Aplicada E Innovación, 5(1).
- [4] Martínez, F. (2019). Simulación numérica del tratamiento térmico de carburizado y temple de aceros de baja aleación. Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología.
- [5] López E., Hernández J.B., Solorio G. Vergara H.J., Vázquez O. & Garnica P. (2013). Modelo matemático de la transferencia de calor para predecir el perfil de durezas en probetas Jominy. Revista de Metalurgia, 49 (2).
- [6] Pietrzyk M. & Kuziak R (2011) Computer aided interpretation of results of the Jominy test. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol XI. N° 3. 707-722
- [7] Higuera, O., Trisancho, J., & Florez, L. (2007). Simulación térmica en CosmosWorks de un acero sometido a un ensayo de templabilidad Jominy. Scientia et Technica año XIII. (35).
- [8] Çengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. McGraw-Hill.
- [9] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. Pearson Educación.
- [10] Perez Prieto, J. A. (2017). Curso de python científico (1st ed.)
- [11] Ansys. (2015). Mesh quality & advanced topics. In Ansys Inc (Ed.), Introduction to ANSYS meshing (pp. 12)