UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO MEDIANTE TEMPLE EN AGUA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN AISI 4XXX Y 5XXX EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Autor:
Salas A. Miguel A.
C.I.: 24.225.716
Tutor:
Ing Romanello Donato.
C.I.: 4.131.877

Urb. Yuma II, Calle Nº 3, Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (Master) - Fax: (0241) 8712394

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO MEDIANTE TEMPLE EN AGUA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN AISI 4XXX Y 5XXX EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Trabajo especial de grado presentado como requisito para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

Autor:
Salas A. Miguel A.
C.I.: 24.225.716
Tutor: Ing. Romanello Donato

San Diego, Junio de 2017

Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-TG-2017-1CR-072

Valencia, 13 de Enero de 2017.

Ciudadano:
Salas Miguel
C.I. 24.225.716
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión **Nº 1-2017** de fecha **13/01/2017** aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "**SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO MEDIANTE TEMPLE EN AGUA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN AISI 4XXX Y 5XXX EMPLEANDO EN EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**" presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I. 4.131.877y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutotes Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Facultad de Ingeniería UJAP DECANATO

Atentamente,

Prof. Marlene Zambrano
Decana (Encargada) de la Facultad de Ingeniería
(CU502 de fecha 11/10/2016)

c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (2).
Archivo.

MEZ/jp

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello portador de la cédula de identidad N° 4.131.877, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Miguel Salas, portador de la cedula de identidad N° 24.225.716 titulado **SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO MEDIANTE TEMPLE EN AGUA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN AISI 4XXX Y 5XXX EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a Junio del año dos mil diecisiete.

Ing. Donato Romanello.
C.I.: 4.131.877

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS VII

LISTADO DE TABLAS IX

RESUMEN INFORMATIVO X

INTRODUCCIÓN 1

EL PROBLEMA 3

1.1Planteamiento del Problema 3

1.2 Formulación del Problema 5

1.3 Objetivos de la Investigación 6

1.3.1 Objetivo General 6

1.3.2 Objetivos Específicos 6

1.4 Justificación del Problema 6

1.5 Alcance 7

MARCO TEÓRICO 8

2.1 Antecedentes 8

2.2 Bases Teóricas. 9

2.2.1 Aleaciones Ferrosas. 9

2.2.1.1Diagrama Hierro-Carbono (Fe-**Fe3C**-C) 11

2.2.1.2 Elementos aleantes 12

2.2.2 Tratamiento Térmico. 16

2.2.2.1Tipos de Tratamientos Térmicos. 17

2.2.2.2 Medios de Enfriamiento. 23

2.2.2.3 Flujo de calor. 27

2.2.3Transformación. 28

2.2.3.1Diagrama TTT 28

2.2.3.2 Diagrama de transformación Isotérmica (IT 30

2.2.3.3 Diagrama CCT. 33
2.2.4Simulación. 35
2.2.4.1 Modelos matemáticos. 36
2.2.4.2Softwares de simulación. 45
2.3 Definición de Términos Básicos. 49

MARCO METODOLÓGICO 51
3.1 Tipo de investigación 51
3.2Diseño de la investigación 51
3.3Población y muestra 52
3.4Técnicas e instrumentos de recolección de datos 52
3.5Fases de la metodología 52

RESULTADOS 54
4.1 Evaluar programas capaces de realizar una simulación de tratamientos térmicos en aceros de baja aleación. 54
4.2Obtener las curvas de enfriamiento isotérmico TTT de los aceros 4XXX y 5XXX a estudiar. 55
4.3 Determinar la curva CCT de los aceros estudiados utilizando el modelo matemático. 63
CONCLUSIONES. 79
RECOMENDACIONES. 80
ANEXO A
ANEXO B
ANEXO C

ÍNDICE DE FIGURAS

figura

CONTENIDO FIGURA		pág
1	Clasificación generalizada de las aleaciones ferrosas……..	10
2	Clasificación de los aceros según las normas AISI/SAE…..….	10
3	El diagrama fe-c hasta 6,67%.…….....	13
4	Influencia de los elementos aleantes en la temperatura eutectoide A_1 y el contenido de carbono del punto eutectoide……..……	15
5	Efectos de los diferentes elementos aleantes en los aceros ….	16
6	Método de obtención de los diferentes tipos de recocido…….	18
7	Rangos de temperaturas en las que se obtienen los diferentes recocidos según el diagrama fe-C……...……..	19
8	Temperaturas de austenización para temple según diagrama fe-c ……..	21
9	Comparación de la estructura cristalina de la austenita con la ferrita y martensita……...……..	22
10	Efecto de aumentar la temperatura del agua en la severidad de enfriamiento (h)…….	25
11	Ejemplo generalizado de un diagrama TTT……...	29
12	Procedimiento para determinar el diagrama de calentamiento isotérmico (ith)…….	31
13	Diagrama de calentamiento isotérmico para un acero aisi 4140. la velocidad de calentamiento para alcanzar temperatura de mantenimiento es 1020°c/s……...	32
14	Diagrama IT para un acero con 0,39%C, 0,86%Mn, 0,72%Cr y 0,97% Ni…….	33
15	Diagrama IT (superior) y CCT (inferior) para un acero AISI 4130. las líneas punteadas son calculados y las líneas solidas son experimentales……	34
16	(a) Diagrama CCT de acero cromo-molibdeno usando curvas de enfriamientos simuladas. (b) Diagramas CCT de níquel-cromo con 0,77%c calculados en computadora….……...	35
17	Sistema general de un programa para predecir el comportamiento termo mecánico de aceros de baja aleación..	37
18	Representación de la ecuación JMAK (v {t}) en función del tiempo para dos (2) temperaturas diferentes (t1 y t2) y los tiempos de incubación para las dos (2) temperaturas (t1 y t2)..	41

19	Curva TTT de un acero. se indican los tiempos ti y tf a una cierta temperatura Tn…….	41
20	Aplicación de la regla de adición. izquierda: tiempo de incubación de la transformación no isotérmica (Ti^{CCT}). derecha: crecimiento de las fases……	43
21	Diagrama esquemático para el cálculo de la máxima fracción disponible para la transformación ferrítica……	44
22	Constantes utilizadas en el modelo matemático de Kirkaldy	56
23	Integral de la ecuación de Kirkaldy aplicada al programa del acero AISI 4027…….....	56
24	Ecuación de Kirkaldy para la ferrita, perlita y bainita para el acero AISI 4027……	57
25	Formulación de las gráficas en el programa para el acero AISI 4027……..	58
26	Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4027 formado por modelo matemático……..…	59
27	Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4027 de la USS……..….	59
28	Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4340 siguiendo el modelo matemático…….	60
29	Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4340 de la USS……..	61
30	Curva de transformación isotérmica del acero AISI 5140 siguiendo el modelo matemático…….	62
31	Curva de transformación isotérmica del acero AISI 5140 de la USS……..	62
32	Constantes utilizadas en el programa para realizar la curva CCT del acero 4027……	63
33	Regla de la adición para la bainita en el acero 4027……..	64
34	Inicialización de variables para la JMAK de la bainita del acero AISI 4027……..….	64
35	Ecuaciones de la JMAK para la bainita del acero aisi 4027.	65
36	comandos para graficar e identificar el diagrama TTT del acero AISI 4027……...	65
37	Diagrama CCT del acero AISI 4027 según el modelo matemático……..	66
38	Diagrama CCT del acero AISI 4360 según el modelo matemático……..	66
39	Diagrama CCT del acero AISI 4360 según el modelo matemático…….	67
40	Propiedades térmicas para simulación del acero AISI 4027.	68

41	Probeta utilizada en las diferentes simulaciones……	69
42	Malla de la probeta para la simulación……..	69
43	Simulación del enfriamiento de la pieza en ansys para el acero AISI 5140…….	70
44	Nodo 11 del estudio del acero AISI 5140……	71
45	Nodo 16 del estudio del acero AISI 5140……	71
46	Nodo 2301 del estudio del acero AISI 5140……	72
47	Extracto del resultado de las temperaturas del nodo 16 del acero AISI 4340……	73
48	Comandos para insertar los resultados de los diferentes nodos en el programa de la simulación……...……	73
49	Diagrama CCT con curvas de enfriamiento de los nodos de estudio del acero AISI 4027……..	75
50	Diagrama CCT con curvas de enfriamiento de los nodos de estudio del acero AISI 4340…….	76
51	Diagrama CCT con curvas de enfriamiento de los nodos de estudio del acero AISI 5140…….	77

LISTADO DE TABLAS

CONTENIDO TABLA		Pág
1	Nomenclatura de ciertos elementos presentes en los diagramas de tratamientos térmicos.…….....	14
2	Efecto del carbono y de los elementos aleantes en la temperatura ms……...…….	23
3	Severidad de enfriamiento (h) de varios medios de enfriamientos (rangos de temperatura perlíticas)…….	24
4	Diferentes softwares para tratamiento térmico…….	48
5	Propiedades de los elementos utilizados para el estudio……..	63
6	Propiedades requeridas para la simulación en ANSYS……	68
7	Porcentaje de volumen transformado de los diferentes nodos de los aceros de estudio…….	74

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO MEDIANTE TEMPLE EN AGUA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN AISI 4XXX Y 5XXX

Autor: Salas A. Miguel A.
Tutor: Romanello Donato.
Fecha: Junio 2017

RESUMEN INFORMATIVO

El propósito de este trabajo fue el de la simulación de un tratamiento térmico en aceros de baja aleación AISI 4XXX y 5XXX, con función de estudiar las posibilidades de realizar los ensayos de tratamientos térmicos en computadora en vez de realizarlos en los laboratorios disminuyendo así la cantidad de tiempo, dinero y material invertido en dichos ensayos. Para ello se utilizó un software capaz de, mediante la aplicación de un modelo matemático, predecir los volúmenes de transformaciones microestructurales de las piezas al ser sometidas a un temple en agua. Resultando en la obtención de los diferentes diagramas de transformación de los aceros AISI 4027, 4340 y 5140. Logrando también calcular los porcentajes de las microestructuras presentes en diferentes puntos de estas.

Descriptores: Evaluación, Tratamiento térmico, Temple, diagrama, aleación, mecanizado, probetas, temperatura, simulación, modelo matemático.

INTRODUCCIÓN

Los avances de la tecnología han permitido la utilización de diversos procesos para crear productos de mejor desempeño, y como estos avances son muy dinámicos contribuyen a superarse a sí mismos. Estos procesos innovadores lograron realizar operaciones para conseguir productos que, debido a sus diferentes especificaciones y alta exigencia, llegaron a ser considerados imposibles de realizar.

Generalmente los productos tecnológicos complejos requieren la aplicación de diferentes procesos, los cuales pueden causar variaciones en la naturaleza, propiedades, aspecto, etc. del producto. Estos procesos tienen como fin la optimización del producto, permitiendo un mejor desempeño del mismo a la hora de realizar su función. De los procesos aplicados a los materiales, los tratamientos térmicos son comunes. Esto se debe a que gracias a la aplicación de un conjunto de calentamientos y enfriamientos controlados se modifica la estructura micrográfica de las piezas sin necesidad de modificar su composición química de la aleación sometida a este. Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos aplicables en la actualidad, estos generan diferentes resultados en las piezas sometidas, y por ende el fin con el cual estos son aplicados varían dependiendo de la aplicación futura del producto.

El conocimiento de las propiedades de los elementos previo a su producción puede ser de gran ayuda al momento de realizar un proyecto o un diseño. Al realizar simulaciones que consigan predecir dichas propiedades es posible contar con dichas propiedades sin la necesidad de realizar ensayos en laboratorios que requieren de tiempo y uso de materiales producidos.

Esta investigación sobre simulación de tratamiento térmico mediante temple en agua en aceros de baja aleación AISI 4XXX y 5XXX constara de cuatro capítulos, los cuales se estructuran de la siguiente manera: Capítulo I, el problema, el cual consta del planteamiento estructurado del problema, desde lo más amplio y llevarlo hasta la problemática especificadas. Una vez llegado a esto, se realiza la formulación del

problema se plantean objetivos para la resolución de la misma. Posteriormente se expresa la justificación de la presente investigación y se determina el alcance de la misma, y a su vez los factores limitantes.

Siguiendo con la estructura del proyecto, capítulo II, marco teórico, el cual consta de los antecedentes y sus recopilaciones teóricas documentadas previamente al estudio, base teórica que es el pilar informativo del cual se apoya todo el estudio realizado, y finalmente la definición de términos relevantes para la realización de la exploración informativa.

Posteriormente, el capítulo III, marco metodológico, que define el tipo, el diseño, y los niveles de la investigación, determinando la metodología a aplicar para la realización del proyecto. Además, caracteriza a quienes beneficia la información a concluir, mediante que objeto de estudio se obtendrá, y las fases por las cuales se realizará.

El capítulo IV se presentan los resultados obtenidos de cada una de las fases planteadas en el capítulo III para el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado y finalizar otorgando las conclusiones y recomendaciones.

.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1Planteamiento del Problema

Los aceros han sido desde la antigüedad un material indispensable al momento de realizar una diversa cantidad de actividades que precise de una herramienta para poder llevarla a cabo. En la actualidad no es diferente. Los aceros han pasado a ser un material esencial para el avance humano y su estudio y evolución lo demuestran.

Al momento de diseñar en ingeniería, es importante que el diseñador conozca las propiedades definidas del material escogido, que comúnmente son aceros. Para esto se realiza diferentes pruebas que son almacenados y tabulados. Permitiendo que el diseñador conozca las propiedades de los materiales que posiblemente usara en su diseño de acuerdo a los esfuerzos y al entorno en que se va a desenvolver la máquina o la pieza diseñada. A pesar de ello, todas esas pruebas realizadas son solo promedios. En la realidad los materiales no se comportan de manera lineal como es observado en los gráficos, pero estos son herramientas fundamentales al momento de diseñar y producir, ya que, a pesar de que no son precisos a la realidad, poseen un nivel de aproximación que permite trabajar con estos de manera correcta.

En el proceso productivo, hay que asegurar que los materiales que se obtienen poseen las propiedades requeridas luego de pasar por la etapa final, que comúnmente son tratamientos térmicos y recubrimientos. Para ello se realizan ensayos y pruebas que permiten detallar las propiedades de la pieza producida. Ejecutar dichos ensayos conlleva a la necesidad de gran cantidad de energía y tiempo. Los cuales podrían ser empleados en otras actividades. Debido a ello y a la posibilidad de que la producción genere piezas que no cumplan con las propiedades requeridas. Es posible que tanto la

calidad como la eficiencia de producción disminuyan, además de generar gastos innecesarios.

Para disminuir esos costos para los ensayos se plantea realizar simulaciones a computadora capaces de predecir las propiedades que se obtendrán de los aceros al aplicarles los tratamientos térmicos. Ya existen diversos métodos para la predicción de las características de materiales como lo son programas diseñados específicamente para eso o herramientas de cálculos como lo es el método de elementos finitos.

Uno de los tratamientos térmicos más comunes es el temple en agua que busca conseguir una estructura martensítica en este gracias a su drástica velocidad de enfriamiento. Para obtener dicha estructura intervienen diversos factores como lo son la templabilidad del acero, la temperatura en que se realiza el temple, la cantidad de tiempo en la que es sometido el temple, el tamaño de la pieza templada. Este tratamiento térmico busca enfriar el acero lo suficientemente rápido como para evitar la nariz perlítica hasta llegar al punto martensitico (Ms) y que una vez ahí, sea lo suficientemente lento como para que la transformación no ocurra de manera drástica, evitando así fallos en la microestructura.

Realizar un temple requiere de una precisa aplicación para obtener las propiedades necesitadas. Si no es trabajado el temple de manera correcta, las piezas al momento de su producción podrían presentar fallos catastróficos como la reducción de dureza y resistencia mecánica, el agrietamiento de la pieza, tensiones residuales anormales y distorsiones en la pieza. Sin embargo, cada acero posee características propias de sí cuyas variaciones en su microestructura alteran las propiedades obtenidas con el tratamiento térmico, lo que quiere decir que realizar temples iguales a aceros con diferentes composiciones generara resultados diferentes que no siempre son favorables. Especialmente si las propiedades que se obtuvieron no son las requeridas. Para ello se utilizan herramientas como el diagrama Temperatura, Tiempo, Transformación (TTT) que permite determinar la microestructura con la que la pieza

terminara luego de realizarle cualquier tratamiento térmico y es única para cada composición que poseen los aceros.

No obstante, existen una gran cantidad de aceros diferentes con los que se puede trabajar. Como lo son los aceros al carbono que a su vez se dividen en aceros hipoeutectoides, eutectoides e hipereutectoides; también están los aceros inoxidables; aceros dúplex y los aceros aleados, que a su vez pueden ser de baja aleación, alta aleación; y aceros microaleados.

Debido a la variedad de aceros obtenidos en ingeniería. En el siguiente trabajo de investigación se trabajará con aceros de baja aleación. Ya que existe de la misma manera diversidad de aleaciones como de Cromo, Molibdeno, Silicio, Níquel, Manganeso, entre otros. Se escogerá un rango de trabajo de los aceros designados a las aleaciones según las normas AISI 4XXX y 5XXX las cuales son aleaciones que contienen principalmente Molibdeno y Cromo respectivamente. Para poder predecir el comportamiento de los aceros al momento de realizarles un temple, se utilizará programas computarizados que permiten graficar las propiedades mecánicas con las que el acero a tratar terminara. Así se tiene un aproximado al momento de realizar los ensayos, los cuales darán como referencia cuáles serán los valores cercanos de sus propiedades cuando se realicen los ensayos, asimismo se podrán determinar que microestructuras y los micro constituyentes que existirán en la pieza cuando se realice el proceso.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo se puede predecir las transformaciones de fases de los aceros de baja aleación AISI 4XXX y 5XXX al realizarles temple en agua?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Realizar una simulación empleando el método de elementos finitos que permita predecir las transformaciones microestructurales de los aceros de baja aleación de designaciones 4XXX al 5XXX según las normas AISI. Luego de aplicarles un temple en agua.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar los programas capaces de realizar una simulación de tratamientos térmicos en aceros de baja aleación a utilizar.
- Determinar mediante el modelo matemático las curvas TTT de los aceros de baja aleación seleccionados.
- Obtener los diagramas de transformación CCT de los aceros de baja aleación seleccionados.
- Analizar los porcentajes de transformación de fases en varios puntos de los aceros de baja aleación luego de ser sometidos al temple en agua.

1.4 Justificación del Problema

De esta investigación se pretende dejar una herramienta que permita a las instituciones educativas, empresas consultoras de ingeniería, institutos de investigación científica, las empresas de producción y a otros, una forma de predecir el comportamiento de los aceros de baja aleación, al aplicar una simulación del temple en agua. De los beneficios del presente trabajo de investigación se tienen la reducción de tiempo y costo en el momento de producir gracias a que al realizar la simulación \ se deja de lado la necesidad de utilizar material, no se requiere esperar a que la probeta se caliente en el horno y es capaz de arrojar resultados a corto plazo, eventualmente disminuyendo las horas-hombre

En función del sistema educativo se podría obtener una mejor percepción de lo que es un temple o cualquier otro tipo de tratamiento que se le realice a una probeta; y

para el sector productivo proporcionará una herramienta que permita no solo a simplificar los procesos productivos sino además a reducir los costos de operación, haciendo de esta forma que no solo se minimicen costos sino además el tiempo de inversión y aumente la producción al poseer un patrón de referencia computarizado que ayudara a dictaminar cuáles serán los posibles resultados cuando se realice el tratamiento térmico de manera real.

1.5 Alcance

Se realizará una simulación aplicando de método de elementos finitos a aceros de baja aleación. Específicamente de los aceros AISI 4XXX y 5XXX con función de determinar los porcentajes de transformación volumétrica luego de aplicarle un temple en agua a una temperatura preestablecida, para así comparar los resultados obtenidos los diagramas TTT de dichos aceros, ninguna comparación será realizada con ensayos de laboratorio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes:

En la actualidad existen varios estudios realizados sobre la predicción de las diversas propiedades de los aceros, además de su simulación. Desde el punto de vista metodológico, estos trabajos sirvieron de base para la realización y el estudio del tema en particular. Entre las investigaciones estudiadas se encuentran:

· Gonzales M. et al (2013). Presentando una publicación con título **Simulación de un Tratamiento Térmico mediante Elementos Finitos** 2013. La investigación se trata de incorporar a la simulación las transformaciones de fase y las distorsiones que estas producen. Al implementar el modelo de JMAK para determinar la evolución de las transformaciones de fase por la difusión y el modelo de Koistinen-Marburguer para la transformación martensita. De esta investigación se obtuvieron varias de las ecuaciones utilizadas en este trabajo de investigación.

· Edda R., Kleydis S., Luis A., Jesús S. de la Universidad Simón Bolívar presentaron una publicación con título **Caracterización dinámica de los cambios microestructurales en barras de aceros dúplex SAF 2205 utilizando la dimensión de información.** 2014. En este estudio, evalúan el comportamiento dinámico de las señales ultrasónicas de aceros dúplex SAF 2205. Se evalúa la influencia de las fases microestructurales y la dependencia de estas con la perdida de energía. De este trabajo investigativo se obtuvo información para la teoría aplicada.

· Ysava M., Víctor R. de la Universidad de Oriente con título **Estudio de la precipitación de fases por análisis térmico en aceros micro aleados al Cr.** 2009. Mediante la aplicación de técnicas como Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC),

Termo gravimetría (TG), Resistividad Eléctrica (RE) y Microscopía Óptica (MO), estudiaron las microestructuras que presentaron varias probetas al someterlas a distintos tratamientos térmicos y determinaron los valores de las energías que permite cada proceso de transformación. De este trabajo investigativo se obtuvo información para la teoría aplicada.

2.2 Bases Teóricas.

2.2.1 Aleaciones Ferrosas.

Las aleaciones ferrosas, como su nombre indica es la unión homogénea del elemento Hierro como su principal componente, con algún otro material con función de mejorar sus propiedades. Según la cantidad de carbono, las aleaciones ferrosas comprenden tres grupos: Hierro, Acero y fundición. El Hierro puro posee menos de

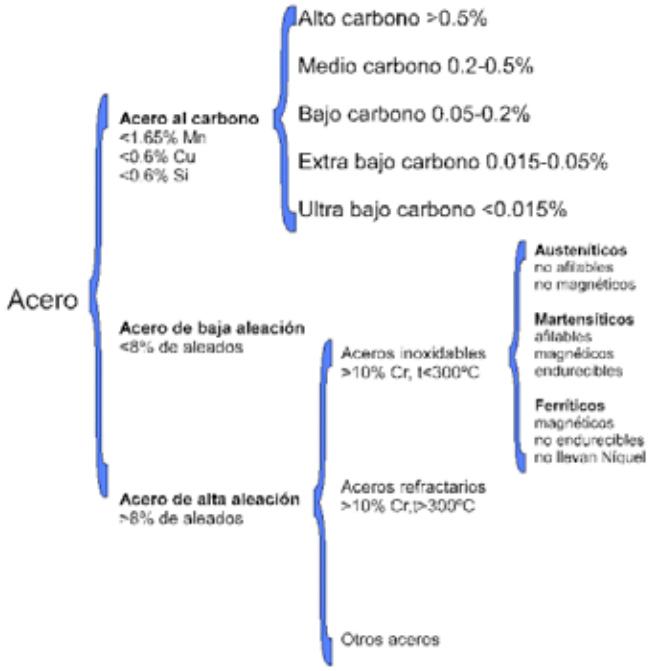


Figura 1. Clasificación generalizada de las aleaciones ferrosas.

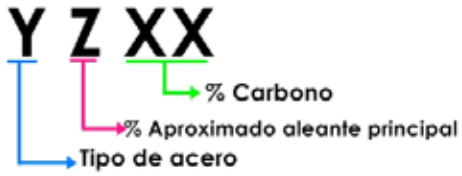


Figura 2. Clasificación de los aceros según las normas AISI/SAE.

Fuente. Web “Metalografia, Universidad tecnológica de Pereira”

El valor de “Y” se da dependiendo de la aleación principal que se le aplique al acero. Estos son:

- Y=1: si se trata de aceros al Carbono (corriente u ordinario);
- Y=2: si se trata de aceros al Níquel.

- Y=3: para aceros al Níquel-Cromo.
- Y=4: para aceros al Molibdeno, Cr-Mo, Ni-Mo, Ni-Cr-Mo.
- Y=5: para aceros al Cromo.
- Y=6: si se trata de aceros al Cromo-Vanadio.
- Y=7: si se trata de aceros Al Tungsteno-Cromo.
- Y=8: para aceros al Ni-Cr-Mo.

2.2.1.1Diagrama Hierro-Carbono (Fe-Fe_3C-C)

La base del entendimiento de los tratamientos térmicos de los aceros yace en el diagrama Hierro-Carbono. Dos diagramas son mostrados (ver figura 3), el Hierro-Carbono estable (Líneas punteadas) y el diagrama Fe-Fe_3C metaestable (líneas constantes). Para obtener una condición estable se precisa de mucho tiempo para su obtención, especialmente en rangos de temperatura y concentración de carbono bajo, debido a esto el diagrama metaestable es el de mayor interés. El diagrama Fe-C muestra cuales fases se esperan que se encuentren en equilibrio (o equilibrio metaestable) para diferentes combinaciones de concentración de carbono y de temperatura.

unto de máxima solubilidad de 0,028% C y se encuentra a una temperatura máxima de 727 °C, a 2,11% C y a 148°C se consigue el punto de máxima solubilidad de la austenita, a partir de este punto, a mayor concentraciones de C, ya la aleación no se considera un acero, sino una fundición. A la derecha del diagrama se encuentra la cementita (Fe3C).

s que se trabaje con aceros altamente aleados, debido a su existencia a altas temperaturas. Entre estas fases simples se encuentran regiones donde hay combinaciones de dos fases: como ferrita+cementita (perlita), austenita+cementita y ferrita+austenita. Para el tratamiento térmico en aceros, la fase líquida siempre se evita, Algunas zonas se especifican para facilitar la discusión de su utilidad, esto involucra:A_1, O la temperatura eutectoide, la cual es la temperatura

mínima para la formación de austenita; A_3, Es el límite de la región austenítica con bajo contenido de carbono, donde se encuentran los A_{cm}, Es el otro lado del límite de la austenita, para altos contenidos de carbono, se tiene entonces el Fe_3C. A veces se incluyen otras letras como c, e o r. Para facilitar su identificación se puede ver en la siguiente tabla (ver tabla 1).

En caso de agregar elementos aleados al acero, las posiciones de los límites A_{cm}, A_1 A_3 y la composición del punto eutectoide varían. Es importante el denotar que todas las aleaciones importantes disminuyen el contenido de carbono necesario para el punto eutectoide, también que, elementos que estabilizan la austenita como el Manganeso y el Níquel disminuyen la temperatura A_1 y los elementos estabilizantes de la ferrita como el Cromo, Silicio, Molibdeno y el tungsteno logran el efecto contrario, aumentan la temperatura A_1. Mediante cálculos termodinámicos modernos se permite la determinación de los cambios que afectan la fuerza motriz de la transformación de fase. Estos métodos también permiten los cálculos de diagramas ternarios y de diagramas de fase de orden superior, incluyendo carburos aleados (ver figura 4).

2.2.1.2 Elementos aleantes.

El agregar elementos aleantes genera cambios en las propiedades del acero. Existen una gran cantidad de aleantes del acero que involucra al Manganeso, el Cromo, Níquel, Molibdeno, Silicio, Vanadio, Tungsteno, Cobre, Niobio, Boro y Titanio, además de ciertos aleantes que comúnmente no son deseados como el azufre y el fósforo. Asimismo, se pueden usar más de un elemento aleante en el acero modificando aún más sus propiedades y afectando de diferente manera a la pieza aleada. Los efectos generados por los aleantes son tan variados que es más fácil presentar gráficamente sus resultados (ver figura 5).

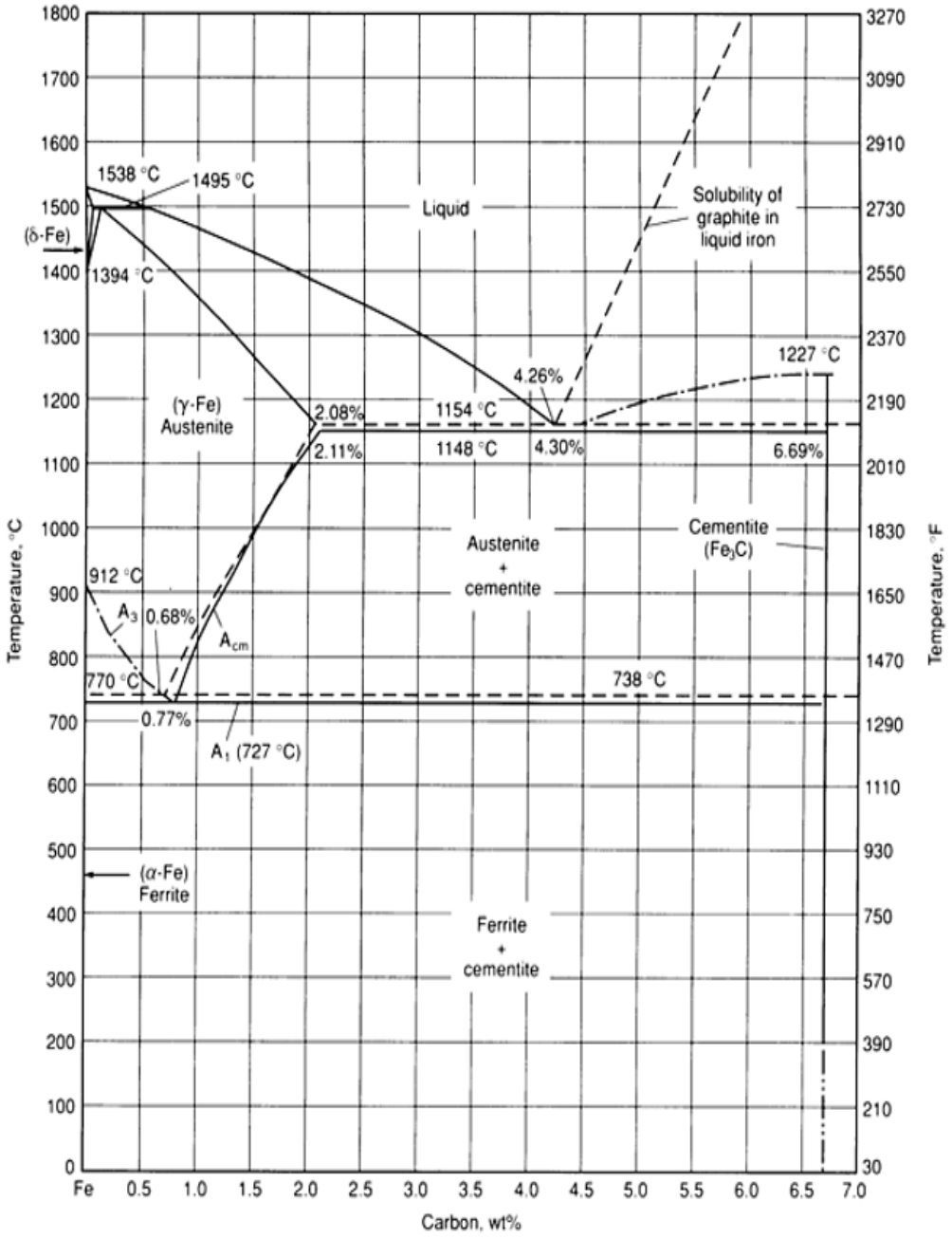


Figura 3. El diagrama Fe-C hasta 6,67%.

Tabla 1. Nomenclatura de ciertos elementos presentes en los diagramas de tratamientos térmicos.

$A_{c_{cm}}$, es la temperatura en la que la solución de cementita y austenita se completa en los aceros hipereutectoides.
A_{c1}. Temperatura en la que inicia la transformación de la austenita durante el enfriado.
A_{c3}. La temperatura en la que termina la transformación de austenita durante el calentamiento.
$A_{e_{cm}}$, A_{e3}, A_{e3}. Temperaturas en que las fases cambian en equilibrio.
$A_{r_{cm}}$. En los aceros hipereutectoides, es la temperatura en el que la precipitación de cementita inicia durante el enfriamiento
A_{r1}. Temperatura en la que la transformación de austenita a ferrita o a perlita se completa durante el enfriamiento
Ar3. Temperatura en el que la austenita se comienza a transformar en ferrita durante el enfriamiento
Ar4. Temperatura en el que ferrita delta se transforma en austenita en el enfriamiento.
Ms (o Ar''). La temperatura en la que inicia la transformación de austenita a martensita
Mf. Temperatura en el que termina la transformación de austenita a martensita.

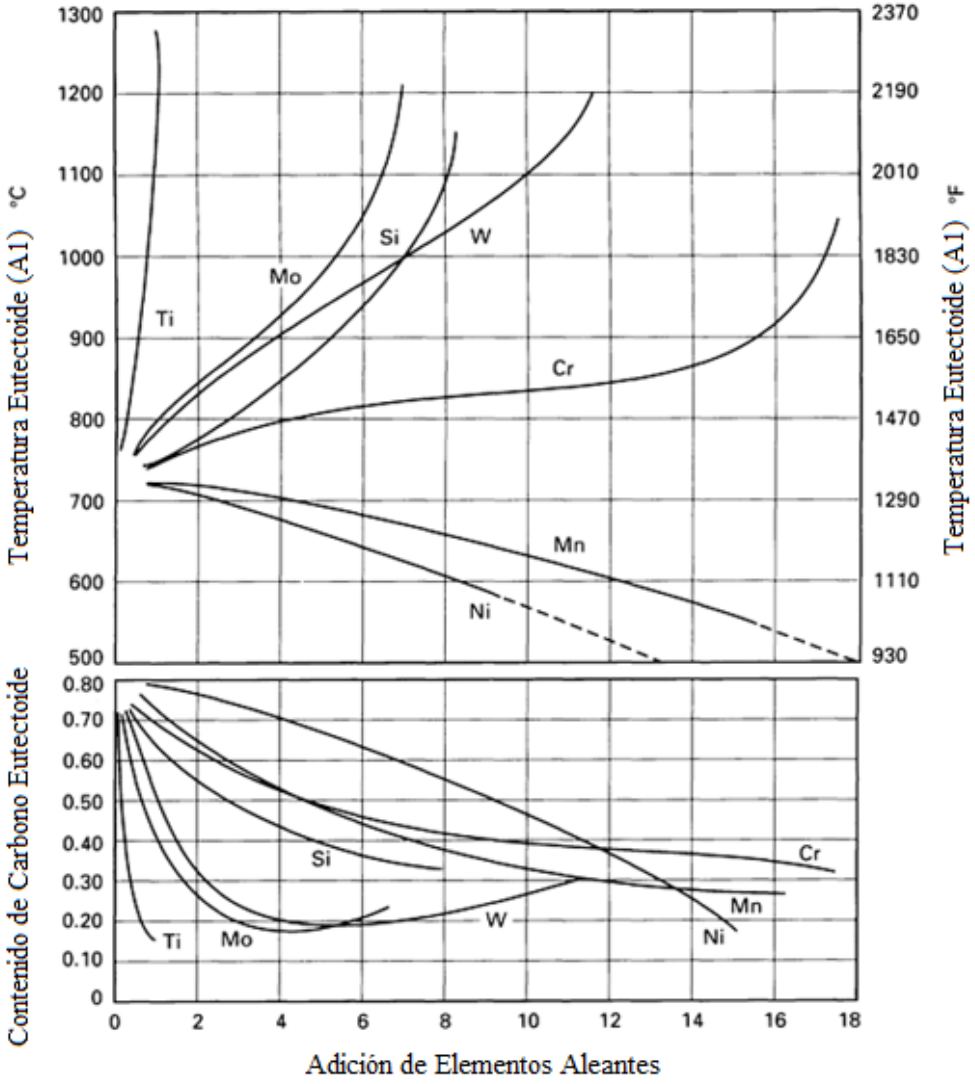


Figura 4. Influencia de los elementos aleantes en la temperatura eutectoide A_1 y el contenido de carbono del punto eutectoide.

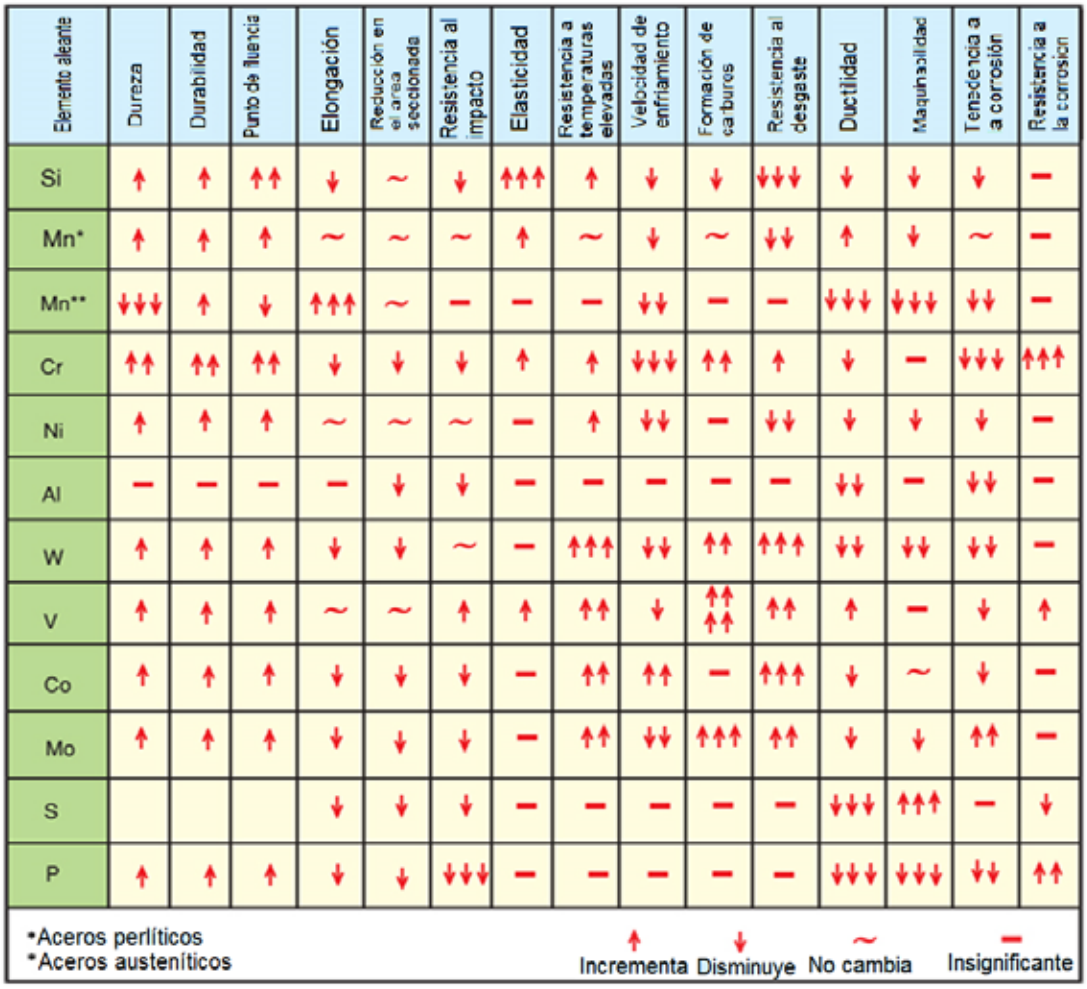


Figura 5. Efectos de los diferentes elementos aleantes en los aceros.

2.2.2 Tratamiento Térmico.

Los tratamientos térmicos no son más que un conjunto de calentamientos y enfriamientos controlados las cuales son sometidas a una aleación sólida para modificar su estructura micrográfica (y eventualmente sus propiedades), sin cambiar la composición química de la aleación. En caso de los aceros, los tratamientos térmicos se basan en la serie de transformaciones que puede experimentar la austenita mediante su enfriamiento.

Por ende se puede lograr mediante un estudio controlado de las condiciones más favorables de calentamiento y enfriamiento, una determinada estructura y la forma en que esta influye en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y estructurales para conseguir las mejores características en la utilización. El fin de los tratamientos térmicos es muy variado e incluyen: Conseguir una mejor maquinabilidad o menor dureza, eliminar acritud del trabajo en frio, eliminar tensiones externas e internas de cualquier origen, conseguir una estructura más homogénea, conseguir máxima dureza y resistencia, aumentar su resistencia a ciertos agentes químicos, variar algunas características físicas, otorgar propiedades particulares en la superficie de la pieza y otras aplicaciones.

Para poder lograr un tratamiento térmico en los aceros, primero se debe alcanzar la temperatura de austenización, para que el acero tenga la estructura austenítica a transformar mediante el enfriamiento, el cual puede presentarse de manera continua (Estudiados mediante las curvas CCT) o isotérmicos (Estudiados mediante las curvas TTT). Dependiendo de la velocidad de enfriamiento, el acero puede presentar en su interior una estructura martensítica, bainítica, de perlita fina o de perlita gruesa.

2.2.2.1Tipos de Tratamientos Térmicos.

Los tipos de tratamiento térmico varían principalmente en el método de enfriamiento de la pieza. En la mayoría de los casos el calentamiento y el mantenimiento es el mismo. Entre los tratamientos térmicos aplicables al acero se tienen los recocidos, normalizados y temple.

El recocido se realiza luego de calentar el acero a un estado austenítico homogéneo y provocando su descomposición mediante un enfriamiento muy lento (asemejándose a un enfriamiento en condiciones de equilibrio), que puede ser realizado dentro del horno o arena previamente calentada, para dar lugar a la transformación de la estructura de manera gradual y completa, permitiendo obtener los constituyentes más estables. Al aplicar un recocido se consigue una estructura con el máximo de ferrita y perlita gruesa. El recocido es utilizado para regenerar la estructura cristalográfica que

afina al grano, elimina tensiones internas producidas mediante tratamientos termomecánicos o mecánicos en frío.

Según lo que se busque realizar se distinguen distintos tipos de recocidos, se tienen el de homogeneización, el de ablandamiento, de recristalización, isotérmico y el doble recocido. De ello varia la temperatura en la cual se debe calentar la pieza y el método de enfriamiento (ver figuras 6 y 7) y cada tipo de recocido contiene una finalidad diferente.

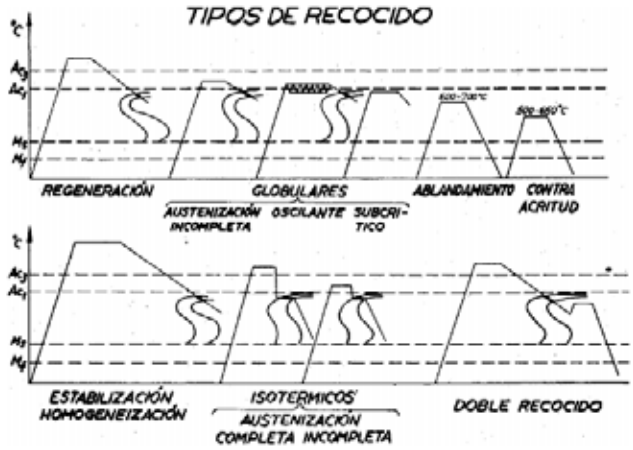


Figura 6. Método de obtención de los diferentes tipos de recocido.

El normalizado. Consiste en llevar el acero por encima del Ac3, con el objeto de conseguir su austenización completa, homogeneizarlo en ese estado y enfriarlo, con mayor velocidad que en el recocido, por lo general al aire libre. El calentamiento se realiza a una temperatura algo mayor que el recocido completo (temperatura de austenización 40-60 ºC por encima de Ac3) y la mayor velocidad de enfriamiento permite obtener estructuras perlíticas laminares muy finas. Uno de los peligros del recocido consiste en que, en razón de su enfriamiento lento, pueden reproducirse las estructuras gruesas originales. Esto no ocurre en el normalizado pues su mayor velocidad de enfriamiento lo impide. La mayor temperatura a que se realiza el proceso,

acorta el período de homogeneización, por lo que, reduciéndose el total del tiempo de operación (se tarda menos para austenizar plenamente la estructura cuanto más alta es la temperatura de austenización). Pero no se deben sobrepasar las temperaturas recomendadas a fin de evitar los riesgos de sobrecalentarniento y quemado. Es procedimiento más económico, y muy apto para el tratamiento de piezas coladas, por cuya causa se ha difundido muy ampliamente.

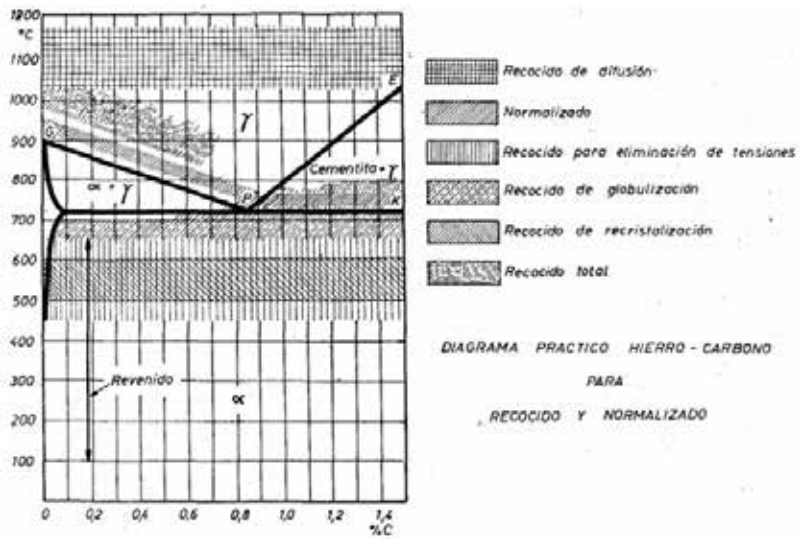


Figura 7. Rangos de temperaturas en las que se obtienen los diferentes recocidos según el diagrama Fe-C.

El normalizado busca eliminar tensiones producidas en operaciones anteriores, preparar al acero para operaciones de mecanizado futuras y proporcionar mejores propiedades mecánicas en virtud de su estructura perlítica fina. En aceros hipoeutectoides, la temperatura a que deberá llevarse la pieza será de 40-60 °C mayor que su AC3. Normalmente en casi todos los materiales al aumentar la dureza disminuye la tenacidad. Pero en el caso de un acero normalizado no necesariamente resultara menor su tenacidad que la de ese mismo acero en recocido y por tanto más blando.

El temple. Es un proceso en el tratamiento térmico del acero con el que se obtiene un equilibrio deseado entre la dureza y la tenacidad del producto tratado. Consiste en calentar el acero hasta temperaturas de austenización para luego enfriarlo rápidamente. Esto permite obtener una transformación a una estructura martensítica dura y resistente.

Con este tratamiento se busca conseguir alguno de los siguientes fines. Mejorar las características mecánicas de resistencia a la tracción, límite elástico y dureza, a expensas de disminuir el alargamiento, estricción y resiliencia. El temple fragiliza a los aceros y les confiere muy poca resiliencia. También se busca aumentar el magnetismo remanente y la resistencia eléctrica. Por último modificar las propiedades químicas, debido a que los aceros templados resisten mejor la acción de ciertos ácidos que los recocidos.

Para realizar el temple se eleva la temperatura de la pieza por encima del punto de transformación Ac3 o Ac1, enfriando con una velocidad tan alta que se genera un considerable aumento de la dureza, se puede realizar tanto superficialmente como hasta el núcleo de la pieza, formando martensita. A continuación, se muestra la franja de temperatura que se utiliza para la austenización del diagrama Fe-C (ver figura 8).

La formación de la martensita se ve influida, además de la temperatura del temple, su tiempo de mantenimiento a ella y la forma de enfriamiento. Si la temperatura es demasiado alta, la martensita formada será de agujas gruesas a consecuencia de la falta de gérmenes, lo mismo ocurre si el tiempo de mantenimiento es demasiado largo. La velocidad de enfriamiento se debe al tipo de acero, y en todos los casos debe ser mayor a la velocidad crítica. Debido al brusco enfriamiento se aumentan las tensiones térmicas y de transformación engendrada en el acero, y en las piezas de forma complicada existe el peligro de formar una fisura.

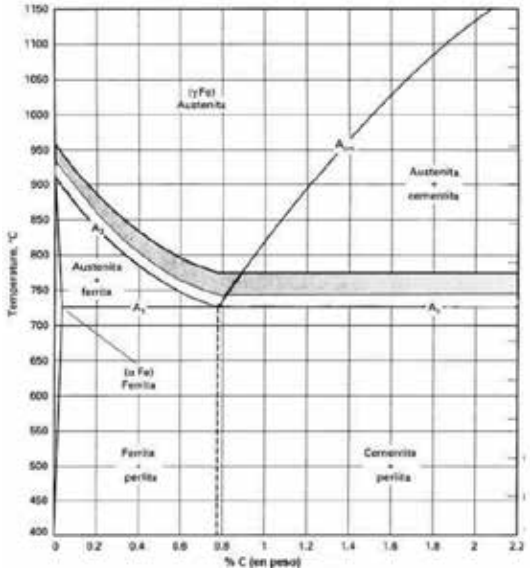


Figura 8. Temperaturas de austenización para temple según diagrama Fe-C.

El hecho de incrementar la cantidad de carbono en el acero incrementa la cantidad de carburos en las estructuras templadas. También por ende aumenta la cantidad de carbono que debe difundirse para que puedan ocurrir los cambios necesarios. Cuando se presentan elementos aleantes, un estado del templado, no presente en las aleaciones hierro-carbono, toma lugar. Esta transformación consiste en un cambio en los contenidos de la aleación de las fases de ferrita y de los carburos e involucra una difusión del elemento aleante mediante la ferrita y hasta cierta extensión de los carburos. Por esta razón el tiempo y la temperatura de temple pueden aumentar apreciablemente.

La transformación de austenita en martensita difiere de otras reacciones en la cual esta se descompone, y no toma lugar un proceso de nucleación y crecimiento, además no ocurre difusión. En cambio, cierto volumen en forma de reja de los planos cristalográficos en el que los granos de austenita se encuentran cambian abruptamente, mediante un mecanismo de corte, del FCC (Cubico Centrado en las Caras) de la austenita a la estructura martensítica tetragonal con centro en el cuerpo. (Ver figura 9)**.** Los cambios en el volumen que ocurren durante la transformación generan tensiones

en nivel microscópico, tanto en la martensita recién formada como en la austenita adyacente sin transformar.

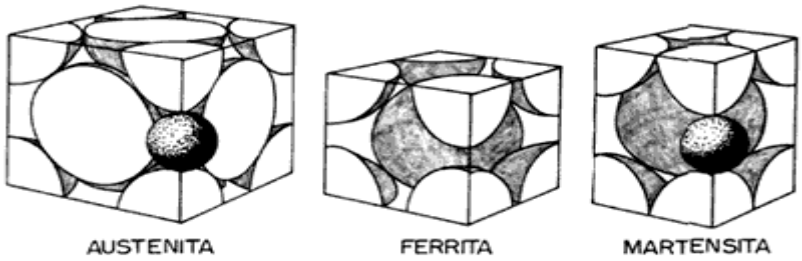


Figura 9. Comparación de la estructura cristalina de la austenita con la ferrita y martensita.

Mientras mayor sea el contenido de carbono de la austenita, menor será la temperatura de transformación martensítica (Ms). La temperatura Ms, normalmente debería ser disminuida por elementos que disminuyen el contenido de carbono de la austenita en equilibrio con la ferrita. Con algunas excepciones- A una primera aproximación la temperatura de Ms se puede considerar que varía linealmente con el porcentaje del material aleante, gracias a la data obtenida en la actualidad (algo inconsistente), se indica en la siguiente tabla (Tabla 2) como cada elemento aleante modifica de manera lineal el contenido de carbono asociado con un Ms fijo. Como este Ms varia aproximadamente de manera lineal con el contenido de carbono, se muestra un pequeño error el considerar que los elementos afectan el Ms linealmente. Según la siguiente tabla se puede tomar una idea de cómo afecta aproximadamente la variación de estos elementos en la temperatura de martensificación.

Los efectos en la temperatura Ms al combinar distintos aleantes no ha sido bien estudiado aunque se sugieren que su efecto es aditivo. También hay estudios que suponen que cada elemento multiplica la temperatura Ms (En grados Fahrenheit) por un factor que varía linealmente con el porcentaje del elemento. Los datos experimentales no permiten determinar la precisión relativa de las dos sugerencias

mostrada. Aunque el trabajo teórico indica que el efecto de los diferentes elementos son aditivos con respecto al contenido de carbono para una temperatura Ms fija.

Tabla 2. Efecto del carbono y de los elementos aleantes en la temperatura Ms.

ELEMENTO	Efecto por Porcentaje de Elemento	
	°C.*	°F.†
Carbono (0.20%-0.90%)	−350	−630
Manganeso	−40	−72
Vanadio	−35	−63
Cromo	−20	−36
Niquel	−17	−31
Cobre	−10	−18
Molubdeno	−10	−18
Tungsteno	−5	−9
Silicon	0	0
Cobalto	+15	+27
Aluminio	+30	+54

NOTE: The M_s temperature for iron-carbon alloys, extrapolated to 0% carbon, is approximately 550° C.* (1010° F.).

2.2.2.2 Medios de Enfriamiento.

El enfriamiento comúnmente es realizado en agua, aceite o aire. El rango de temperatura de la mayoría de las transformaciones de austenita a perlita normalmente corresponde a temperaturas donde el medio acuoso o aceitoso proporciona un estado A o B de enfriamiento. Para transformación bainítica se busca solo un enfriamiento por medio aceitoso que presente un estado B o C o un medio acuoso con los estados A o B. Para minimizar la probabilidad de transformaciones en perlita y bainita, usualmente se busca que la velocidad de enfriamiento en el interfaz del acero-medio sea alta durante los estados A y B. Un alto coeficiente de película y un medio severo de enfriamiento son lo más deseado en estos estados.

El interfaz agua-acero tiene un gran coeficiente de película durante el estado B. Por esto es que el agua es altamente utilizada como medio de enfriamiento. Desafortunadamente, la severidad de enfriamiento del agua es relativamente bajo durante el estado A, cercano a 1/10 de lo que se consigue en el estado B. Además de eso el agua tiende a permanecer en el estado A por un periodo de tiempo prolongado y persiste hasta bajas temperaturas. Para obtener enfriamiento satisfactorio en el medio acuoso normalmente se toman medidas que aumentan la temperatura de transición

entre las etapas A y B. Usualmente el agua es movida en la superficie, o se mueve la pieza o ambos. La agitación y la turbulencia tienden a aumentar la temperatura de transición además de la severidad de enfriamiento en ambos estados (ver tabla 3). Al enfriar con agua, se aplica presión mediante un inyector para asegurar el movimiento a las partes más profundas de la pieza, donde suele persistir el estado A. También se puede elevar la temperatura de transición al adicionar sodio, calcio o cloruro de litio, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, ácido fosfórico, ácido sulfúrico (en bajas cantidades), u otros compuestos inorgánicos solubles, esto puede deberse gracias a la tensión superficial que generan estos compuestos entre el agua y el vapor.

Tabla 3. Severidad de enfriamiento (H) de varios medios de enfriamientos (rangos de temperatura perlíticas).

	Valor de H en pulg-1 para			
AGITACIÓN	Salmuera	Agua	Aceite y sal	Aire
Ninguna	2	0.9–1.0	0.25–0.30	0.02
Suave	2–2.2	1.0–1.1	0.30–0.35	....
Moderado	....	1.2–1.3	0.35–0.40	....
Bueno	....	1.4–1.5	0.4 –0.5	....
Fuerte	....	1.6–2.0	0.5 –0.8	....
Violento	5	4	0.8 –1.1	....

La temperatura del agua tiene un gran efecto en la temperatura de transición entre los estados A y B. A mayor temperatura del agua, menor será la temperatura de transición (Ver figura 10). Al elevar la temperatura del agua de 21°C a 50°C la temperatura de transición entre los estados A y B disminuyó de aproximadamente 860°C a 580°C. Para obtener una velocidad enfriamiento en los rangos de temperatura de perlita y bainita es importante mantener el agua fría.

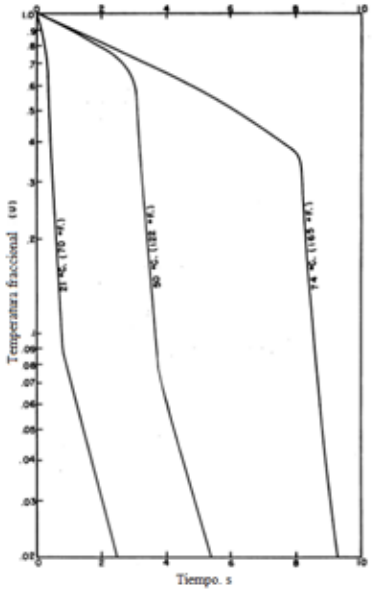


Figura 10. Efecto de aumentar la temperatura del agua en la severidad de enfriamiento (H).

Existe un problema en mantener una temperatura de transición alta entre los estados A y B del medio acuoso, que se dan cuando surge el estado C. El rango de temperatura de transformación de austenita a martensita decae en el estado C. Para minimizar las probabilidades de fractura por enfriamiento, es deseable disminuir el gradiente de temperatura a través de la parte, al enfriar lentamente en este rango de temperatura. Entonces se puede decir que una severidad de enfriamiento baja durante el estado C es ventajoso cuando se da debajo del rango de transformación de bainita. La adición de solutos en este estado genera poco efecto en este estado.

El aceite es utilizado como medio de enfriamiento principalmente por su baja severidad de enfriamiento durante el estado C y es por ende es menos probable de fracturar la pieza de trabajo. Como el aceite tiene un punto de ebullición más alto que el agua, el estado C se da a una mayor temperatura, pudiendo causar que se inicie este estado antes de que el acero cruce la nariz bainítica, aumentando la probabilidad de formar bainita.

El problema de aumentar la temperatura de transición del estado A al rápido estado B ocurre también con el aceite. Aunque no es tan severo en aceite porque la velocidad de enfriamiento en este medio no es tan alto en este medio. Al igual que con el agua, el movimiento y la turbulencia tiende a aumentar la temperatura de transición y ciertos aditivos causan el mismo efecto. El cambiar la temperatura del aceite no genera un gran cambio como lo hace en el agua. La razón dada por el efecto directo del incremento de la temperatura del medio para mantener una capa de vapor (estado A) se contrarresta por la disminución de la viscosidad del aceite y por la turbulencia.

Las características de enfriamiento de diferentes aceites difieren de manera apreciable. Poco se sabe de la diferencia que se tienen entre los aceites de petróleo y los aceites grasos. Aunque se sabe que si se aumenta el punto de ebullición, las temperaturas de transformación entre estados también incrementa.

El uso de sales fundidas ha incrementado en los pasados años. Mezclas eutécticas de nitratos y nitritos alcalinos son los más utilizados por su bajo punto de fusión. La ventaja al utilizar sales como medio de enfriamiento se debe a que el medio se puede hacer lo suficientemente caliente para disminuir la diferencia de temperatura a través del interfaz metal-medio en el rango de temperatura martensítica, por ende reduciendo la velocidad del flujo de calor y asimismo reduciendo los gradientes de temperatura en la pieza donde normalmente ocurren fracturas. Las sales utilizadas para el enfriamiento puede que siempre se encuentren en el estado C. Probablemente la temperatura de las sales no afecta la severidad de enfriamiento altamente, aunque si afecta apreciablemente la diferencia de temperatura a través del interfaz a menores temperaturas superficiales. La severidad de enfriamiento de las sales es muy parecidas a aquellas generadas por los aceites en el rango de temperatura perlítica.

El enfriado en metal fundido ofrece la ventaja de un medio a alta temperatura al igual que el uso de sales. Las características de enfriamiento de varios metales y aleaciones no han sido investigadas sistemáticamente. El plomo es comúnmente utilizado en tratamientos térmicos de producción. Como los metales no suelen

evaporarse o descomponerse a las temperaturas de austenización, proveen un enfriamiento que es enteramente estado C. Así como las sales y los aceites, el plomo provee una severidad de enfriamiento similar a estos.

Por último se tiene el aire como medio de enfriamiento, el cual es utilizado a menudo para minimizar las gradientes de temperatura en dentro de las partes al proporcionar una baja severidad de enfriamiento y por ende una baja velocidad de enfriamiento en el rango martensítica. Estos cumplen ese propósito pero a la vez proveen un bajo coeficiente de película en los rangos de temperatura perlíticas y bainíticas. Como resultado solo aceros que se pueden transformar lentamente en dichos rangos van a endurecerse en martensita en enfriamiento con aire, a excepción de secciones angostas. El enfriamiento con aire es enteramente estado C, y la severidad de enfriamiento no varía mucho con la temperatura superficial o la del medio. Como la transferencia de calor por radiación entre la pieza y las paredes normalmente juega un rol considerable en el llamado enfriamiento por aire, las paredes así como el aire se deben tomar en cuenta.

2.2.2.3 Flujo de calor.

Para poder obtener en un acero parte de las transformaciones deseadas durante el temple y el revenido, es necesario someter al sujeto a un tratamiento térmico. En dichos tratamientos, los periodos en los cuales la temperatura cambia son tan importante como los periodos en el que se mantiene constante. Estos cambios de temperatura son gobernados en general mediante el flujo de calor tanto dentro como fuera de las partes. El flujo calorífico en el acero y en su superficie es uno de los fenómenos fundamentales que se ven envueltos en el diseño metalúrgico para el endurecimiento.

Las características térmicas del metal y del interfaz metal-medio y ciertas de las transformaciones características de dicho metal son conocidas, la teoría del flujo de calor permite realizar un cálculo de la temperatura en función de tiempo para cada una de las posiciones de la parte tratada, o de cualquier otra información que se desea conocer del flujo de calor. Las ecuaciones envueltas no son de fácil solución, y

normalmente se necesitan métodos gráficos, máquinas matemáticas o métodos analógicos para poder resolverlo. Aunque la principal dificultad en la práctica que tiene que ver con el flujo de calor es que las características térmicas del metal involucrado y de la interfaz no son conocidas. Estas características pueden incluir la conductividad térmica del metal, su capacidad calorífica por unidad de volumen y el coeficiente de película que caracteriza a la interfaz. Dicho coeficiente se define como la relación de la tasa de flujo de calor por unidad de área de la interfaz por la diferencia de temperatura entre el metal y el medio. Si ocurre alguna transformación durante el calentamiento, se ve afectado tanto la temperatura como el tiempo del flujo.

El flujo de calor, en la gran mayoría de los casos que son de interés para los tratamientos térmicos, es afectado por las condiciones iniciales, la conductividad térmica y la capacidad calorífica por unidad de volumen del metal; el coeficiente de película del interfaz metal-medio y el tamaño y forma de la pieza.

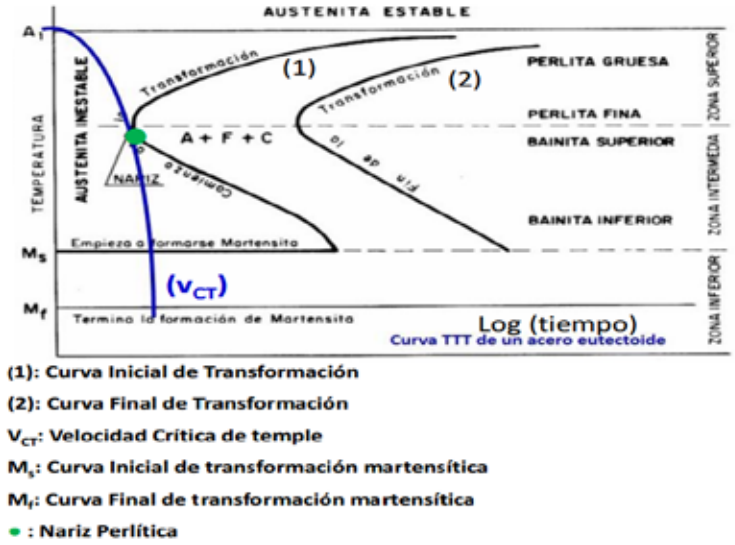
La condición inicial consiste en la temperatura al inicio en todos los puntos de la pieza y la temperatura del medio. Dicha temperatura puede ser considerada uniforme y constante. La conductividad térmica y la capacidad calorífica por volumen del metal dependen de la composición, la microestructura y la temperatura local. El coeficiente de película se ve afectado por diferentes variables, pero usualmente el problema del flujo de calor puede ser dividido en tres rangos o menos de temperatura superficial en el cual el coeficiente se mantiene prácticamente constante. La variable más importante es el tamaño de la pieza. En diferentes casos la forma de la pieza se puede considerar como la combinación de formas simples como placas, cilindros y esferas.

2.2.3Transformación.

2.2.3.1Diagrama TTT.

Se denomina Curva T.T.T. al diagrama que relaciona el tiempo y la temperatura requeridos para formar una transformación isotérmica. Los Diagramas representan el porcentaje de transformación en función de la temperatura (Eje vertical) y del tiempo

(eje horizontal, normalmente a escala logarítmica) (ver figura 11). Son muy útiles para entender las transformaciones de un acero enfriado isotérmicamente.



(1): Curva Inicial de Transformación
(2): Curva Final de Transformación
V_{CT}: Velocidad Crítica de temple
M_s: Curva Inicial de transformación martensítica
M_f: Curva Final de transformación martensítica
• : Nariz Perlítica

Figura 11. Ejemplo generalizado de un diagrama TTT.

Se distinguen tres zonas diferentes en la curva. Las cuales son:

1. La de la izquierda de la curva, donde la transformación de la Austenita no se ha dado.
2. Zona intermedia, en el cual la Austenita se encuentra en periodo de transformación.
3. La zona derecha donde ya se transformó la Austenita completamente.

Muchos factores influyen en la forma de las curvas TTT. Capaces de desplazarlas tanto derecha o izquierda, retrasando o adelantando la transformación martensitica, como moviendo hacia arriba o abajo las líneas de inicio y fin de la transformación martensitica. Estos factores son:

1. El contenido de carbono de la aleación: Mientras mayor sea el contenido de carbono, mayor será el desplazamiento de las curvas de transformación hacia la derecha y hacia abajo las líneas martensíticas.

2. Temperatura de austenización: A mayor temperatura, mayor será el tamaño del grano y por lo tanto más grandes serán los desplazamientos de las curvas hacia la derecha y hacia abajo.
3. Elementos aleantes: Cada aleación influye de manera diferente a la curva TTT. Asimismo estos se pueden dividir en tres tipos:

· Ganmágenos: Aquellas aleaciones que se disuelven preferentemente en la Austenita, como es el caso del Níquel y del Manganeso. Gracias a ello, expanden el campo de existencia de la Austenita causando que las isotermas se desplacen hacia abajo.

·

el Molibdeno, Vanadio y Tungsteno, desplazando las isotermas hacia arriba.

· Carburígenos: Son elementos que tienden a formar carburos (Habitualmente Alfágenos). Producen una segunda zona de temperaturas de transformaciones rápidas al nivel de la transformación de la Austenita en Bainita.

Para facilitar el desplazamiento que ocurre en la línea isotérmica Ms, existe la Formula de Andrews, la cual da la influencia de los elementos aleantes en la temperatura Ms, en grados Celsius.

$$Ms\ (^{o}C)=500-350(\%C)-40(\%Mn)-35(\%V)-20(\%Cr)-17(\%Ni)-10(\%Cu)-5(\%W)+15(\%Co)+30(\%Al) \quad (1)$$

2.2.3.2 Diagrama de transformación Isotérmica (IT).

Este tipo de diagrama muestra que ocurre cuando un acero se mantiene a una temperatura constante por un periodo prolongado. El desenvolvimiento de la microestructura con tiempo puede ser seguido al mantener los especímenes sumergidos en un baño de plomo o sal y enfriarlos uno por uno luego de incrementar el tiempo que se encuentra sumergido, y luego se toman nota de las cantidades de fases que se formaron en la microestructura con ayuda de un microscopio.

Para determinar el diagrama de calentamiento isotérmico (ITh), se tiene que durante la formación de austenita de una microestructura original de perlita y ferrita o martensita templada, el volumen (y por ende la longitud) disminuye con la formación de una fase densa de austenita. De las curvas de elongación (ver figura 12), la línea donde inicia y termina la formación de austenita, normalmente definido como una transformación al 1% y 99% respectivamente, pueden ser derivadas. Esto luego es graficado en una curva temperatura- tiempo (log) (ver figura 13). También en el diagrama se muestran las temperaturas A_{c1} y A_{c3}, el producto final es una mezcla entre ferrita y austenita. Del diagrama se puede notar que un sobrecalentamiento considerable se requiera para completar la transformación en un corto tiempo, también que la microestructura original juega un gran rol. Una estructura distribuida finamente como la martensita templada es más propensa a transformarse rápidamente en austenita que, por ejemplo, una estructura ferritica-perlitica. Esto es particularmente acertado para los aceros aleados que forman carburos como el Cromo y el Molibdeno.

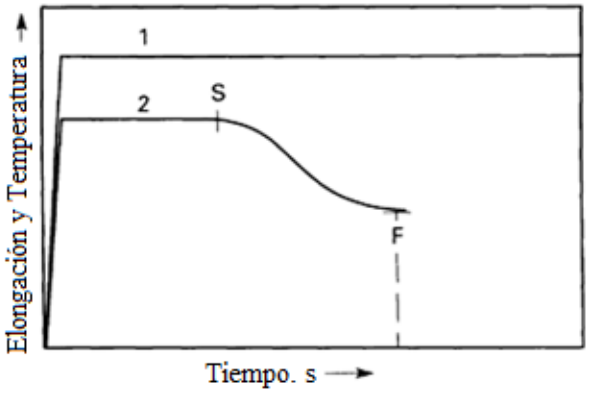


Figura 12. Procedimiento para determinar el diagrama de calentamiento isotérmico (ITh).

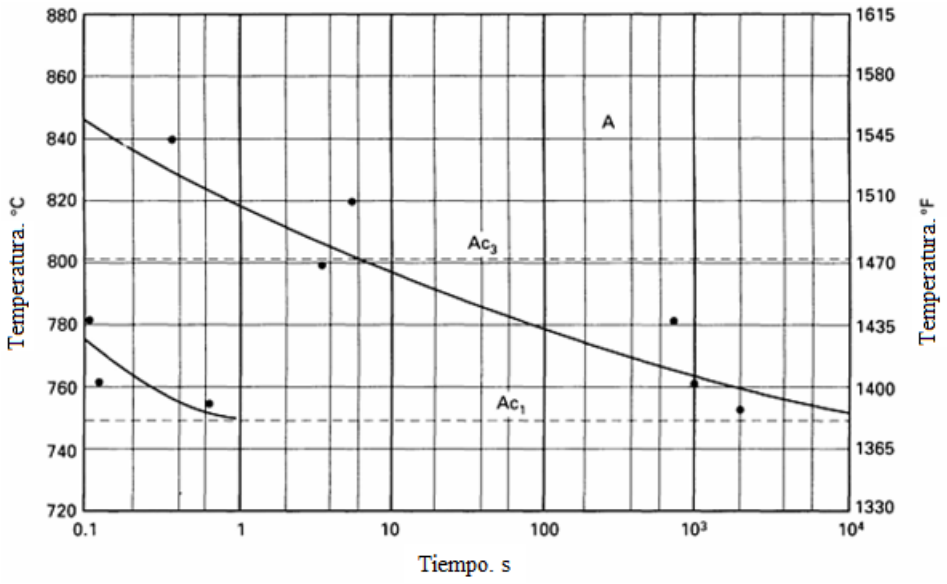


Figura 13. Diagrama de calentamiento isotérmico para un acero AISI 4140. La velocidad de calentamiento para alcanzar temperatura de mantenimiento es 1020°C/s.

El procedimiento para determinar los diagramas de enfriamiento isotérmico (IT) inicia a altas temperaturas, normalmente en el rango austenítico luego de mantenerlo el tiempo suficiente para obtener austenita homogénea sin carburos sin disolver, seguido de un enfriamiento rápido a la temperatura deseada. Un ejemplo del diagrama IT se puede observar en la figura 14. Donde el enfriamiento inicio de 850°C y se indican las temperaturas A_1 y A_3, así como la dureza. Por encima de la temperatura A_3 no pueden ocurrir transformaciones. Entre A_1 y A_3 solo se pueden formar ferrita de la austenita. Se observan una serie de curvas de fracción isovolumetricas aunque normalmente solo se muestran las curvas 1% y 99%. Se denota que las curvas tienen una forma de C, lo cual es típico para las curvas de transformación. Las curvas a altas temperaturas muestran la transformación de la perlita y a baja temperatura muestra la transformación bainítica. En el medio se muestra la llamada bahía de la austenita, común para ciertas aleaciones de acero con una cantidad apreciable de elementos aleantes que forman carburos como el Cromo y el Molibdeno.

2.2.3.3 Diagrama CCT.

El uso de una velocidad de enfriamiento constante es usual en la práctica experimental. Aunque esto rara vez ocurre en situaciones prácticas. Se pueden encontrar curvas para las llamadas velocidades de enfriamiento naturales de acuerdo a las leyes de enfriamiento de Newton. Estas curvas simulan el comportamiento en el interior de una pieza, como la velocidad de enfriamiento de una barra Jominy a cierta distancia de la punta enfriada. Cercana a la superficie las características de la velocidad de enfriamiento pueden ser muy complejas como se puede denotar en la figura 15**.** Donde se muestra un diagrama CCT de un acero 4130 donde las regiones ferriticas, perlíticas y bainíticas son claramente visibles, al igual que la temperatura de martensificación Ms. Nótese que la temperatura Ms no es constante la cual es precedida por la formación de bainita, pero típicamente disminuye con el tiempo.

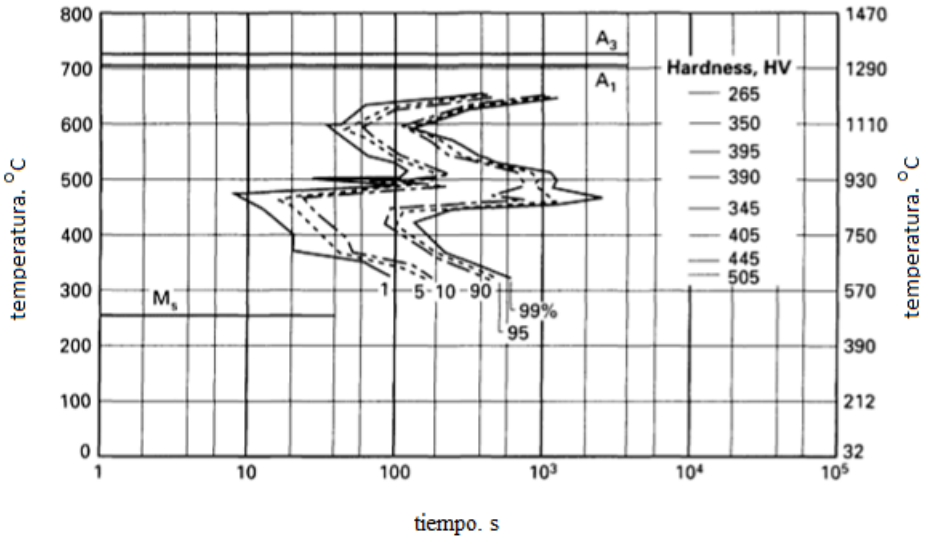


Figura 14. Diagrama IT para un acero con 0,39%C, 0,86%Mn, 0,72%Cr y 0,97% Ni.

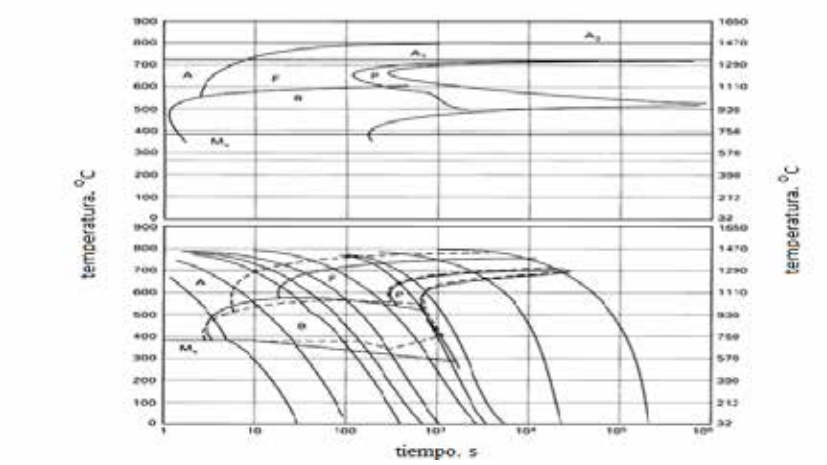


Figura 15. Diagrama IT (Superior) y CCT (Inferior) para un acero AISI 4130. Las líneas punteadas son calculados y las líneas solidas son experimentales.

Cada diagrama CCT contiene una familia de curvas que representan las diferentes velocidades de enfriamiento a diferentes profundidades de un cilindro de 300mm (12in) de diámetro. El enfriamiento más lento representa el centro del cilindro. Como se muestra en la figura 16 la velocidad de enfriamiento y la posición de la curva CCT depende del medio de enfriamiento (El agua siendo el medio de mayor velocidad, seguido por el aceite y luego el aire). Mientras más severo sea el medio de enfriamiento, más largos son los tiempos en los que se desplazan las curvas en forma de C. La temperatura de Ms no se ve afectado por esto.

Los diagramas de transformaciones no pueden ser utilizados para predecir la respuesta a historias térmicas que son muy diferentes de aquellas utilizadas para construir los diagramas. Por ejemplo, primero enfriar rápidamente un poco por encima de Ms y luego recalentarlo a una temperatura más alta va a dar una transformación más rápida que aquella mostrada en el diagrama IT porque la nucleación es altamente acelerada durante el enfriamiento introductorio. También se debe notar que los diagramas de transformación son sensibles al contenido exacto de elementos aleantes dentro del rango de composición permisible.

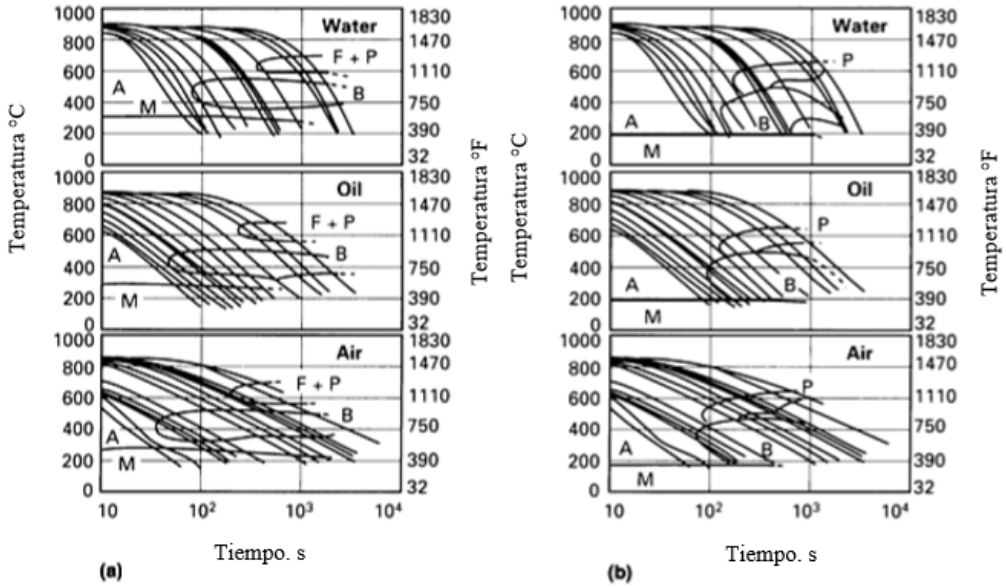


Figura 16. (a) Diagrama CCT de acero cromo-molibdeno usando curvas de enfriamientos simuladas. (b) Diagramas CCT de Níquel-Cromo con 0,77%C calculados en computadora.

2.2.4Simulación.

Debido al alto costo de la determinación de diagrama de transformaciones y a lo tedioso que puede llegar a ser, es de gran interés buscar métodos que faciliten los cálculos de estos. Un modelo computarizado efectivo puede permitir las formas exactas de las diferentes curvas discutidas anteriormente.

Los problemas asociados al desarrollar dichos programas involucran el cálculo del diagrama TTT y el cálculo del diagrama CCT de uno isotérmico. Como solventar el primer problema de los primeros principios por un metal dado es un trabajo arduo, correlaciones empíricas o procedimientos semiempíricos son utilizados. El segundo problema es mucho más fácil de manejar y se han aplicado diferentes medios para lidiar con él.

En los recientes años, el establecimiento de métodos basados en la descripción fenomenológica y simulación de procesos durante los tratamientos térmicos y el

desarrollo de software para planeamiento tecnológico han sido de un gran interés. El desarrollo de este tópico tiende a buscar los requerimientos de metalurgistas produciendo materiales básicos, ingenieros de diseño lidiando con selección de material y dimensionamiento, así como tecnologistas planeando procesos de tratamientos térmicos.

Para que una simulación funcione, y que proporcione características similares a lo que se busca en la realidad, debe regirse por ciertos parámetros que permitan aproximarse a dicha realidad. A continuación, se muestra el sistema que sigue un programa que predice el comportamiento de aceros de baja aleación (ver figura 17).

2.2.4.1 Modelos matemáticos.

El empleo de modelos matemáticos para simular los tratamientos térmicos es un método conveniente de predecir las propiedades de los tratamientos gracias al uso de computadoras cuya potencia permite realizar los cálculos necesarios en tiempo real. En la industria abundan procesos térmicos o termo – mecánicos durante los cuales se producen distorsiones difíciles de predecir y controlar. Las diferentes velocidades de enfriamiento ocasionadas a lo largo de la pieza durante el proceso producen una distribución de fases con volumen específico y propiedades mecánicas diferentes, que generan tensiones internas y dichas distorsiones. Incorporar la evolución microestructural a la simulación permitiría definir procesos industriales optimizados.

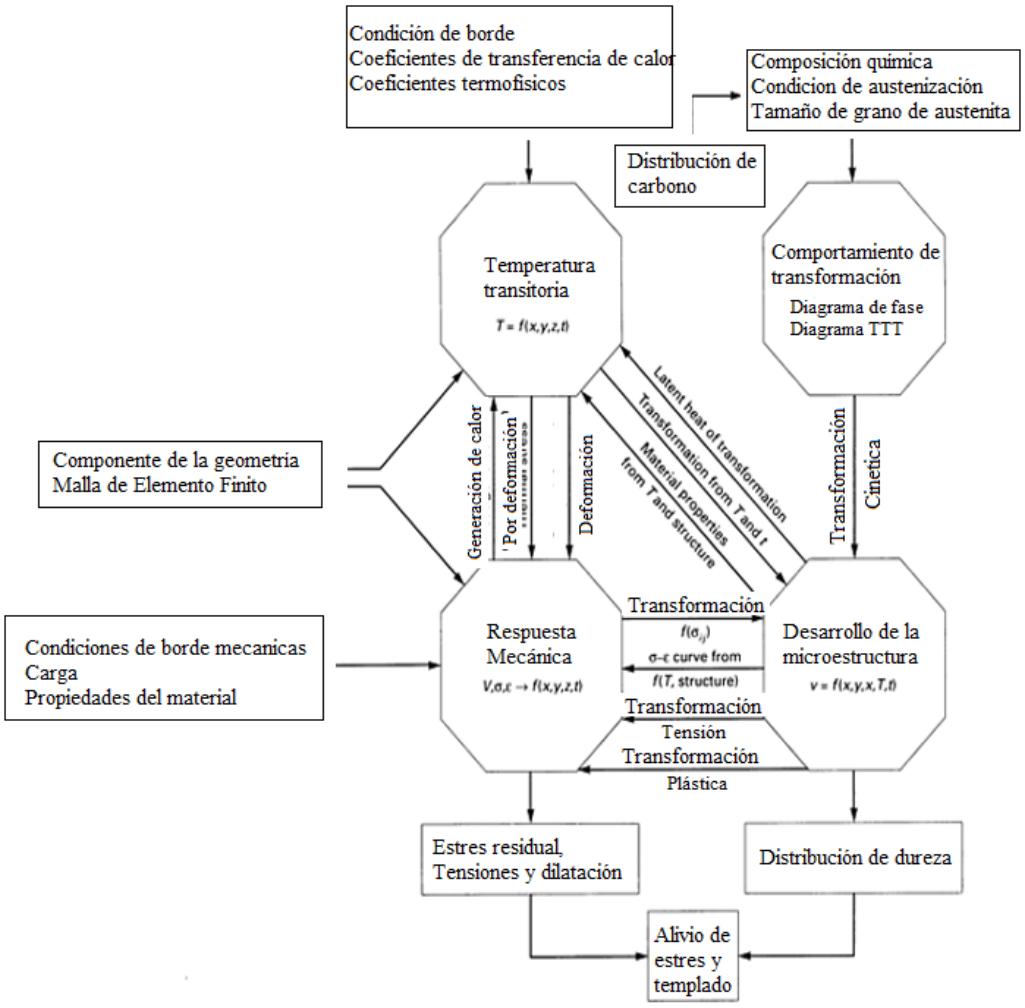


Figura 17. Sistema general de un programa para predecir el comportamiento termo mecánico de aceros de baja aleación.

Los tratamientos térmicos son procesos muy importantes a nivel industrial ya que permiten dar unas propiedades a los componentes imposibles de conseguir mediante otros procesos. Las propiedades finales de la pieza sometidas a estos tratamientos dependen de la composición del acero, su estado mecánico y de la historia térmica en cada punto de la pieza. El diseño y optimización de estos procesos requiere de pruebas

y ensayos cuyo coste se puede reducir de forma significativa si se realizan las pruebas de manera virtual. Una simulación mediante elementos finitos requiere acoplar en un mismo cálculo los campos térmicos, mecánicos y microestructurales; se debe disponer de modelos matemáticos que reproduzcan la realidad con exactitud y, además, de los parámetros correspondientes al material en estudio. Como bases para la simulación de tratamientos térmicos se han implementado diferentes modelos como: el modelo de Johnson -Mehl -Avrami – Kolmogorov (JMAK) para determinar la evolución de las transformaciones de fase gobernadas por la difusión y el modelo de Koistinen - Marburger para la transformación martensítica. Para obtener el tiempo de incubación de las transformaciones no isotérmicas y el crecimiento de las propias fases se ha utilizado la Regla de Adición. Los resultados que se han obtenidos hacen concluir que los modelos no siempre describen fielmente las transformaciones de fase. Generalmente, la Ferrita y la Perlita quedan bastante bien modeladas, sin embargo, para la Bainita, tanto el tiempo de incubación como la fracción transformada no quedan bien descritos.

La descomposición de la Austenita en las diferentes fases no se inicia inmediatamente al bajar la temperatura por debajo de su zona de estabilidad, es necesario un tiempo para que empiecen a formarse los núcleos de la nueva fase y empiecen a crecer; este periodo es la llamada etapa de incubación. En el momento en que éstos núcleos se han formado y han crecido lo suficiente para ser observados, que por convenio se ha tomado como el momento en que el volumen de la nueva fase alcanza el valor del 1%, termina la etapa de incubación y empieza la transformación, la (llamada etapa de crecimiento). El tiempo transcurrido en la etapa de incubación viene descrito por las curvas TTT en los procesos isotérmicos, y por las curvas CCT en los no isotérmicos. En aceros hipoeutectoides, la Austenita puede transformar mediante difusión en Ferrita, Perlita y Bainita, y por transformación no difusiva en Martensita.

Estas ecuaciones de JMAK precisan conocimiento previo de las curvas TTT. Para poder ser aplicadas a la simulación se deben utilizar los modelos matemáticos de estas. El modelo de Kirkaldy es uno de los diferentes modelos matemáticos existentes para determinar las curvas TTT mediante cálculos y se escogió este por tener claramente definidos las bases para los cálculos requeridos, además de que los parámetros empíricos pueden ser ajustados y controlados fácilmente.

Modelo de transformación de Kirkaldy: Un modelo de cálculo para la ferrita y perlita fue presentado inicialmente por Kirkaldy, siguiendo ecuaciones desarrollados por Zener y Hiller. Ese modelo inicial representaba la forma global de las curvas de enfriamiento sin diferenciar las regiones difusivas y no difusivas. Presentando una formula semiem

austenita a una temperatura dada (T). El modelo se extendió para incluir las curvas de enfriamiento de la perlita y de la bainita y también permitir un cálculo general de la cantidad de transformación como función de tiempo a cierta temperatura. Esto proporciono tres ecuaciones para la cantidad de transformación de ferrita ($_f$), perlita ($_p$) y bainita ($_B$).

$$_f = \frac{60.\%Mn+2.\%Ni+68.\%Cr+244.\%Mo}{6\ 2^{\frac{N}{8}}\ T^3 D_f}\ I \quad (2)$$

$$_P = \frac{1.8+5.4(\%Cr+\%Mo+4.\%Mo.\%Ni)}{6\ 2^{\frac{N}{8}}\ T^3 D_p}\ I \quad (3)$$

$$_B = \frac{(2.3+10\ \%C+4\ \%Cr+19\ \%Mo)\ 10^{-4}}{6\ 2^{\frac{N}{8}}\ T^2 e^{(-\frac{27500}{R\ T})}}\ I \quad (4)$$

Donde la cantidad de cada elemento está provisto en %peso. El término N asume la incubación transitoria, por tanto, para la superficie del grano, el tiempo del volumen transformado varía desde el tamaño hasta ¼ de este (debido a ello el término $2^{\frac{N}{8}}$). Entonces los parámetros críticos son el tamaño de grano, que debe ser conocido para cada caso, La temperatura de estabilización de las fases y un parámetro Df y Dp que se dan a continuación.

$$D_f = e^{\frac{-23500}{R\ T}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{D_p} = \frac{1}{e^{-\frac{27500}{R\,T}}} + \frac{0.5\ Mo}{e^{-\frac{37000}{R\,T}}} \tag{6}$$

El parámetro I al final de las ecuaciones es la fracción volumétrica integral.

$$I = \int_0^X \frac{dx}{x^{\frac{2(1-x)}{3}}(1-x)^{2x/3}} \tag{7}$$

Transformaciones difusivas. Ecuación JMAK: La ecuación JMAK, aplicable a las transformaciones difusivas isotermas, describe la evolución del volumen de fase transformada (V {t}) en función del tiempo mediante una función sigmoidal:

$$V\{t\} = 1 \quad e^{b(T)t^{n(T)}} \tag{8}$$

Donde b (T) y n (T) son parámetros que deben determinarse empíricamente a través de la curva TTT del material, este modelo funciona para la transformación de austenita para ferrita, perlita y bainita. Aunque para la Ferrita se toma el valor de n =1. De forma generalizada se puede establecer que:

$$n = \frac{\log[\frac{\ln(1-V_S)}{\ln(1-V_S)}]}{\log[\frac{t_S(T)}{t_f(T)}]} \tag{9}$$

$$b = \frac{-\ln(1-V_S)}{t_S(T)} \tag{10}$$

Los sufijos S y f indican inicio y final respectivamente. En los diagramas TTT V_s se toma como 1% y V_f 99%, pero cualquier otro porcentaje puede ser tomado. Las curvas en forma de C en estos diagramas al ser simulados, la computadora guarda el diagrama como una función spline. La curva de enfriamiento es aproximada a una escalera, cuyo cada escalón es igual a un paso de tiempo. La transformación de la fase es entonces calculada de manera isotérmica en cada escalón.

Como puede observarse a continuación (ver figura 18) el crecimiento de la fracción volumétrica transformada es función del tiempo, y para cada temperatura existe una curva diferente.

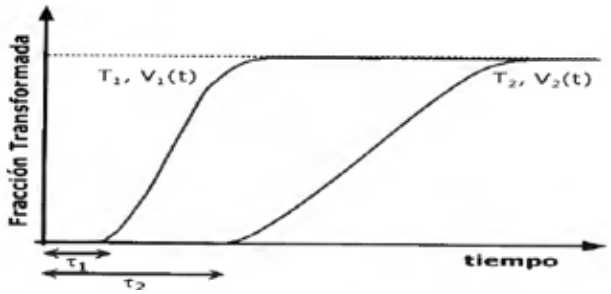


Figura 18. Representación de la ecuación JMAK (V {t}) en función del tiempo para dos (2) temperaturas diferentes (T1 y T2) y los tiempos de incubación para las dos (2) temperaturas (t1 y t2).

La curva TTT de un acero (ver figura 19), muestra precisamente el tiempo de inicio (tiempo de incubación, tiempo para el cual la transformación ha alcanzado el 1%) y de fin de la transformación (momento en que la transformación ha alcanzado el 99%) en los procesos isotérmicos. Conocida la TTT del material y operando con la misma ecuación JMAK se obtienen los parámetros b (T) y n (T) para cada temperatura.

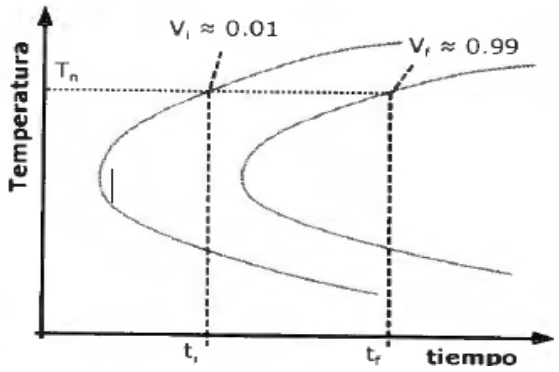


Figura 19. Curva TTT de un Acero. Se indican los tiempos ti y tf a una cierta temperatura Tn.

Transformación Martensítica: en el caso de la transformación martensítica, se ha utilizado el modelo de Koistinen - Marburger. En este modelo el volumen de Austenita transformado a martensita depende únicamente del grado de n

subenfriamiento a partir de la temperatura de inicio de la transformación martensítica (Ms).

$$Vm = 1 \quad e^{[-0{,}011(Ms-T)]} \tag{11}$$

Regla de Adición: Procesos no isotérmicos: en el caso de las transformaciones difusivas no isotérmicas se ha aplicado la Regla de Adición (o ley de Scheil). Esta consiste en una discretización de los procesos convirtiendo los no isotérmicos en múltiples procesos isotérmicos infinitesimales. De igual forma que para el proceso real, el cálculo de las transformaciones de fase también viene dividido en dos etapas: etapa de nucleación y etapa de crecimiento. Durante la etapa de nucleación se calcula el tiempo de incubación de cada una de las fases y en la etapa de crecimiento, el volumen transformado. La etapa de nucleación se rige por la ecuación (9); Regla de Adición para la nucleación. Si el periodo de incubación de una fase a temperatura Ti durante un proceso isotérmico es i^{TTT}, una muestra mantenida a esa temperatura durante un tiempo de ti segundos (ti $<$ i^{TTT}), completará una fracción del tiempo de incubación igual a $ti/\ i^{TTT}$.

En el momento en que la suma de todas esas fracciones sea igual a la unidad (1), la fase empezará a crecer, y se habrá cumplido el tiempo de incubación de la transformación no isotérmica (^{CCT}). Por ejemplo, si se inicia la descomposición de la Austenita. A partir de la TTT del material se obtendrán los valores de las i^{TTT} para las temperaturas de cada uno de los i incrementos (ver figura 20).

Aplicando la Regla de Adición al tiempo de incubación se obtiene un diagrama CCT teórico a partir de la TTT empírica. Durante la etapa de crecimiento la Regla de Adición se aplica de forma diferente. La transformación no isotérmica se describe como la suma de una serie de transformaciones isotérmicas y a cada transformación isotérmica le corresponde una curva JMAK. La fracción transformada para cada incremento de tiempo se calcula con la ecuación JMAK correspondiente a la temperatura en ese incremento de tiempo.

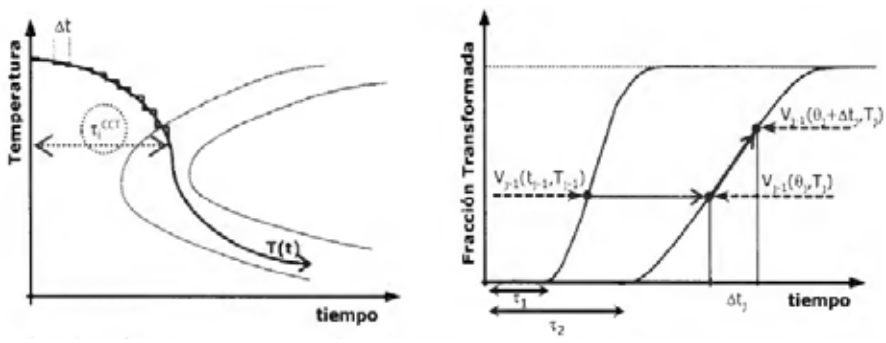


Figura 20. Aplicación de la Regla de Adición. Izquierda: tiempo de incubación de la transformación no isotérmica (Ti^{CCT}). Derecha: Crecimiento de las fases.

$$\int_0^{\tau^{CCT}} \frac{dt}{\tau^{TTT}} = 1 \; o \quad \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta t}{\tau i^{TTT}} = 1 \tag{12}$$

El funcionamiento de la Regla de Adición durante la etapa de crecimiento se puede observar en la figura anterior (Ver figura 20). Al inicio de cada incremento, j, se tiene una cierta fracción de volumen V_{j-1} igual a la correspondiente al final del incremento anterior, j-1. Asimismo, durante este incremento, la temperatura (Tj) es constante y le corresponde una curva de crecimiento isotermo de la fase $V_j(t, T_j)$. Se introduce entonces un tiempo virtual, θ_j (11), que corresponde al instante para el que, durante un proceso isotermo a temperatura Tj se tendría la fracción de volumen V_{j-1}, correspondiente al final del incremento anterior con temperatura T_{j-1}. Es decir $V_j(\theta_j, T_j) = V_{j-1}$. Se calcula a continuación la fracción de volumen, V_j correspondiente al instante $\theta_j + \Delta t_j$ según la ecuación $V_j(t, T_j)$. A saber, $V_j = V_j(\theta_j + \Delta t_j, T_j)$ ecuación (12); donde Δt_j es la duración del incremento j. Se partirá entonces de esta Vj para calcular el crecimiento en el siguiente incremento a T_{j+1} así sucesivamente hasta el final del proceso.

$$\theta_j = \left[\frac{\ln\left(1 - V_{i-1}^{j-1}\right)}{b}\right]^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

$$V_{i+1}^{j} = 1 \quad e^{-b\,(\theta_{j+1} + \Delta t_j)^n} \quad (14)$$

El Volumen de fracción transformada está normalizado a uno (1) de forma que la suma del volumen de todas las fases siempre dará uno (1). Ecuación. (14).

$$V_{Austenita} + V_{Ferrita} + V_{Perlita} + V_{Bainita} + V_{Martenita} = 1 \quad (15)$$

Volumen real de la Ferrita: los modelos presentados describen la evolución de la transformación, sin embargo en el Acero, existe un volumen máximo de Austenita susceptible de ser transformado en Ferrita proeutectoide y este valor viene dado por el diagrama de fases. Mediante el uso de una base de datos termodinámica se puede calcular el máximo de Ferrita proeutectoide correspondiente a la aleación concreta con la que se esté trabajando. No obstante, esto se puede simplificar utilizando el diagrama binario Fe - C para el cálculo de la máxima fracción de Austenita disponible para la transformación ferrítica y se calcula tal y como se indica en la figura 21.

Sabiendo la composición en Carbono del Acero (X%) y aplicando la Regla de la palanca, se obtendrá el volumen máximo de Austenita disponible para la transformación ferrítica (Ferrita proeutectoide, %). Para el caso de las mezclas Eutécticas, Perlita y Bainita, el volumen disponible es la fracción de volumen de Austenita aún no transformada.

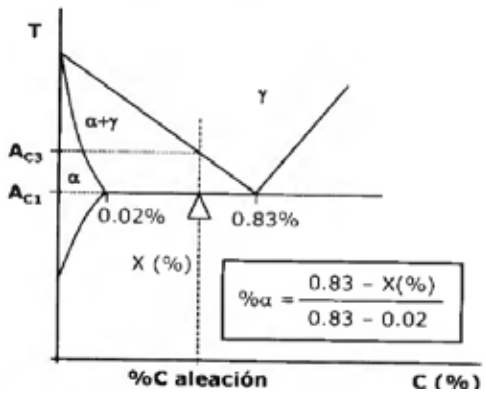


Figura 21. Diagrama esquemático para el cálculo de la máxima fracción disponible para la transformación ferrítica.

Para el cálculo de la distribución de temperaturas en una pieza, es necesario resolver la ecuación de conducción de calor para un régimen transitorio (ecuación 16) mediante un modelo de elementos finitos en 3D.

$$k \quad \left[\frac{\partial^2 T_{(x,y,z,t)}}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 T_{(x,y,z,t)}}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 T_{(x,y,z,t)}}{\partial^2 z^2}\right] = \rho \quad C_p \quad \frac{\partial T_{(x,y,z,t)}}{\partial t} \tag{16}$$

Donde k es la conductividad térmica, T la temperatura, ρ la densidad y C_p el calor específico del material. Otra ecuación necesaria para el cálculo de las temperaturas de las piezas es la de la condición de borde térmicas las cuales se dividen en temperatura, flujo de calor, transferencia de calor por convección, radiación externa y conbinada con convección externa y radiación. Al tratarse de un temple, la condición de borde requerida es la de transferencia de calor por convección (ecuación 17).

$$\begin{aligned} q &= \quad {}_f\left(T_w \quad T_f\right) + q_{rad} \\ &= \quad {}_{ext}\left(T_{ext} \quad T_w\right) \end{aligned} \tag{17}$$

Donde ${}_{ext}$ es el coeficiente de convección del medio, T_{ext} es la temperatura del medio, T_w es la temperatura de la superficie de la pieza y q_{rad} es el calor por radiación. Los valores de ${}_{ext}$ y T_{ext} son definidos por el usuario.

2.2.4.2Softwares de simulación.

Existen innumerables softwares de análisis de tratamientos térmicos y cada uno con finalidad diferente (ver tabla 4). Para facilitar la selección de los programas se pueden subdividir los programas de la siguiente manera:

· Programas de predicción de propiedades.

· Programas de planeación de procesos.

· Programas de selección de materiales y sus bases de datos.

· Programas para problemas técnicos y económicos especiales con relación a los tratamientos térmicos.

· Análisis de elementos finitos para el modelo de los efectos de la severidad de enfriamiento en la distorsión y control de partes dimensionales.

Claro cómo se quiere determinar en el trabajo de investigación son la predicción de propiedades, la lista de programas mencionados se reduce drásticamente. Aunque la mayoría de esos programas mencionados anteriormente funcionan y sirven el propósito de cierta manera de lo que se busca realizar, su accesibilidad es muy limitada y se examinaron otras opciones, las cuales incluyen:

SIMUFACT: una empresa de MSC Software, líder en soluciones de simulación de elementos finitos y experiencia en la industria metalúrgica que se ocupa de la formación de metales, soldadura y tratamiento térmico. SimuFact trabaja en conjunto con los fabricantes de maquinaria y centros de investigación, para ofrecer soluciones de simulación de última generación que hacen la diferencia en operaciones de los clientes. La visión de SimuFact es la de simular todo el proceso de manufactura incluyendo tratamientos térmicos, esfuerzos en herramentales, seguido de las operaciones de unión, soldadura y análisis estructural. Los principales componentes de formación de SimuFact:

· SimuFact Forming: modelización de la deformación de metales en el proceso de forjar y formar con la ayuda de sistemas de modelización informática.

· SimuFact Project: herramientas de simulación de gran alcance y altas capacidades de cómputo de acuerdo con las posibilidades de ayuda de la computadora se desarrollan modelos y procesos de fabricación. La fiabilidad y la estabilidad del programa ayuda a simular un gran número de variaciones. Todos los datos de producción requieren de una gestión de proyectos y de datos eficientes de gestión estructurado. Los resultados se registran en los registros y archivos.

· SimuFact Material: datos fiables sobre los materiales que se necesitan para obtener resultados precisos de simulación. Durante muchos años, repone la base de datos de SimuFact material, proporcionando una amplia gama de materiales y sus características. Además, el usuario tiene la capacidad de integrar sus propios datos, así como un acceso rápido y fácil a ellos. Pero SimuFact material es algo más que una base de datos. Proporciona la información necesaria para el análisis metalúrgico de metales.

En la etapa del proceso de transformación durante el tratamiento térmico se puede calcular proceso de recristalización (estática y dinámica). SimuFact material dirigido a los usuarios que necesitan información sobre la composición química y parámetros térmicos (densidad, elasticidad, etc.).

· SimuFact Forming die Analysis: programa de evaluación de la vida del producto y optimización de su herramental, detalla el análisis y comportamiento del herramental.

DANTE: DCT ha desarrollado programas de utilidad que apoyan al usuario para expandir o personalizar las bases de datos de materiales y procesos. Estas utilidades procesan datos de ensayos mecánicos y de dilatometría estándar para derivar los valores usados por DANTE. Además, los conjuntos de datos de transferencia de calor pueden derivarse fácilmente de datos medidos de tiempo - temperatura. Las utilidades de software incluyen:

· Herramienta para diseñar y optimizar las programaciones de procesos de carburación.

· Montaje de los parámetros del modelo cinético de transformación de fase a partir de datos de la dilatometría.

· Ajuste de los parámetros del modelo de cinética de transformación de fase a partir de datos TTT / CCT.

· Montaje de los parámetros mecánicos del modelo de los ensayos convencionales de tensión / compresión.

· Cálculo de Coeficientes de Transferencia de Calor desde el Tiempo Medido - Datos de Temperatura Generación de Diagrama de Fase TTT y CCT a partir de la Base de Datos DANTE.

· Predictor de la dureza de Jominy.

· Buscador de puntos para predecir la fase y la dureza de las curvas de refrigeración conocidas.

Aplicaciones prácticas: DANTE ha sido verificado para una amplia variedad de aplicaciones de tratamiento térmico complejo y real. Una herramienta de diseño

potente y versátil, proporciona información valiosa para sus pasos de proceso de tratamiento térmico. Las utilerías para el montaje y validación de datos, las herramientas de DANTE comprenden un conjunto de comandos que se utilizan para derivar constantes mecánicas, los parámetros de la cinética y el coeficiente de calor de transferencia de datos a partir de datos experimentales.

· MEC-FIT de DANTE determina las constantes mecánicas de velocidad y tensión controladas por temperatura y pruebas de compresión.

ANSYS: Es un sistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos, incluyendo las fases de preparación de la malla o meshing ejecución y postproceso. Este programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico. Lo cual le permite resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas.

El ANSYS Workbench es una plataforma del software donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas.

Tabla 4 Diferentes softwares para tratamiento térmico.

Software	Disponibilidad	Características.
Programas computarizados para el cálculo de procesos ocurriendo en tratamientos térmicos		
PREDIC & TECH	SACIT Steel Advisory Centre for Industrial Technologies, Hungary	Simula el enfriamiento, transformación de austenita en diferentes partes, realiza pruebas Jominy, etc.
AC3	Marathon Monitors Ltd., Great Britain	Modelo de templabilidad para predicción de la respuesta al

		enfriado en la microestructura de los aceros
CETIMSICLOP	Centre technique des Industries Mechaniques PROGETIM, France	Datos de bases para selección de aceros estructurales y calcula sus propiedades mecánicas
SteCal	Comline Engineering Software, Great Britain and ASM International	Calcula la respuesta y propiedades aceros de aleaciones bajas ante los tratamientos térmicos.
PREVERT	Creusott-Loire Industries, France	Calcula la microestructura y propiedades mecánicas de aceros enfriados y templados.

Tabla 4 (continuación) Diferentes softwares para tratamiento térmico.

CHAT	International Harvester Company, U.S.A.	Es un programa para selección de la mejor composición de aceros a ser usados en tratamientos térmicos.

2.3 Definición de Términos Básicos.

· Coeficiente de película: Es un coeficiente, representado habitualmente como h, que cuantifica la influencia de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección.

· Difusión: Es un proceso físico irreversible, en el que las partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando la entropía del sistema.

· Modelo JMAK: describe cómo los materiales se transforman desde una fase (estado de agregación de la materia) a otra a temperatura constante. En su concepción, fue

ideada para describir la cinética de los procesos de cristalización, partiendo de una fase líquida hasta una fase sólida cristalina.

· Modelo de Koistinen – Marburger: ecuaciones que describen las transformaciones instantáneas o no difusivas, como lo es la formación de Martensita.

· Regla de adición: Establece que si dos eventos A y B son mutuamente excluyentes la probabilidad de que uno u otro evento ocurra es igual a la suma de sus probabilidades.

· Maquinabilidad: es una propiedad de los materiales que permite comparar la facilidad con la que pueden ser mecanizados.

· Templabilidad: es la capacidad del Acero de formar Martensita a una velocidad de enfriamiento.

· Tenacidad: es la energía que absorbe un material, con las consecuentes deformaciones que el mismo adquiere, antes de romperse.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Según Arias (1999), el maco metodológico es el “conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas”, ya que en él se destacan todos los aspectos relativos a la metodología empleada en el presente trabajo investigativo como el tipo de investigación, la población y muestra tomados en cuenta

3.1 Tipo de investigación

Según Fidias Arias (2006), una investigación explicativa “se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto”, el trabajo de investigación se centra en realizar simulaciones el cual necesita implementar unas variables (causas) en función de producir ciertos resultados (efecto).

3.2Diseño de la investigación

Según Fidias Arias (2006) El diseño documental “Es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica en interpretación de los datos secundarios” de la investigación corresponde en parte documental, debido a la necesidad de investigar y estudiar los diferentes softwares de simulación y los modelos matemáticos aplicados.

Tambien es experimental porque según Fidias Arias (2006) “La investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un obeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estimulos o tratamiento, para observar los efectos o reacciones que producen.” Pues claro que al momento de realizar las simulaciones se tienen variables controladas y se busca obtener un resultado de dichas variables.

3.3Población y muestra

Según Tamayo y Tamayo, (1997), “La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” (p.114), lo cual para este estudio corresponde conceptualmente a la parte de materiales que involucra a los aceros de baja aleación 4XXX y 5XXX en la cual la investigación se encuentra dirigida.

Según Tamayo y Tamayo (1997), afirma que la muestra ¨es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico¨ (p.38), por lo que se considera que con la muestra propuesta se abarcan los requisitos para cumplir con los objetivos planteados y con los resultados que estos ensayos arrojen se podrá llegar a una conclusión. Se tomará en cuenta para la elaboración del proyecto una porción de la población antes referida, esto viene a ser, los aceros de baja aleación AISI 4027 por su bajo contenido de carbono y aleantes; AISI 4340 debido a la gran cantidad de elementos aleantes que posee y el AISI 5140 que es de los aceros de baja aleación más utilizados comercialmente.

3.4Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Este trabajo de investigación se fundamenta en el análisis documental como una de las técnicas de análisis de datos a aplicar, con lo cual, en primera instancia se obtendrán los datos necesarios de los documentos pertinentes, sean libros y publicaciones sobre los métodos de simulación computarizado de tratamientos térmicos.

3.5Fases de la metodología

FASE I: Seleccionar los programas capaces de realizar una simulación de tratamientos térmicos en aceros de baja aleación a utilizar.

El desarrollo de esta primera fase consistió en buscar los distintos programas, y analizarlos para seleccionar el programa según su accesibilidad, precio y facilidad de uso. Estos programas luego fueron utilizados en las fases siguientes de la investigación.

FASE II: Determinar mediante el modelo matemático las curvas TTT de los aceros de baja aleación seleccionados.

La fase II inició las pruebas de los aceros seleccionados en los softwares escogidos. Al aplicar el modelo matemático de Kirkaldy en dichos softwares, se obtuvo un diagrama de enfriamiento isotérmico el cual fue comparado con las establecidas por la USS.

FASE III: Obtener los diagramas de transformación CCT de los aceros de baja aleación seleccionados.

En esta tercera fase se procedió a obtener el diagrama de enfriamiento continuo implementando los modelos matemáticos de JMAK y la regla de la adición. Utilizando los programas anteriormente escogidos.

FASE IV: Analizar los porcentajes de transformación de fases en varios puntos de los aceros de baja aleación luego de ser sometidos al temple en agua.

Esta cuarta fase se presentó el núcleo del trabajo de investigación y con este se busca realizar la simulación del temple de los aceros escogidos y seleccionar tres nodos de estudios ubicados todos en el eje central de la probeta. El primer nodo está en la superficie de la pieza, otro se encuentra en el centro de la probeta y el ultimo a la mitad delos dos nombrados anteriormente.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En el presente capítulo se describirán las fases presentes en el capítulo III, en función de cumplir los objetivos establecidos cuya finalidad es realizar la simulación de Temple a aceros 4XXX y 5XXX., así como obtener las curvas de transformación isotérmica TTT y continua CCT mediante la implementación de los modelos matemáticos y elementos finitos en los programas de simulación. Para obtener los resultados se escogieron tres diferentes aceros pertenecientes a la familia anteriormente descrita. Estos son: El AISI 4027, el AISI 4340 y el AISI 5140.

4.1 Evaluar programas capaces de realizar una simulación de tratamientos térmicos en aceros de baja aleación.

La herramienta de simulación es esencial para el desarrollo de los modelos matemáticos descritos anteriormente para establecer las curvas TTT, CCT y realizar el enfriamiento de los aceros de baja aleación, lo cual permitió determinar las microestructuras presentes en los diferentes puntos de las piezas estudiadas.

Por ende para la selección del programa, se decidió seguir ciertos factores como la accesibilidad, precio y curva de aprendizaje. De entre los diferentes programas que se estudiaron se obtuvieron: Abaqus, Ansys, Dante, Matlab y SimuFact. Los demás programas que fueron nombrados como el PREDIC & TECH y AC3 no fueron tomados en consideración por su limitada accesibilidad y altos costos de adquisición.

Asimismo, el ABAQUS fue retirado por su dificultad de aprendizaje y la falta de conocimiento necesario para utilizar el programa de manera adecuada para ejecutar

los modelos matemáticos necesarios para el estudio realizado. El SIMUFACT por otro lado, si permitia realizar simulaciones, pero su accesibilidad al igual que los anteriormente mencionados es de difícil acceso, con requerimiento de licencia para su uso cuya compra estaba fuera del alcance monetario, debido a eso, también quedo descartado. El caso del Dante fue similar.

Entonces los programas que se decidieron utilizar fueron el Matlab y el ANSYS. Primordialmente porque ambos programas son altamente utilizados y accesibles. Asi como también presentan una interfaz fácil de entender y un sistema de ayuda que rectifica cualquier duda que se haya tenido. El Matlab presenta un interfaz sencillo y al ser un software de programación, permitió la implementación de los modelos matemáticos de manera sencilla y ordenada. Mientras que el ANSYS al ser un software de CAD, permitió realizar la simulación de elementos finitos de manera rápida y sin problemas.

4.2Obtener las curvas de enfriamiento isotérmico TTT de los aceros 4XXX y 5XXX a estudiar.

En este paso se utilizó únicamente el Matlab aplicando el modelo matemático de Kirkaldy el cual permitió la obtención de las curvas de transformaciones isotérmicas de los diferentes microconstituyentes, como está descrito en el capítulo 2 de la presente investigación (Ecuaciones 1, 2 y 3), aplicadas a cada uno de los tres aceros estudiados. Para ello se inició insertando las constantes necesarias para ejecutar las ecuaciones, las cuales se muestran a continuación en el programa del acero AISI 4027 en la figura 22.

Ya establecidas las constantes, el siguiente paso fue establecer las integrales que determinan las posiciones de las curvas y determinar el resultado de las ecuaciones de kirkaldy. Estas determinan las posiciones de la curva en el eje x (Figura 23) y las ecuaciones permiten obtener los tiempos de transformación a las diferentes temperaturas (figura 24).

```
R=8.31447; % Constante universal de los gases
N=7;%N es tamaño de grano.
C=0.26;% El % de carbono.
Mn=0.87;% El % de manganeso.
Cr=0;% El % de Cromo.
Si=0.15;% El % de Silicio.
Mo=0.26;% El % de Molubdeno.
Ni=0;% El % de niquel
%Una vez establecidas todas las constantes a utilizar. Se procede a
%introducir las temperaturas de estudio
Tp=670;%Temperatura de estabilización de Perlita
Tf=760;%Temperatura de estabilización de Ferrita
%Tb=830-270*C-90*Mn-37*Ni-70*Cr-83*Mo;
Tb=844-597.*C-63.*Mn-16.*Ni-78.*Cr;%Temperatura de estabilización de la Bainita
Ms=521-353.*C-24.3.*Mn-225.*Si-27.4.*Ni-17.7.*Cr-25.8.*Mo;%Temperatura de inicio de transformación de Martensita
Ti=860:-1:Ms;%Temperaturas de estudio
```

Figura 22. Constantes utilizadas en el modelo matemático de Kirkaldy.

```
% Integral a resolver para obtener las graficas.
%Se utilizo 0.01 en vez de 0 porque con 0 daba indeterminado
fun= @(x) 1./(x.^(2.*(1-x)./3).*(1-x).^(2.*x./3));
I=integral(fun,0.01,0.99);
I01=integral(fun,0.01,0.1);
I05=integral(fun,0.01,0.5);

taup=0;
tauf=0;
tauf01=0;
taub=0;
taub01=0;
```

Figura 23. Integral de la ecuación de Kirkaldy aplicada al programa del acero AISI 4027.

```
%Ecuacion para transformacion de austenita a Ferrita
Df=exp(-23500./(R.*Ti));
tauf=(60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*(Tf-(Ti)).^3.*Df).*I.*10.^5;
tauf01=(60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*(Tf-(Ti)).^3.*Df).*I01.*10^4;
%Ecuacion para la trasnformacion de Austenita a Perlita
sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)./(exp(-37000./(R.*Ti)));
Dp=sp.^-1;
taup=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I.*10.^6;
taup01=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I01*10^5;
taup05=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I05.*10.^5.5;
%Ecuacion para la transformacion de Austenita a Bainita
i=1;
while i<=length(Ti)
if Ti(i)<Tb
taub(i)=((2.33+10.*C+4.*Cr+19.*Mo).*10.^-4)./(6.*2.^(N./8).*(Tb-Ti(i)).^2.*exp(-27500./(R.*Ti(i)))).*I.*10.^6;
taub01(i)=((2.33+10.*C+4.*Cr+19.*Mo).*10.^-4)./(6.*2.^(N./8).*(Tb-Ti(i)).^2.*exp(-27500./(R.*Ti(i)))).*I01*10^5;
taub05(i)=((2.33+10.*C+4.*Cr+19.*Mo).*10.^-4)./(6.*2.^(N./8).*(Tb-Ti(i)).^2.*exp(-27500./(R.*Ti(i)))).*I05.*10.^5.5;
end
i=i+1;
end
```

Figura 24. Ecuación de Kirkaldy para la ferrita, perlita y bainita para el acero AISI 4027.

Las ecuaciones utilizadas en el programa tienen una diferencia clara con respecto a las originales de Kirkaldy y esta es que se multiplican por un factor elevado ya sea a la 6 o a la 5. La función de ese factor es para acomodar los tiempos de transformación que, al utilizar la ecuación normal, daban como resultados unos tiempos increíblemente bajos por una falla de precisión del modelo, con ese factor se adecuaron los tiempos de transformación con los vistos en las curvas USS. Ya establecidas las ecuaciones en el programa, se procedió finalmente a elaborar las curvas con los resultados de cada uno de las ecuaciones establecidas (Ver figura 25).

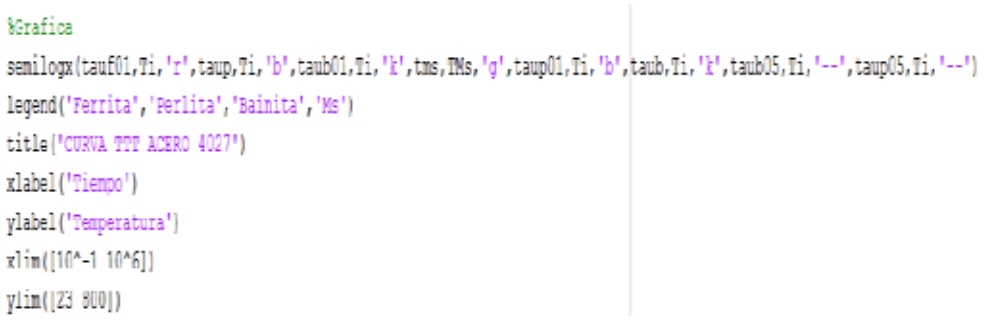


Figura 25. Formulación de las gráficas en el programa para el acero AISI 4027.

Con la función semilogx se logró obtener el diagrama semilogaritmico en el eje x. Leyend, Title, xlabel y ylabel permiten identificar tanto las curvas como el eje al observarse en el diagrama y xlim y ylim limitan el diagrama presentado al final. Ya establecidos esos parámetros se obtuvieron las siguientes gráficas para los diferentes aceros escogidos. Representados en las figuras 26 para el Acero AISI 4027, 28 Para el AISI 4340 y 30 para el AISI 5140. Cada uno con sus respectivas comparaciones con las curvas establecidas en la USS presentados en las figuras 27, 29 y 31.

Al realizar la comparación de la curva generada del acero 4027 con el modelo matemático (Figura 26) y la establecida por la USS (Figura 27). Se pudo observar una discrepancia en el área de transformación perlítica. A pesar de ello, el modelo matemático para esta curva presentó en mayor parte, las cualidades presentes en la curva establecida por la USS. El punto crítico de la formación bainítica se encuentra al 0,2s en el modelo matemático mientras que en la USS se encuentra cerca de los 0,5s. Asimismo las temperaturas en las que inician todas las transformaciones se encuentran entre 20 y 50°C de diferencia con respecto a la curva USS.

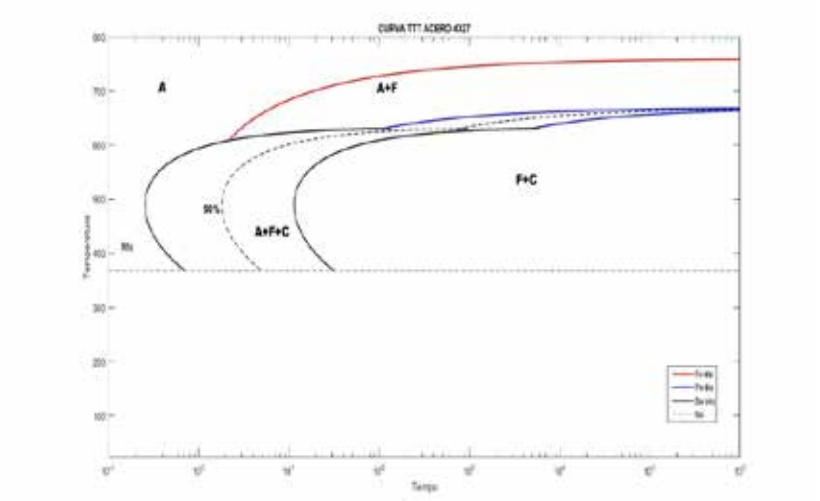


Figura 26. Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4027 formado por modelo matemático.

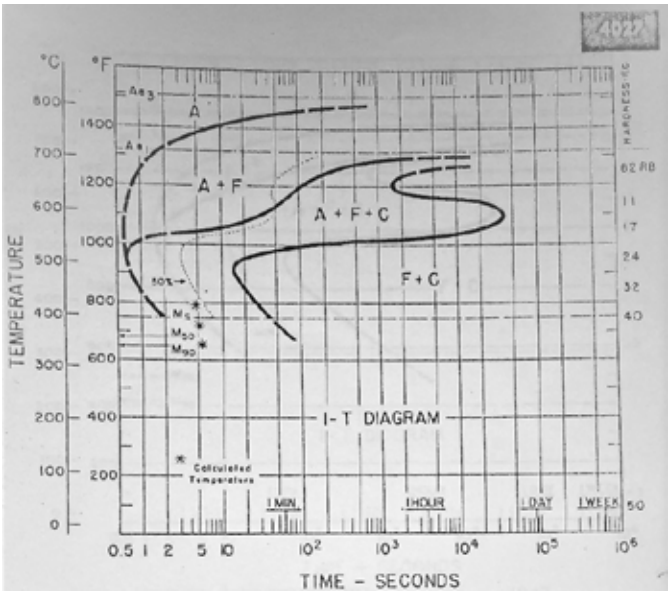


Figura 27. Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4027 de la USS.

.

Al igual que ocurrió con la curva anteriormente mostrada, en el acero 4360 se presentaron varias divergencias del modelo matemático con respecto a las establecidas con la USS. Mas notablemente el punto crítico que el programa mostro que ocurría a los 8 segundos y a una temperatura cercana a los 380°C, mientras que en la USS este punto se encuentra a los 12 segundos y a una temperatura de 400°C. También se notó que las temperaturas de estabilización de la fase perlítica bajo aproximadamente unos 60°C. El final de transformación según el modelo no ocurre a los 10^6 segundos e inclusive más allá como afirma la USS, sino que este tiene un pico a los 10^4 segundos. Todas estas divergencias se presentan porque el modelo matematico de Kirkaldy todavía no son exactos a esos de la realidad y deben seguir mejorando.

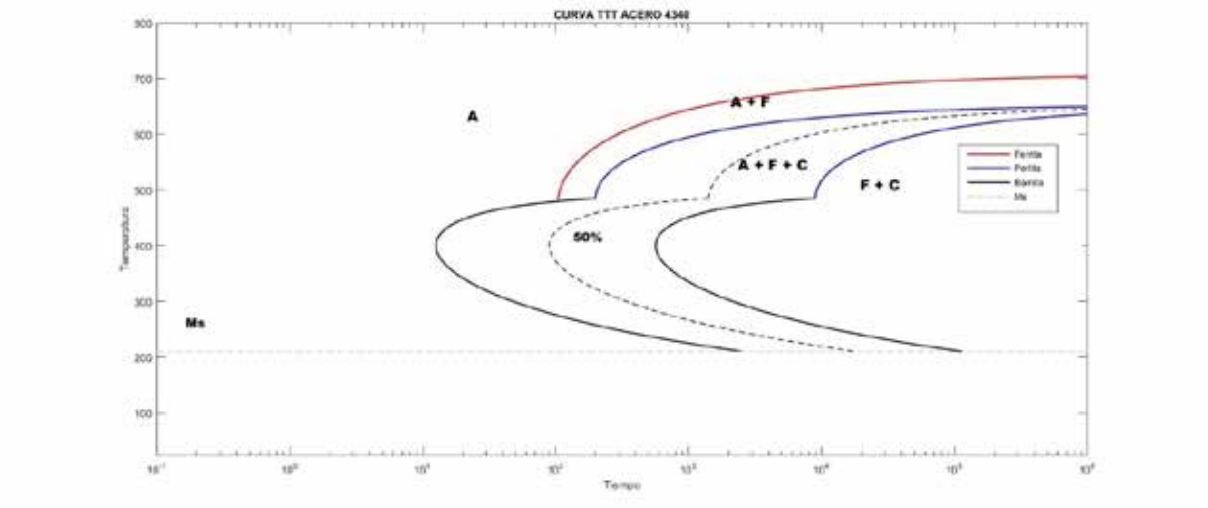


Figura 28. Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4340 siguiendo el modelo matemático.

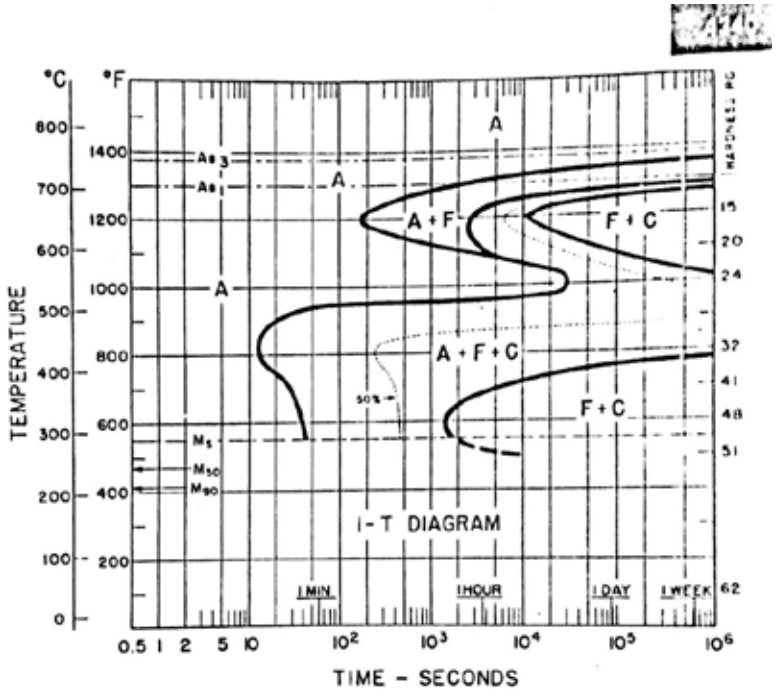


Figura 29. Curva de transformación isotérmica del acero AISI 4340 de la USS.

.

Ya estudiadas las dos curvas anteriores, se pudo estimar la correlación que iba a tener el modelo matemático de la curva restante con respecto a la curva presente en la USS. Terminando con una curva muy similar a la presentada en por la USS, pero, con consideraciones similares a las anteriores como las temperaturas de formación y la forma de la caída en el tiempo de transformación.

Teniendo ya los diagramas de transformación isotérmica según el modelo matemático, se utilizaron estos para determinar los diagramas CCT de los mismos aceros.

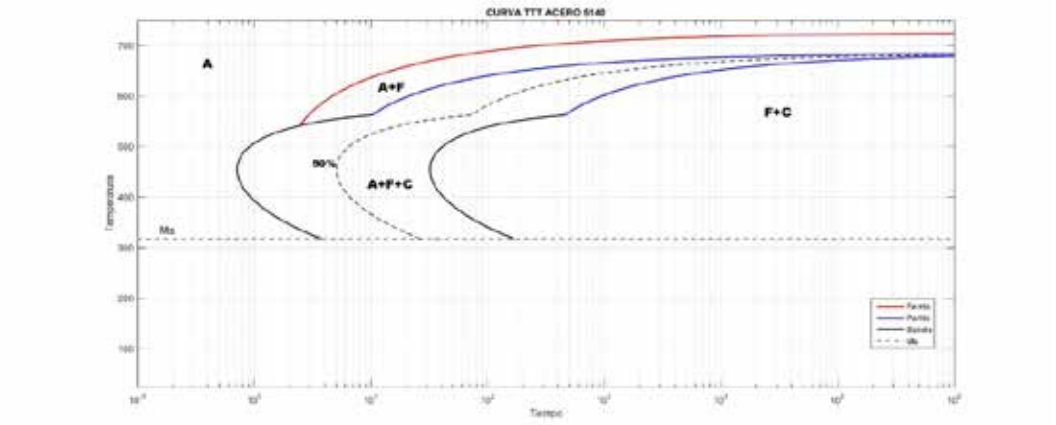


Figura 30. Curva de transformación isotérmica del acero AISI 5140 siguiendo el modelo matemático.

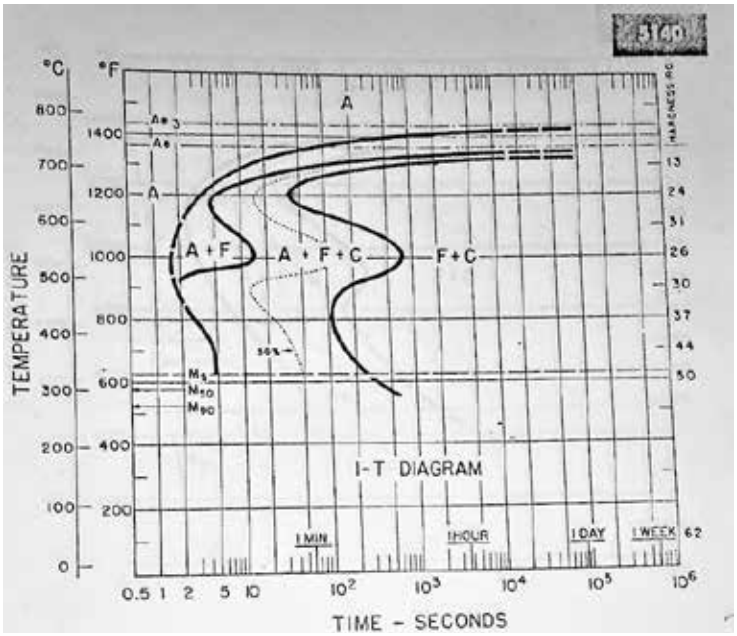


Figura 31. Curva de transformación isotérmica del acero AISI 5140 de la USS.

.

4.3 Determinar la curva CCT de los aceros estudiados utilizando el modelo matemático.

Al igual que con las curvas TTT, se realizaron los programas utilizando Matlab únicamente. Se tuvo un programa por acero estudiado. Asimismo, los programas iniciaron estableciendo las constantes necesarias para el estudio, las cuales se presentan en la tabla 5 de manera organizada y en la figura 32 como lo toma el programa.

Tabla 5. Propiedades de los elementos utilizados para el estudio.

Propiedades	Acero 5140	Acero 4340	Acero 4027
To(°C)	850	980	850
N(grano)	7,0	7,5	7,0
C	0,41	0,42	0,26
Mn	0,75	0,78	0,87
Cr	1,15	0,8	0,0
Si	0,15	0,0	0,15
Mo	0,0	0,33	0,26
Ni	0,0	1,79	0,0

```
%Datos de entrada al Programa
V=1: 1:700; %Velocidad de enfriamiento(°C/s) (Variable).
To=850; %Temperatura de inicio de estudio (T de Austenización) (Conocido).
N = 7; %Tamaño de Grano (Conocido).
C = 0.26; %Porcentaje de Carbono (Conocido).
Mn = 0.87; %Porcentaje de Manganeso (Conocido).
Cr=0;% El % de Cromo.
Si=0.15;% El % de Silicio.
Mo=0.26;% El % de Molubdeno.
Ni=0;% El % de niquel
R = 8.31447; %Constante Universal de los Gases(kJ/(kMol*K)(Conocido).
Tf = 670; %Temperatura de Estabilización de la Ferrita "Ar3" (Valor Tabulado HandBook ASM).
Tp = 760; %Temperatura de Estabilización de la Perlita "Ar1"(Valor Tabulado Handbook ASM).
%Tb=830-270.*C-90.*Mn-37.*Ni-70.*Cr-83.*Mo;
Tb=844-597.*C-63.*Mn-16.*Ni-78.*Cr;
TMs(1:length(V))=521-353.*C-24.3.*Mn; %Temperatura de inicio de la Martensita.
Voli = 0.01; %Volumen de transformación inicial de transformación de Austenita (Conocido).
Volf = 0.99; %Volumen de transformación final de la Austenita (Conocido).
%%Regla de la palanca para  determinar transformada de Ferrita
Ceq=(0.8-C)/(0.8-0.02);
```

Figura 32. Constantes utilizadas en el programa para realizar la curva CCT del acero 4027.

Una vez establecidos las constantes utilizadas, se procedió a elaborar el ciclo de estudio en la que se aplicó el modelo matemático. Para esto se utilizó un ciclo cuya finalidad es ofrecer los diferentes puntos en los que ocurren transformaciones a variadas velocidades de enfriamientos. Dentro de este ciclo se establecieron diferentes temperaturas de estudio dependiente de la velocidad en la que se encuentre. A partir de ello se aplicaron de nuevo las diferentes ecuaciones de Kirkaldy para los microconstituyentes presentes.

Teniendo los datos de transformación isotérmica, se pudo entonces proceder a realizar la regla de la adición (ecuación 11) para cada microconstituyente (figura 33) y con ello se aplicó la JMAK en los casos en los que se dio el tiempo de incubación, inicializando las constantes utilizadas para las diferentes velocidades de enfriamiento que se tuvieron (figura 34 y figura 35).

```
%Transformación de la Bainita
if T(i)<Tb
    %Regla de la adición de la bainita
    if Xb<=1
        FunXb=Dt(i)./TauB01(i);
        Xb=Xb+FunXb;
        Xib(i)=Xb;
```

Figura 33. Regla de la adición para la Bainita en el acero 4027.

```
else
    %Ecuación de JMAK de la Bainita
    if Xb<100 && Xb>=1
        tb(j)=Dt(i-1);%Tiempo en el que el inicia la transformación en Bainita
        Tbt(j)=T(i-1);%Temperatura en el que inicia la transformación en Bainita
        Xb=1000000000000000;
        h=i-1;
        Fib=0;% Porcentaje de transformada de Bainita
        Titajb=Dt(i);%Tiempo de transformación en JMAK
        nb=0;%Parametro n para la JMAK de la Bainita
        bb=0;%Parametro b para la JMAK de la Bainita
        AB(j)=0;
```

Figura 34. Inicialización de variables para la JMAK de la Bainita del acero AISI 4027.

Al igual que la fase anterior, se finalizó el programa al establecer las gráficas a realizar en su respectiva escala semilogarítmica con el comando semilogx. Igualmente, se estableció el título, se nombraron los ejes de tiempo y temperatura, se realizó la leyenda de las diferentes curvas presentes y se acotaron los ejes (Ver figura 36).

```
while h<=length(TauB01)
    if Fib<1
        %Parametros b y n de la Bainita
        nb(h)=(log((log(1-Voli))./(log(1-Volf))))./(log(TauB01(h)./TauB(h)));
        bb(h)= -((log(1-Voli))./(TauB01(h).^nb(h)));
        %Ecuación JMAK
        Fib=1-exp(-bb(h).*(Titajb+0.5).^nb(h));
        Titajb=((-log(1-Fib))/bb(h)).^(1./nb(h));
        %Guardando valor de transformada
        if AB(j)<Fib
            AB(j)=Fib;
            BB(j)=Titajb;
        end
    else if Fib>=0.99 && Fib<=10
            AB(j)=Fib;
            BB(j)=Titajb;
            Fib=1000000;
            tbf(j)=Dt(h-1);
            Tbtf(j)=T(h-1);
        end
    end
    h=h+1;
end
```

Figura 35. Ecuaciones de la JMAK para la Bainita del acero AISI 4027.

```
semilogx(tf,Tft,tp,Tpt,tb,Tbt,tm,TMs,tpf,Tptf)
legend('Ferrita','Perlita','Bainita','Ms')
title('CURVA CCT ACERO 4027')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Temperatura')
xlim([10^-1 10^6])
ylim([23 1200])
```

Figura 36. Comandos para graficar e identificar el diagrama TTT del acero AISI 4027.

Ya con el programa preparado, se pudo evaluar y graficar los resultados para los tres aceros de estudio presentadas en las figuras 37, 38 y 39.

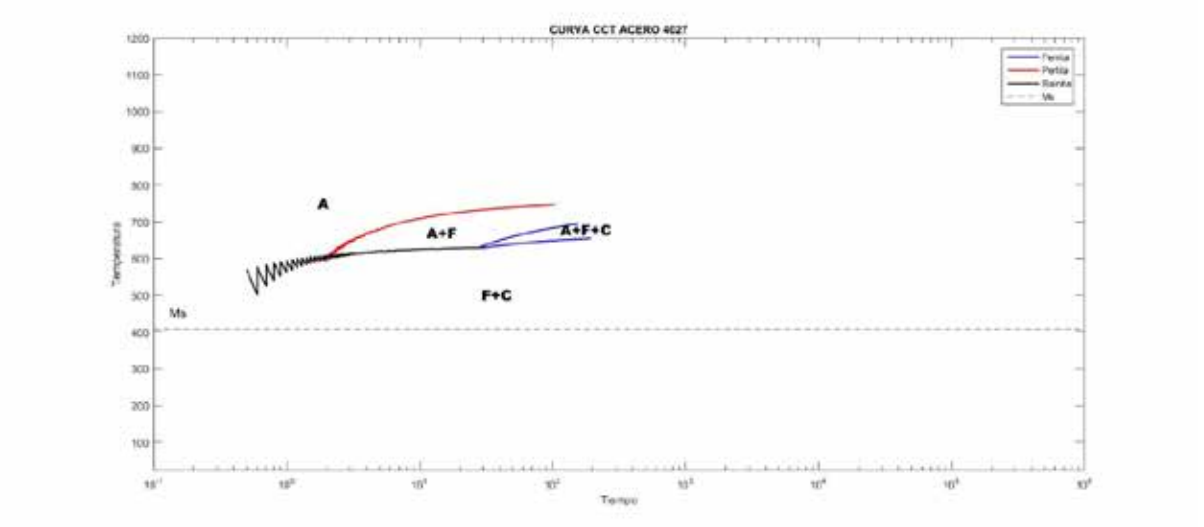


Figura 37. Diagrama CCT del acero AISI 4027 según el modelo matemático.

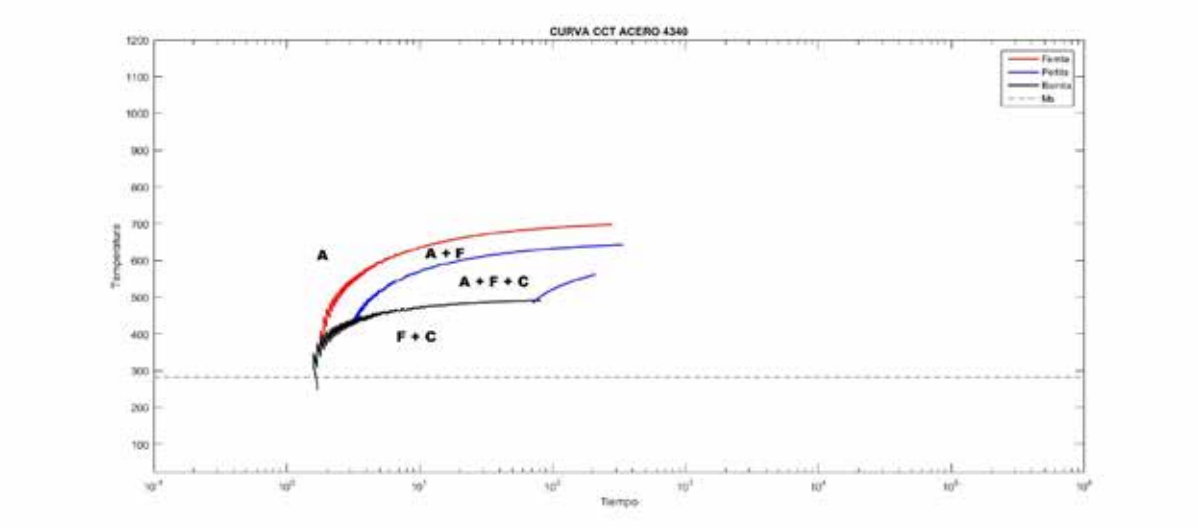


Figura 38. Diagrama CCT del acero AISI 4360 según el modelo matemático.

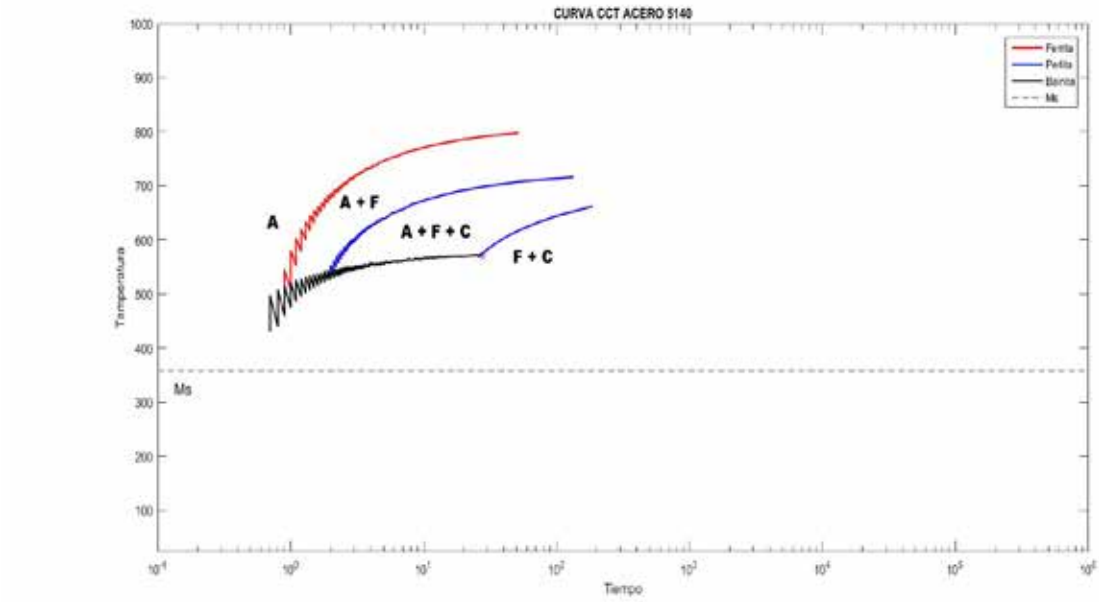


Figura 39. Diagrama CCT del acero AISI 4360 según el modelo matemático.

Se pudo observar que en todos los diagramas se produce una distorsión en los resultados cuando la velocidad de enfriamiento aumenta. Esto se debe a que las ecuaciones no toman en consideración las diferentes estructuras perlíticas y bainíticas (fina, mediana y gruesa) que pueden tomar los aceros durante el enfriamiento.

4.3 Determinar el porcentaje de volumen transformado de probetas simuladas.

En esta sección se utilizó el ANSYS para la obtención de las velocidades de enfriamiento a las cuales se someterá el estudio. Seleccionando diferentes puntos en una probeta Jominy sometida a un temple en agua completo.

Para ello se requirió el seguimiento de ciertos pasos, comenzando por los materiales de estudio con sus respectivas propiedades necesarias para realizar el estudio térmico (densidad, coeficiente de conducción y calor especifico) (Figura 40).

El segundo paso fueron las dimensiones de la piezza, el cual, como se especificó antes, fue una probeta cilíndrica con dimensiones de la Jominy establecidas en la tabla 6 junto con las condiciones de borde que requiere el programa para la simulación (Figura 41).

Tabla 6. Propiedades requeridas para la simulación en ANSYS.

Propiedad	Acero 5140	Acero 4027	Acero 4340
Densidad(Kg/m^3)	7870,0	7850,0	7850,0
Conductividad Térmica(W/(m*°K))	45,0	44,5	44,5
Calor específico(J/(kg*°C))	473,0	475,0	475,0
Diámetro de probeta(mm)	25,4	25,4	25,4
Longitud de probeta(mm)	101,6	101,6	101,6
Convectividad del medio(W/(m^2*°C))	1500,0	1500,0	1500,0
Temperatura del medio	22,0	22,0	22,0

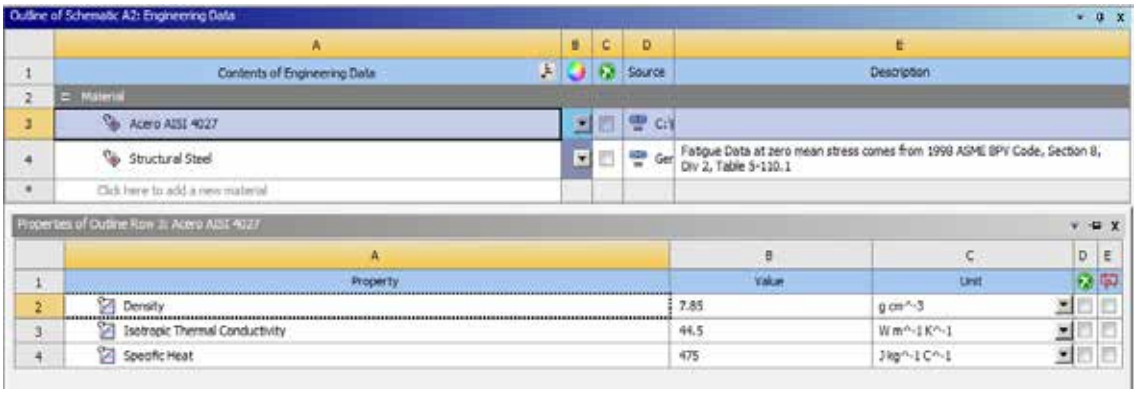


Figura 40. Propiedades térmicas para simulación del Acero AISI 4027.

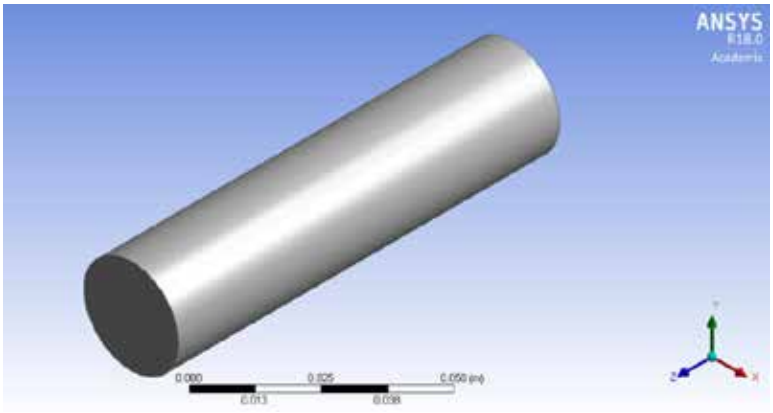


Figura 41. Probeta utilizada en las diferentes simulaciones.

Una vez establecido lo anteriormente mencionado, se pasó a realizar la simulación en sí, que consistió inicialmente en realizarle un mallado a la pieza (Figura 42), los cuales permitieron realizar el enfriamiento y observar los cambios de temperatura ocurriendo dentro de la misma pieza (Figura 43) al resolver la ecuación de calor (ecuación 16) que permite obtener las temperaturas de los nodos de estudio.

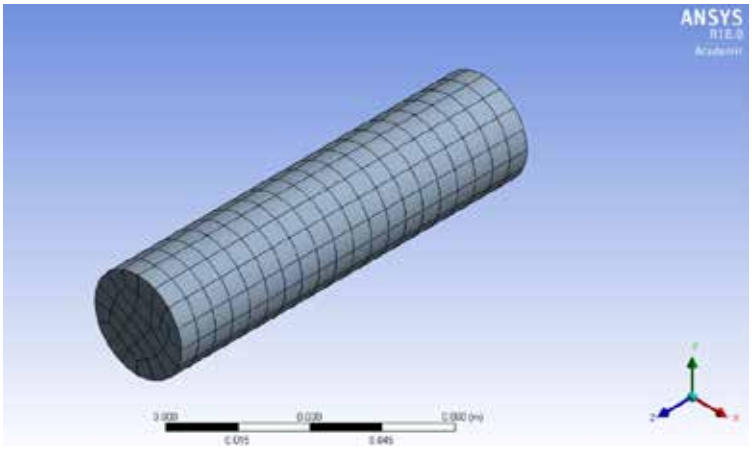


Figura 42. Malla de la probeta para la simulación.

Finalmente se establecieron las condiciones de borde de la probeta, las cuales fueron por convección (ecuación 17). Los valores requeridos fueron únicamente la

convectividad y temperatura del medio. Ya establecidos todo lo anteriormente nombrado, se procedió a realizarle el enfriamiento a la probeta escogiendo tres nodos en puntos diferentes entre sí con función de obtener diferentes velocidades de enfriamiento. En las figuras 44, 45 y 46 se muestran los nodos escogidos. Se seleccionaron los nodos en base a su ubicación. Los tres nodos se encontraron lo más cerca posible del eje central de la probeta, y se escogió uno en la superficie de la pieza, otro en el medio de esta y el ultimo en la mitad de los dos anteriormente mencionados.

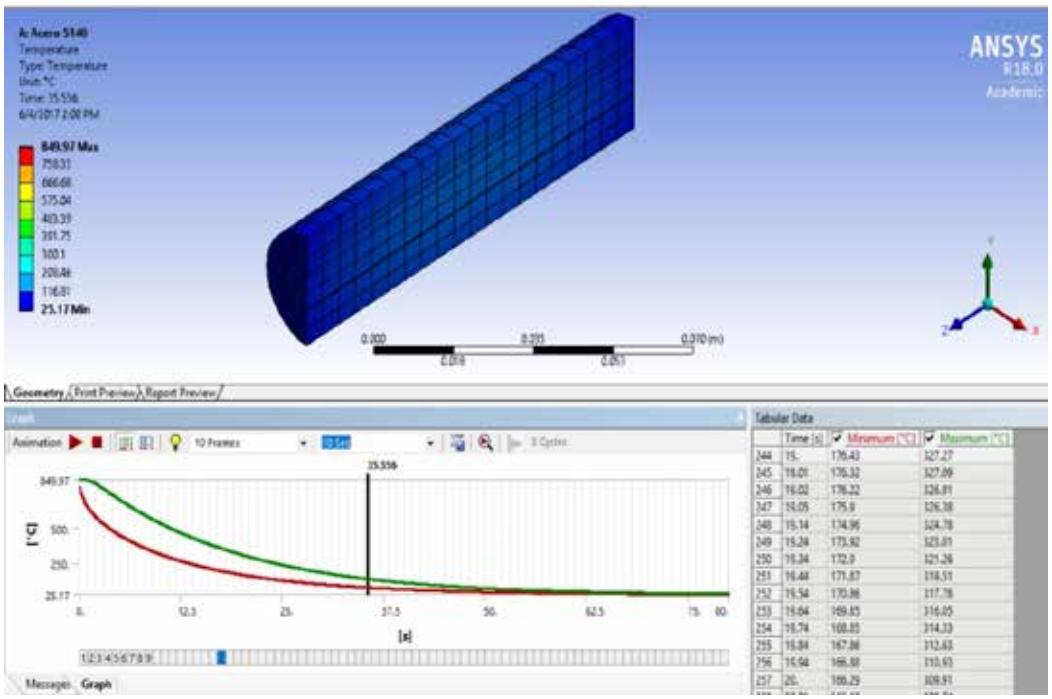


Figura 43. Simulación del enfriamiento de la pieza en ANSYS para el acero AISI 5140.

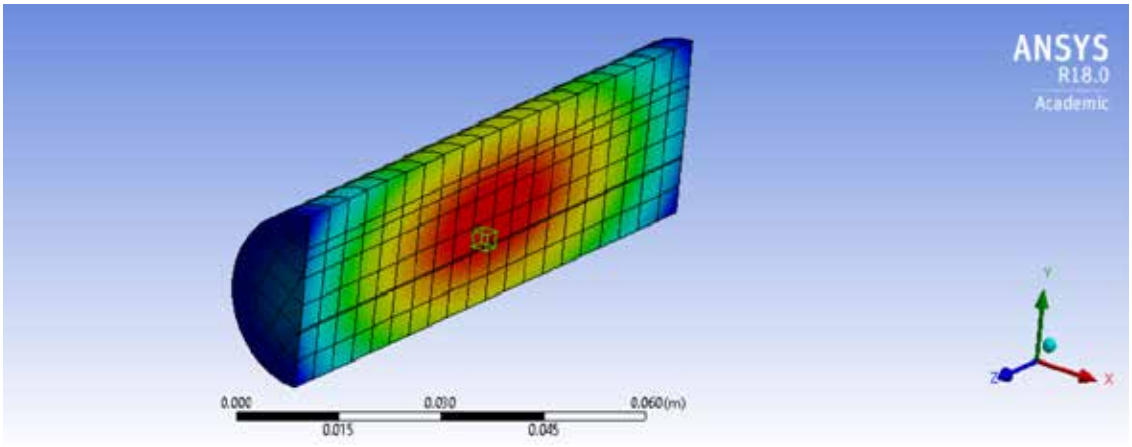


Figura 44. Nodo 11 del estudio del acero 5140.

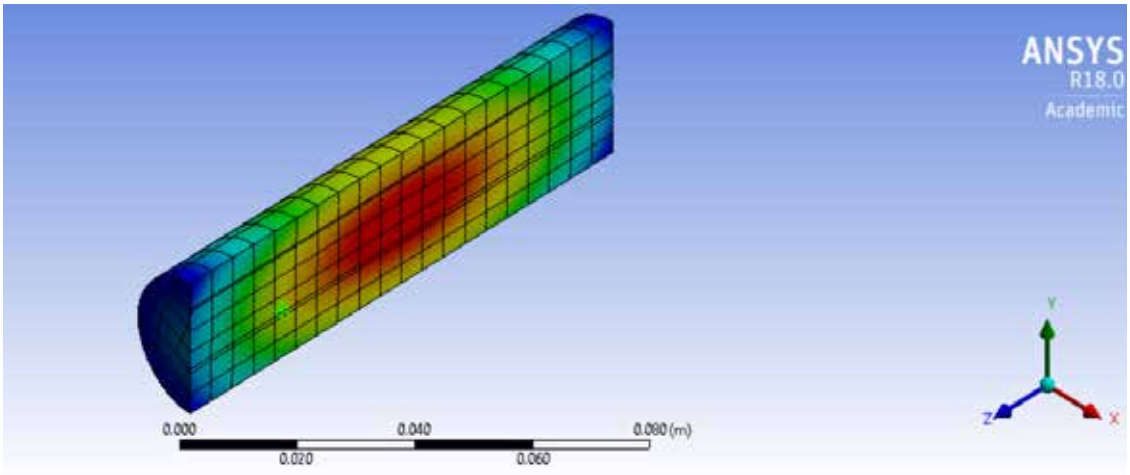


Figura 45. Nodo 16 del estudio del Acero AISI 5140.

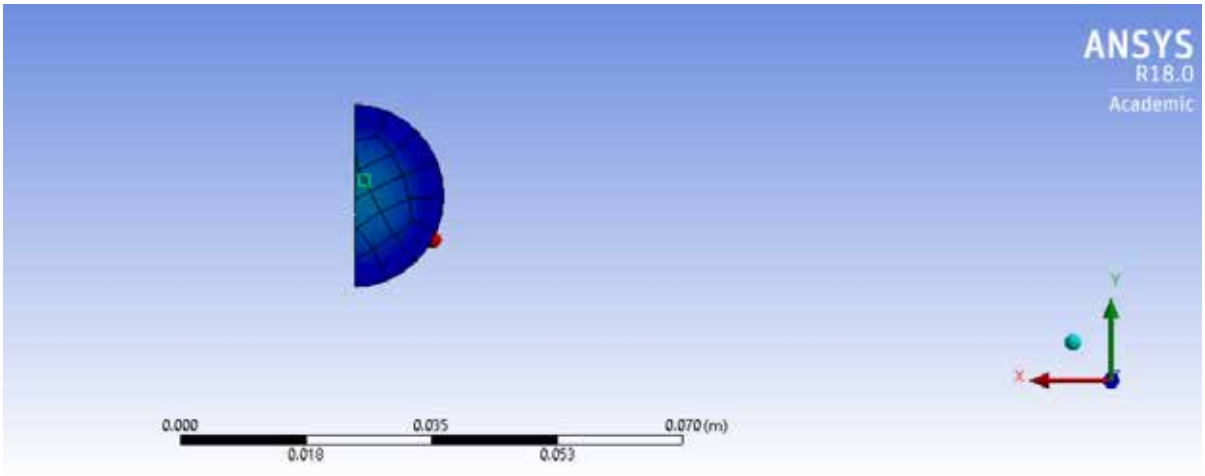


Figura 46. Nodo 2301del estudio del acero AISI 5140.

Con los puntos de estudios listos y sus respectivas temperaturas de enfriamiento tabulados (figura 47). Se pudo terminar de utilizar el ANSYS y proceder con la programación en Matlab. Como ya se tenía el programa de los diagramas CCT listos, se decidió utilizar estos como base para determinar las fracciones de volumen transformado, al tomar estas diferentes velocidades en forma de matrices y aplicarlas a las ecuaciones establecidas anteriormente. Para ello se insertan los valores de las temperaturas y tiempo en forma de matrices a partir del archivo proveniente del resultado de ANSYS (figura 48).

Los siguientes pasos involucran realizarles los mismos estudios aplicados en el programa de la CCT. Incluyendo las ecuaciones de Kirkaldy (1, 2, 3) y la JMAK (7). A cada uno de los nodos. Dando así los porcentajes de transformación de cada una de las fases en los que se encuentran sometidos los diferentes nodos de estudio.

Ya con los porcentajes de transformación, estos se graficaron (figuras 49, 50 y 51) y se tabularon (Tabla 6) para tomar en cuenta si de verdad tiene sentido los resultados que otorgaron.

	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	1.e-002	979.84	979.84
2	2.e-002	979.77	979.77
3	5.e-002	979.84	979.84
4	0.11721	979.97	979.97
5	0.21721	979.92	979.92
6	0.31721	979.75	979.75
7	0.41721	979.47	979.47
8	0.51721	979.03	979.03
9	0.61721	978.39	978.39
10	0.71721	977.48	977.48
11	0.81721	976.29	976.29
12	0.91721	974.8	974.8
13	1.	973.36	973.36
14	1.01	973.19	973.19
15	1.02	973.01	973.01
16	1.05	972.44	972.44
17	1.14	970.5	970.5
18	1.24	968.07	968.07
19	1.34	965.38	965.38
20	1.44	962.45	962.45
21	1.54	959.29	959.29
22	1.64	955.94	955.94
23	1.74	952.4	952.4
24	1.84	948.69	948.69
25	1.94	944.84	944.84
26	2.	942.48	942.48
27	2.01	942.08	942.08
28	2.02	941.69	941.69

Figura 47. Extracto del resultado de las temperaturas del nodo 16 del acero AISI 4340.

```
%Programa en base a la simulación
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Matríz de tiempo y temperatura de la simulación ACERO 5140 NODO 11
fileID=fopen('Nodo10A4340.txt');
A=textscan(fileID,'%f %f');
fclose(fileID);

%Matríz de tiempo y temperatura de la simulación ACERO 5140 NODO 2301
fileID1=fopen('Nodo2301A4340.txt');
B=textscan(fileID1,'%f %f');
fclose(fileID1);

%Matríz de tiempo y temperatura de la simulación ACERO 5140 NODO 661
fileID2=fopen('Nodo16A4340.txt');
E=textscan(fileID2,'%f %f');
fclose(fileID2);
```

Figura 48. Comandos para insertar los resultados de los diferentes nodos en el programa de la simulación.

Comenzando por el acero AISI 4027 visto en la figura 49. Se puede observar claramente que los nodos dentro de la pieza poseen velocidades de enfriamiento diferentes entre sí, lo que quiere decir que entre ellos existe una variación en la temperatura en diferentes puntos de la pieza en la misma instancia de tiempo.

Se pudo observar que, de los tres nodos, el 2301 que se encontraba en el borde de la pieza fue el que más rápido se enfrió y los nodos 10 y 16 que se encontraban en medio y a un cuarto de la longitud de esta, tuvieron una velocidad de enfriamiento más lenta, casi igual. Esto se debe a que el nodo exterior se le somete directamente la convección del agua mientras que los otros dos dependen únicamente de la conducción que ocurre dentro de la pieza y como el nodo 10 es el más cercano al centro de la pieza, es el que más tiempo tarda para enfriarse.

Tabla 7. Porcentaje de volumen transformado de los diferentes nodos de los aceros de estudio.

		% Ferrita	% Perlita	% Bainita	%Martensita	%Austenita
Acero 4027	Nodo 10	69,23	0,53	9,56	20,68	0
	Nodo 2301	69,23	0,73	0	30,04	0
	Nodo 16	69,23	0,53	8,86	21,37	0
Acero 4340	Nodo 10	48,72	3,13	2,1	46,05	0
	Nodo 2301	48,72	3,12	0	48,16	0
	Nodo 16	48,72	3,09	1,96	46,24	0
Acero 5140	Nodo 10	50	1,84	8,26	39,90	0
	Nodo 2301	50	2,21	0	47,79	0
	Nodo 16	50	2	7,60	40,40	0

Así como al observar los porcentajes de transformación, se notó que, en los tres nodos estudiados, dicho porcentaje varía una pequeña cantidad en comparación a los demás a pesar de existir una clara diferenciación en la velocidad de enfriamiento presente en el nodo 2301 con los nodos 10 y 16. Dado que a este se le somete un

enfriamiento más rápido, debería tener menor porcentaje de Perlita y Bainita, lo cual es el caso para el ultimo descrito, donde a pesar que claramente se observa en el diagrama que entra en la zona bainitica, este nodo no presentó transformación alguna, el segundo más cercano al borde presentó menos de un 1% de formación de bainita y el nodo del centro si obtuvo una transformación bainitica mayor.

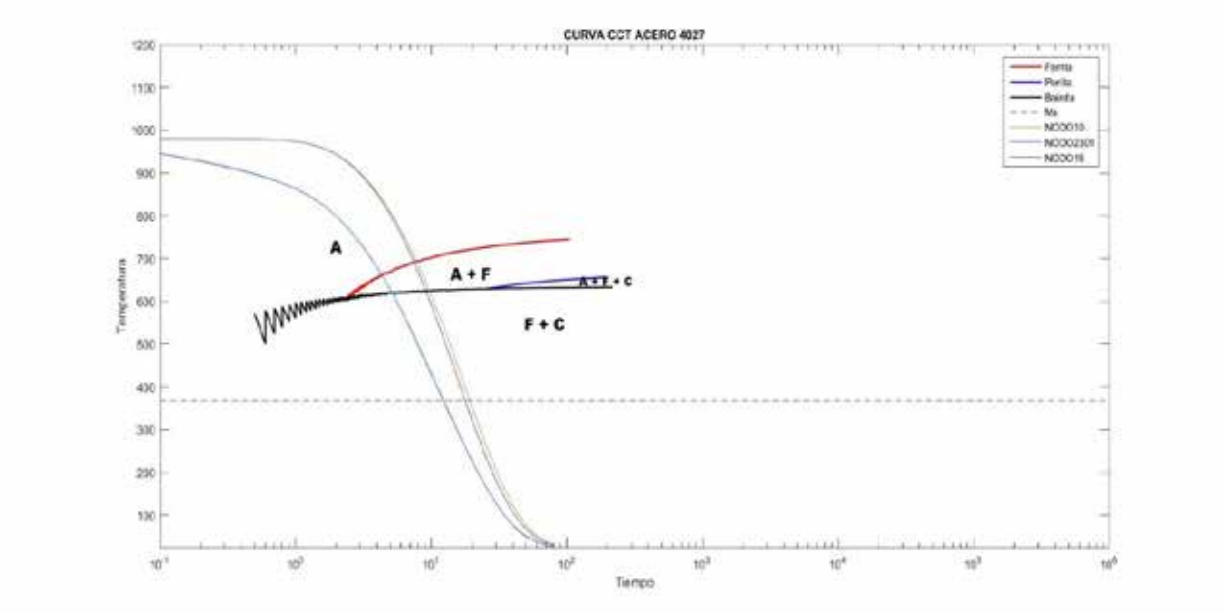


Figura 49. Diagrama CCT con curvas de enfriamiento de los nodos de estudio del acero AISI 4027.

Así como al observar los porcentajes de transformación, se notó que, en los tres nodos estudiados, dicho porcentaje varía una pequeña cantidad en comparación a los demás a pesar de existir una clara diferenciación en la velocidad de enfriamiento presente en el nodo 2301 con los nodos 10 y 16. Dado que a este se le somete un enfriamiento más rápido por presentarse en contacto directo con el agua, debe formar mayor cantidad de martensita, y por ende debería también presentar menor porcentaje de Perlita y Bainita, lo cual es el caso para el ultimo descrito, donde a pesar que

claramente se observa en el diagrama que entra en la zona bainitica, este nodo no presentó transformación alguna, el segundo más cercano al borde presentó menos de un 1% de formación de bainita y el nodo del centro si obtuvo una transformación bainitica mayor.

Con la formación de martensita ocurrió un sistema similar, los nodos que se encontraron dentro de la pieza, al enfriarse más lentamente, permitieron una mejor formación de otras fases, en especial la Bainita, disminuyendo así el porcentaje volumétrico que se terminó transformando en martensita, La pieza al ser Hipoeutectoide y al encontrarse más cercana a la nariz ferrítica (0,02% de carbono) que al punto eutectoide (0,8% de carbono), esta presentó una formación de ferrita hipoeutectodie elevada.

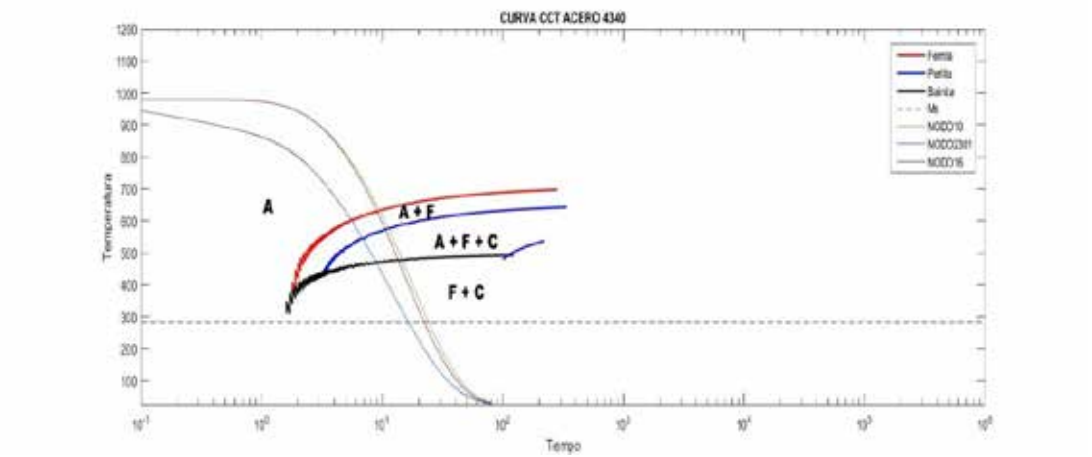


Figura 50. Diagrama CCT con curvas de enfriamiento de los nodos de estudio del acero AISI 4340.

Con la curva 4340 se presenta un caso similar al anterior, donde igualmente no se presenta Bainita en el nodo donde que se enfría más rápido y que las velocidades en general parecen ser iguales a las del acero anterior, claro que esto se debe a que los diferentes tipos de aceros comparten ciertas propiedades, incluyendo las que se

tomaron en cuenta como lo son la densidad, el calor especifico y la conductividad térmica.

Se pudo observar en la tabla 6 que las transformaciones varían con respecto al anterior diagrama, esto se debe a las propiedades que tienen los diferentes aleantes en la formación de estos microconstituyentes al momento de enfriar la pieza. Se forma al igual que antes un porcentaje de ferrita hipoeutectoide de 48,2% por tener un porcentaje mayor de carbono que el acero AISI 4027 y encontrarse más cerca al punto eutectoide . También se notó la disminución en general de la formación de Bainita en función de la martencita. Claro que comparando ambas graficas se sabe que es porque la velocidad critica para la formación de la Bainita se presenta en un tiempo mayor que en el acero anterior. Este tratamiento también presentó una formación de martensita más elevada que en el otro acero, debido a la presencia de una mayor cantidad de elementos aleantes que mejoran la templabilidad como puede ser visto en la tabla 5.

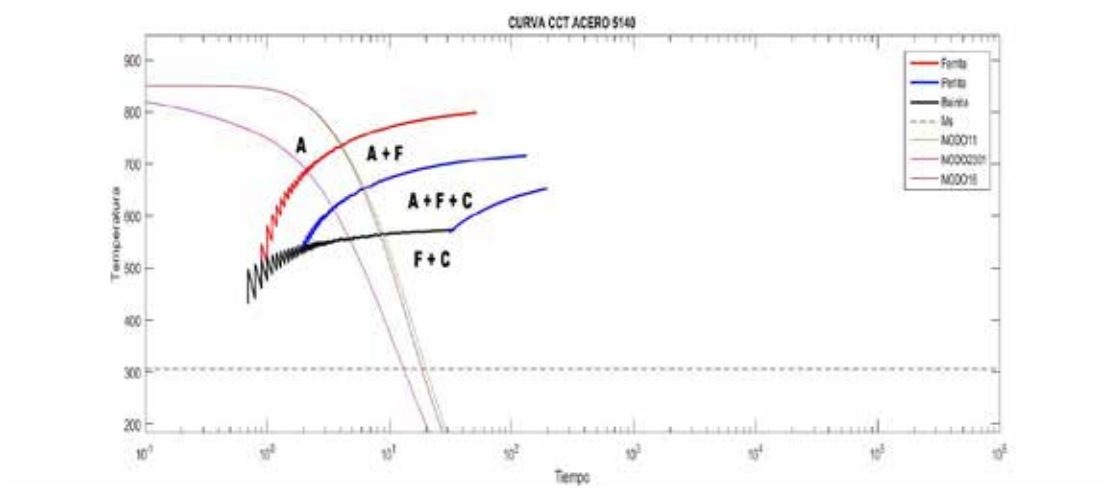


Figura 51. Diagrama CCT con curvas de enfriamiento de los nodos de estudio del acero AISI 5140.

Para el acero AISI 5140 se tiene una situación muy parecida a las dos anteriores, las velocidades de enfriamiento son prácticamente iguales por las propiedades

mencionadas anteriormente. El mayor cambio con los otros aceros viene dado por la formación de los microconstituyentes. En este caso se formó un 50% de ferrita hipoeutectoide para los tres nodos, un 39,9% de martensita en el nodo de enfriamiento más rápido y un 47,79% en el nodo 2301.

Conclusiones.

Una vez obtenidos los resultados. Se puede concluir que:

· Al realizar las simulaciones para la obtención del diagrama TTT. El modelo matemático aplicado presentó una similitud entre el mismo y el USS en la forma de las curvas y de las temperaturas críticas de temple y grandes diferencias con respecto a los tiempos de transformación, requiriendo de un factor para ajustar los tiempos.

· Al no considerar diferentes formas de la Bainita y la Perlita (Fina, media y gruesa). La regla de la adición presentó grandes distorsiones a las velocidades más rápidas de enfriamiento durante la formación del diagrama CCT.

· Se comprobó que al cambiar las cantidades de aleantes presentes en los aceros, las curvas de transformación tanto TTT como CCT presentaron variaciones entre los diferentes estudios. Lo que confirma lo descrito en las bases teóricas que especifican que al aumentar la cantidad de elementos aleantes de un acero, se mejora su templabilidad.

· Los porcentajes de transformados tiene una gran concordancia a la realidad, afirmando que los puntos donde el acero se enfría de manera más rápida presentan una mayor cantidad de martensita que de otros microconstituyentes. A demás de afirmar también que al variar las composiciones de los elementos aleantes, se producen diferentes porcentajes de transformaciones de los microconstituyentes.

· Los softwares Matlab y Ansys, al ser una herramienta de programación y de CAD respectivamente. Proporcionaron un gran método para insertar y modificar los modelos matemáticos utilizados y realizar el estudio de elementos finitos requeridos para la simulación.

· Para finalizar se concluye que los objetivos establecidos fueron cumplidos satisfactoriamente, así como la pregunta planteada en la formulación del problema fue respondida en los resultados del capítulo IV.

Recomendaciones.

· Utilizar una computadora con buenas capacidades tanto graficas como de procesador permitiendo que los softwares usados trabajen a un mejor potencial y proporcionando unos resultados más detallados con las simulaciones.

· Los programas son abiertos a cambios. Al utilizarlos se pueden probar diferentes aceros a los planteados en este trabajo de grado, además de probar otros medios de enfriamiento como aire o sales.

· Existen diversos modelos capaces de predecir los diagramas de transformación TTT. Es posible estudiar las diferencias que existen entre las diferentes ecuaciones y compararlas todas con los diagramas establecidos.

· La temática aplicada en este trabajo de grado puede ser incluida como una unidad para la asignatura de Materiales en la Universidad José Antonio Páez. En función de ayudar a los estudiantes a un mejor entendimiento de lo que ocurre en los aceros en el momento que se les realiza los tratamientos térmicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. L. Cervo, P.A. Bervian (1980) **Metodología Científica.** 1ª edición, Editorial McGraw-Hill, Bogotá, Colombia ISBN 968-451-003-9.

American Society for Metals International (1991). **ASM Handbook, Heat Ttreating.** Volumen 04, Estados Unidos, ASM, ISBN 0-87170-379-3

Arias Fidias (1999) **El proyecto de la investigación. Guía para su elaboración.** 1ª Edición. Editorial Episteme, C.A. Caracas, República Bolivariana de Venezuela, ISBN 980-07-9868-1.

Arias Fidias (2006) **El proyecto de la investigación. Introducción a la metodología científica.** 5ª Edición. Editorial Episteme, C.A. Caracas, República Bolivariana de Venezuela, ISBN 980-07-8529-9.

Blanco Francisco, (Sin fecha), **Tema 1. Curvas TTT.** Oviedo, España. Disponible en web <http://www6.uniovi.es.>

Blanco Francisco, (Sin fecha), **Tema 1. Tratamientos Aceros.** Oviedo, España. Disponible en web: <http://www6.uniovi.es.>

Gimenez María, Lionet Alberto, Riera María, Prado José. **Simulación de un Tratamiento Térmico mediante Elementos Finitos**. Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería metalúrgica, Universidad Politécnica de Cataluña-Cataluña, España.

John Hollomon, Leonard Jaffe. (1947). **Ferrous Metallurgical Design. Design Principles for Fully Hardened Steel.** 1era edición, John Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos.

Tamayo y Tamayo, Mario. (1997) **El Proceso de la Investigación científica**. Editorial Limusa S.A. México.

United States Steel (1961). **Atlas of Isothermal Transformation Diagrams**. Edición. Editorial ADUCO. Pittsburgh, Estados Unidos.

ANEXO A.

Codificación de los programas para elaborar los diagramas TTT

A continuación, se mostrarán los diferentes programas con la codificación utilizada para la obtención final de los resultados establecidos.

Figura A-1. Codigo de Matlab completo para obtención del diagrama TTT del Acero 4027.

Figura A-1. Codigo de Matlab completo para obtención del diagrama TTT del Acero 4340.

Figura A-1. Codigo de Matlab completo para obtención del diagrama TTT del Acero 5140.

ANEXO B

Código para la elaboración de los diagramas CCT completos en Matlab.

Figura A-1. Codigo de Matlab completo para obtención del diagrama CCT del Acero 4027.

Figura A-1. Codigo de Matlab completo para obtención del diagrama CCT del Acero 4340.

Figura A-1. Codigo de Matlab completo para obtención del diagrama CCT del Acero 5140.

ANEXO C

Código de elaboración del estudio volumétrico completo en Matlab.

Figura C-1. Codigo de Matlab completo para obtención de volumen transformado de los nodos de estudio del acero 4027.

Figura C-1. Codigo de Matlab completo para obtención de volumen transformado de los nodos de estudio del acero 4340.

Figura C-1. Codigo de Matlab completo para obtención de volumen transformado de los nodos de estudio del acero 5140.