



**OBTENCIÓN DE LAS CURVAS TTT
EN ACEROS HIPEREUTECTOIDES
MEDIANTE UN PROCESO DE SIMULACIÓN
POR MATLAB**

Autores:

Trujillo L. Anibal M.

C.I.: 24.661.940

Urb. Yuma II, Calle N° 3, Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (Máster) - Fax: (0241) 8712394



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

**OBTENCIÓN DE LAS CURVAS TTT EN ACEROS
HIPEREUTECTOIDES
MEDIANTE UN PROCESO DE SIMULACIÓN POR MATLAB**

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

INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Trujillo L. Anibal M.

C.I.: 24.661.940

Tutor: Ing. Romanello. Donato.

C.I.:4.131.877

San Diego, Junio de 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-TG-2017-1CR-074

Valencia, 13 de Enero de 2017.

Ciudadano:
Trujillo Anibal
C.I. 24.661.940
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2017 de fecha 13/01/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "OBTENCIÓN DE LAS CURVAS TTT EN ACEROS HIPEREUTECTOIDES MEDIANTE UN PROCESO DE SIMULACIÓN POR MATLAB." presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

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

Atentamente,


Prof. Mariene Zúñiga
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 Anibal Trujillo, portador de la cedula de identidad N° 24.661.940 titulado **OBTENCIÓN DE LAS CURVAS TTT EN ACEROS HIPEREUTECTOIDES MEDIANTE UN PROCESO DE SIMULACIÓN POR MATLAB**, 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 los Nueve días del Mes de Junio del año dos mil diecisiete.


Ing. Donato . Romanello .
C.I.: 4.131.877



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

**OBTENCIÓN DE LAS CURVAS TTT EN ACEROS
HIPEREUTECTOIDES MEDIANTE UN PROCESO DE
SIMULACIÓN POR MATLAB.**

Autores: Trujillo L. Anibal M.

Tutor: Romanello. Donato.

Fecha: Junio 2017

RESUMEN INFORMATIVO

En este trabajo se realizó una simulación computarizada mediante la aplicación de ecuaciones para representar las curvas TTT a los aceros hipereutectoides con la finalidad de determinar dichas curvas de forma computacional para luego compararlas con los diagramas TTT reales de dichos aceros y ver que tan parecidas son unas con respecto a las otras. Con la intención de contar con una herramienta la cual ayude a predecir estos comportamientos sin la necesidad de requerir estrictamente de los ensayos de laboratorio que se requieren, para lo cual se selecciona el modelo de Kirkaldy y se realizó la simulación en el programa MATLAB para la obtención de las curvas TTT y luego fueron comparadas con las curvas experimentales realizadas por la United States of Steels (USS).

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, primeramente a Dios, por darme la vida y ser mi guía a través del sendero que he caminado, por no abandonarme y siempre estar a mi lado, dándome su apoyo en los buenos y malos momentos, siendo mi escudo en situaciones adversas y apoyo en momentos de retos en los cuales he conocido el éxito y fracaso, pero siempre con las ganas de seguir adelante bajo su amparo y poder cumplir esta meta.

Agradezco en especial a mi madre, Milagro Lara, a mis tíos Ernesto Lara, Cecilia Arellano, Vicente Macaluso, Lidia Lara y Carlos Madriz, que más que tíos han sido también unos padres más que Dios me dio el privilegio de tener, a mi padre Pablo Trujillo y a mis primos Miguel Lara y Hector Lara, que más que primos han sido mis hermanos, que siempre creyeron en mí, me dieron su apoyo y nunca dudaron que podría alcanzar una meta tan importante en mi vida; por sus consejos y enseñanzas que de una u otra forma ayudaron a mi crecimiento personal.

A mis compañeros de clases, amigos y ahora colegas que de una u otra forma ayudaron en mi formación académica, personal y profesional, brindando momentos que recordare por siempre, de risas y de llanto, que más que amigos y colegas, considero ahora parte de mi familia. En especial a Paola Giancarli, Miguel Salas, Daniela Villamizar, Mariano Pérez, Miguel Jesús Castellano, Miguel José Castellano y Eduardo Rodríguez.

A mi tutor académico Ing. Donato Romanello quien me orientó, aconsejó y ayudó en la elaboración de este proyecto tan importante.

A mis profesores a lo largo de la carrera que me ayudaron en el crecimiento no solo académico sino también en el crecimiento personal y profesional, en especial a los Ingenieros Franklin Camejo, Giovanni Pizzella, Gruber Caraballo y Ángel Pérez.

Así mismo, a la Universidad José Antonio Páez y su personal que impartieron en mí un sin número de conocimientos y experiencias, en especial a Dayana Escobar, una amiga sin igual que me brindo su apoyo a lo largo de toda la carrera.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.	5
1.3 Objetivos de la investigación.	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.	5
1.4 Justificación de la investigación.....	6
1.5 Alcance.....	6

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación.	7
2.2 Bases teóricas.....	8
2.2.1 Tratamiento térmico.....	9
2.2.2 Aleaciones ferrosas	10
2.2.2.1 Diagrama Hierro-Carbono y Diagrama Hierro-Cementita.....	10
2.2.3 Operatoria.....	13
2.2.3.1 Diferentes tratamientos térmicos.....	14
2.2.4 Curvas de transformación	23
2.2.4.1 Diagrama de Transformación-Tiempo-Temperatura.....	24
2.2.5 Simulación computarizada.....	26
2.2.5.1 Modelos matemáticos.....	28
2.2.5.2 Software a emplear para la simulación.	28
2.3 Definición de términos.....	31

III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación	33
3.2 Diseño de la investigación	33
3.3 Nivel de la investigación.....	34
3.4 Población y muestra	34
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	35
3.6 Fases metodológicas.	35

IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fase I- investigar ecuaciones a emplear.....	40
4.2 Fase II- seleccionar un programa para la resolución de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas TTT	41

4.3 Fase III-realizar simulaciones computarizadas de las curvas TTT de aceros hipereutectoides.....	42
4.4 Fase IV-comparar los resultados que se obtendran en el programa con las curvas TTT experimentales	64
CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	CONTENIDO	pag
1	Diagrama de fases Hierro-Carbono.....	12
2	Comparación de los ciclos que existen entre Tiempo-Temperatura de un normalizado y un recocido completo...	16
3	Comparación de transformación-tiempo-temperatura en un ciclo convencional de enfriamiento y revenido con un Austempering.....	20
4	A) Proceso convencional. B) Martempering. C) Martempering Modificado.....	21
5	Diagrama TTT para un acero 4130 de baja aleación.....	25
6	Influencia de los elementos aleantes en la temperatura eutectoide y del contenido de carbono eutectoide.....	26
7	Diagrama TTT para un acero sin presencia de elementos aleantes.....	27
8	Diagrama TTT con influencia de elementos aleantes.....	30
9	Inclusión de las variables que afectan las curvas TTT en Matlab para un acero AISI 1080.....	43
10	Inclusión de las variables que afectan las curvas TTT en Matlab para un acero AISI 1095.....	44
11	Inclusión de las variables que afectan las curvas TTT en Matlab para un acero AISI 1095 Modificado.....	46
12	Inclusión de las ecuaciones para el Acero AISI 1080.....	46
13	Inclusión de las ecuaciones para el Acero AISI 1095.....	47
14	Inclusión de las ecuaciones para el Acero AISI 1095 Modificado.....	48

15	Continuación de la Inclusión de las ecuaciones para el Acero AISI 1095 Modificado.....	49
16	Ecuaciones para curvas de Acero AISI 1080 sin factor 10^4	49
17	Gráfica de las curvas TTT para Acero AISI 1080 sin factor 10^4	50
18	Ecuaciones para curvas de Acero AISI 1080 con factor 10^4	51
19	Gráfica de las curvas TTT para Acero AISI 1080 con Factor 10^4	51
20	Ecuaciones para las curvas del Acero AISI 1095 Modificado.....	52
21	Gráfica de las ecuaciones para Acero AISI 1095 Modificado.....	52
22	Ecuaciones de las curvas TTT para el Acero AISI 1095 Modificado con factores 10^4 y 10^2	53
23	Gráfica de las curvas TTT del Acero AISI 1095 Modificado con los factores 10^4 y 10^2	53
24	Gráfica de las curvas TTT para el Acero AISI 1095 Modificado con escala de tiempo hasta 10^4 segundos.....	54
25	Curvas TTT para Acero AISI 1080 con 0,79%C y 0,76%Mn.....	56
26	Curvas TTT para Acero AISI 1080 con 0,79%C, 0,76%Mn, 0,6%Cr, 0,4%Ni, 0,3%Si y 0,3%Mo.....	56
27	Curvas TTT para Acero AISI 1095 con 0,89%C y 0,29%Mn	58
28	Curvas TTT para el Acero AISI 1095 con 0,89%C, 0,29%Mn, 0,6%Cr, 0,4%Ni, 0,3%Si y 0,3%Mo.....	58
29	Curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado con solo 1,13%C y 0,30% de Mo.....	59
30	Curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado con 1,13%C, 0,30%Mn, 0,6%Cr, 0,4%Ni, 0,3%Si y 0,3%Mo.....	60

31	Diagrama TTT para Acero AISI 1080 mediante el modelo de Kirkaldy.....	62
32	Diagrama TTT para Acero AISI 1095 mediante el modelo de Kirkaldy.....	63
33	Diagrama TTT para Acero AISI 1095 Modificado mediante el modelo de Kirkaldy.....	63
34	Curvas TTT para Acero AISI 1080, USS Steels.....	64
35	Curvas TTT para Acero AISI 1095, USS Steels.....	65
36	Curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado, USS Steels.....	65
37	Comparación entre las curvas obtenidas en la simulación y las curvas de la USS Steels del Acero AISI 1080.....	70
38	Comparación entre las curvas obtenidas en la simulación y las curvas de la USS Steels del Acero AISI 1095.....	71
39	Comparación entre las curvas obtenidas en la simulación y las curvas de la USS Steels del Acero AISI 1095 Modificado.....	72

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos han permitido el empleo de nuevos procesos para la creación de productos con un mejor desempeño, debido a que estos avances son de forma muy dinámica, contribuyen a superarse ellos mismos. Estos procesos innovadores logran realizar operaciones para conseguir productos que, en su momento debido a la alta complejidad llegaran a ser considerados imposibles de realizar de otra forma.

La tecnología avanza día a día y un gran número de procesos los cuales se creían imposibles de cambiar se están adaptando a los avances tecnológicos y así agilizándolos y produciendo resultados favorables a las compañías. Realizar las curvas TTT (Temperatura- Tiempo-Transformación) para los aceros es quizás una de las cosas más difíciles a realizar debido a su alta complejidad y a su gran número de variables para poder realizar los procedimientos necesarios para obtener dichos gráficos, en especial si los aceros en los cuales se aplican son los aceros hipereutectoides, los cuales debido a su alto contenido de carbono presentan unas condiciones especiales las cuales deben ser consideradas al momento de realizar los tratamientos pertinentes y su enfriamiento en las sales, en el presente proyecto se detallan tales condiciones y se demostrará que aun un proceso tan complejo y delicado como este el cual es obtener las curvas de manera experimental es capaz de adaptarse a la tecnología y dejar atrás la forma rudimentaria en la cual se está realizando incluso hoy en día y así poder ahorrar tiempo y por supuesto costos de operación, de forma que se puedan obtener las curvas TTT para los aceros seleccionados y comparar dichos resultados obtenidos mediante un programa computarizado con las curvas TTT experimentales de los mismos.

Esta investigación sobre la obtención de las curvas TTT en aceros hipereutectoides mediante un proceso de simulación por Matlab constará de cuatro capítulos, los cuales se van a estructurar de la siguiente forma: capítulo I, también conocido como el problema, que consta básicamente del planteamiento estructurado del problema, empezando desde lo más amplio y llevándolo a la problemática más específica. Llegado a esto se empieza entonces con la formulación del problema, se plantean los objetivos para poder resolver el problema. Luego se expresa la justificación de la investigación y por último se determina el alcance que poseerá la misma.

Siguiendo con la metodología del proyecto, el capítulo II, el cual es el marco teórico, se encarga de reunir los antecedentes y sus recopilaciones teóricas documentadas previamente al estudio, la base teórica es el pilar informativo del cual se apoya todo el estudio realizado, para luego concluir en la definición de los términos relevantes para poder llevar a cabo la exploración informativa.

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

Finalmente, en el capítulo IV, se expresa la discusión de los resultados, en el cual se demuestran los datos obtenidos en las diferentes fases del proyecto y la discusión de los mismos para así dar pie a las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

Hoy en día en el diseño de ingeniería mecánica es importante que el diseñador conozca las estructuras las cuales pueden existir en un tipo de acero, para esto se realizan diferentes pruebas como lo son los ensayos de tracción, ensayos de dureza, ensayos de resistencia al impacto, método de Jominy, entre otros. Los cuales 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 pieza diseñada.

Al momento de realizar pruebas o ensayos de tratamientos térmicos, se requiere del uso de una gran cantidad de materiales y tiempo del proceso productivo, los cuales podrían ser empleados en otras actividades. Esto puede causar disminución en la eficiencia, además de gastos innecesarios. Los ensayos hechos durante los tratamientos térmicos buscan determinar cualidades específicas que se encuentran en cada material. Sobre todo en los ensayos de laboratorio que buscan determinar cuáles son estas cualidades que se encuentran representando al material en estudio.

Entre los ensayos realizados a los aceros se encuentran en particular lo que son los tratamientos térmicos, dichos ensayos se encargan de determinar que microestructuras existirán en un acero dependiendo de la temperatura a partir de la cual se empiece a enfriar, del tiempo que el mismo tarde para enfriarse y por supuesto de la velocidad con la que se llegue a la temperatura deseada, para lo cual es imprescindible el uso de los diagramas experimentales de Temperatura, Tiempo, Transformación (TTT) que resume las posibles transformaciones de la austenita para cada tipo de acero, para poder obtener estas curvas se deben a un determinado

número de muestras de acero que, previamente austenizadas, se enfrían en diferentes baños de sales a diferentes temperaturas y tiempos. La microestructura que se obtiene en cada una de las muestras se analiza y representa, obteniéndose así el diagrama TTT para un tipo de acero determinado.

Como este procedimiento toma un largo periodo de tiempo así como también el uso de una gran cantidad de materiales al momento de realizar las curvas, sin tomar en cuenta que además al momento de realizar los ensayos para obtener las curvas se pueden cometer ciertos errores como por ejemplo no calentar la pieza a la temperatura adecuada o agregar más o menos cantidad de elementos aleantes al mismo, los cuales pueden afectar gravemente el proceso y por ende el resultado obteniendo desviaciones, cabe agregar además que algunas empresas no cuentan bien con equipos para realizar los ensayos y obtener las curvas TTT o si bien no cuentan con los diagramas experimentales que en su momento se realizaron, es por esto que deben de buscar métodos alternativos los cuales puedan darles dichas curvas para los aceros a los cuales deseen aplicar el tratamiento térmico, gracias al creciente auge tecnológico la inclinación más favorable es la del desarrollo de una herramienta computacional la cual arroje estas curvas.

Por ello, se busca emplear programas computarizados para reproducir estas curvas a un acero al momento de que se desee aplicar un tratamiento térmico. De esta forma se sabrá aproximadamente que tipo de microestructuras poseerá al momento de que se realice el tratamiento térmico que se desea aplicar. En la actualidad existen diferentes tipos de aceros en la ingeniería, como lo son los aceros al carbono que se dividen en acero hipoeutectoides cuyo rango de porcentaje de carbono que varía entre aproximadamente 0,008% a 0,77%, aceros eutectoides cuyo porcentaje de carbono es próximo al 0,77% y los hipereutectoides que poseen un rango que va desde el 0,77% hasta aproximadamente 2,1%, también existen lo que son los aceros aleados, microaleados y aceros especiales.

El presente trabajo se centrará en los aceros hipereutectoides y en la obtención de sus curvas TTT para el momento en que se desee aplicar un tratamiento térmico a

estos y no se cuenten con los recursos a la mano para realizarlos, para esto se aplicara un programa que se encargara de realizar la resolución de diferentes ecuaciones empleando un modelo matemático, mediante la aplicación del mismo será posible predecir el comportamiento de las curvas TTT dependiendo de las temperaturas de estabilización de fase y los rangos de las mismas en las cuales se trabaje. Realizar una herramienta computacional que ayude a determinar las curvas disminuirá costos operacionales al momento de la producción ya que la necesidad de realizar ensayos para obtener un patrón con las curvas reales del material se reducirá.

Si no se aplica la herramienta computacional, los costos de producción así como el tiempo y los materiales se verían afectados por la necesidad de realizar ensayos a numerosas piezas en intervalos de tiempo establecidos para determinar las condiciones de las curvas TTT.

1.2 Formulación del problema.

¿Cómo se puede predecir las curvas TTT de los aceros hipereutectoides si se quiere realizar un tratamiento térmico y no contar con las mismas?

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo general.

Realizar simulaciones computacionales que permitan reproducir las curvas TTT para diversos aceros hipereutectoides para así validar si un modelo establecido es capaz de predecir de forma aproximada las curvas que se deben obtener de forma experimental.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar las ecuaciones a ser empleadas en la simulación.
- Seleccionar un programa para la resolución de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas TTT el cual sea capaz de realizar graficas de múltiples puntos al ir variando diversos valores de las ecuaciones.
- Realizar diversas simulaciones computarizadas de las curvas TTT de los aceros hipereutectoides AISI 1080, 1095 y 1095 Modificado.

- Comparar los resultados que se obtendrán en el programa con las curvas TTT reales.

1.4 Justificación de la investigación.

Desde el punto de vista académico, realizar una herramienta computacional para graficar las curvas TTT ayudara a los estudiantes a tener una mejor percepción de lo importantes que son para el momento en que se realiza cualquier tipo de tratamiento que se le pueda realizar a una probeta, ahora bien si se habla desde el punto de vista industrial, facilitará no solo a simplificar los procesos productivos sino además a reducir los costos de operación al tener que realizar menos ensayos de pruebas, 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 ayudará a dictaminar cuales serán los posibles resultados cuando se realicen los ensayos experimentales para obtener las curvas TTT.

El presente proyecto de investigación dará pie a demostrar si un modelo matemático establecido para la obtención de las curvas TTT se ajusta de manera próxima a lo que sucede de forma experimental o si por el contrario dicho modelo debe ser modificado y fomentar el estudio del modelo matemático en el campo de la ingeniería mecánica para el estudio y obtención de las curvas TTT no solo en aceros hipereutectoides sino en los demás tipos de aceros en los cuáles pueda ser aplicado el modelo seleccionado.

1.5 Alcance.

Se realizaran simulaciones computacionales mediante el cual se permita reproducir las curvas TTT de algunos aceros hipereutectoides con la finalidad de determinarlas para luego ser comparadas con los diagramas TTT que se tienen de forma experimental y justificar si el modelo matemático seleccionado es apto para reproducir tales curvas o si por el contrario no funciona de manera adecuada para las mismas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico da una visión de donde se sitúa el planteamiento propuesto, dentro del campo de conocimiento y ayuda a documentar como la investigación agrega valor a la literatura que ya existe o lo que es lo mismo, sustentar teóricamente el estudio. En este caso, la Obtención de las Curvas TTT en Aceros Hipereutectoides Mediante un Proceso de Simulación por Matlab. Con la finalidad de contar con la mayor cantidad de información posible, la cual pueda sustentar el desarrollo del proyecto, se presentará a continuación una serie de investigaciones realizadas por diferentes autores quienes aportan sus conocimientos y logros a favor de futuros trabajos puedan darse sustento en base a estos, constituyendo un aporte valioso para la realización de la investigación.

2.1 Antecedentes de la investigación.

Para iniciar los antecedentes bibliográficos, se encuentra la investigación realizada por Díaz, Juan. García, Carlos y otros (2007), en la cual desarrollaron un proyecto denominado **Un Modelo para la Descripción de las Transmisiones de Fases en una Barra de Acero**, el cual se centra en el estudio de un modelo que describe las transformaciones de fases en los aceros 42CrMo4 y SAE 1145, en el cual la temperatura es considerada inicialmente un dato de acuerdo a un perfil de temperatura fijado previamente. El cual funciona como punto de referencia para conocer que ya fueron realizados anteriormente modelos para describir que transformaciones ocurren en barras de acero y que si se puede realizar modelos matemáticos para los aceros y sus diferentes tipos de transformaciones.

Así mismo, Goyos, Luis y otros (2007) el cual desarrolló un proyecto llamado **Selección e Implementación de un Modelo para el Inicio de la Transformación**

Perlitica Durante el Enfriamiento en Aceros de Baja Aleación, en el Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría en la ciudad de La Habana, Cuba, la cual tuvo como objetivo realizar el modelo para determinar las curvas de inicio de transformación perlitica, conociendo la composición de los aceros, el tamaño de grano entre otros factores, que son variables que determinan las diferentes formas de la curva, la implementación del modelo seleccionado ofrece un acercamiento a la posibilidad de crear un aula virtual que emplea una metodología de cálculo y una herramienta para continuar avanzando en la dirección de perfeccionar y ampliar las posibilidades del resultado presentado. Aportando al proyecto la manera en la cual se debe seleccionar un modelo para su representación en un programa y además verificando así que es posible obtener la transformación perlitica para un acero de baja aleación.

Por último, Artigas, Ángel. Arel, Pablo. Castro, Francisco. (2008), ejecutaron un proyecto de **Obtención del Diagrama de Transformación Isotérmica para un Acero Dual Phase**, en la Universidad de Santiago de Chile, el cual tuvo como objetivo obtener el diagrama de transformación isotérmica para el acero especificado, identificando las curva de transformación ferrítica, perlitica y bainitica comparando así con las curvas reales y viendo en cuanto discrepan unas con otras. Este proyecto aportó las ecuaciones necesarias que rigen el comportamiento en los aceros que poseen dos fases como lo son los aceros hipereutectoides que presentan ferrita y cementita en sus respectivas fases mientras que la perlita, martensita y bainita son microconstituyentes.

2.2 Bases teóricas.

Las bases teóricas son las que representan la referencia el problema que se plantea, es por esto que toda investigación debe estar estructurada por la teoría y el método de trabajo para complementar los hechos y permitir así la relevancia del estudio. Es por esto que las bases teóricas comprenden un conjunto de conceptos y proposiciones que constituyen un punto de vista o enfoque determinado, que está dirigido a explicar el fenómeno o problema que se está planteando, por lo cual se señalan las siguientes:

2.2.1. Tratamiento térmico.

Una definición bastante aceptable del término es: “Es el conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad, presión de los metales o aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, en especial la dureza, resistencia y la elasticidad”. El acero es en ingeniería quizás el material más versátil que se tiene, esto se debe a las propiedades que este puede obtener gracias a los diferentes tratamientos térmicos que se le pueden realizar, estos cambios en sus propiedades se debe a diferentes temperaturas críticas que posee, el hierro modifica su estructura cristalina de una a otra gracias a estas temperaturas, a estos cambios en la microestructura se le conoce como transformaciones alotrópicas, las cuales suceden de manera espontáneas y pueden ser devueltas a su estado inicial, dichas transformaciones pueden generarse gracias a un cambio de temperatura en el metal. Un tratamiento térmico en el acero se caracteriza gracias a la aplicación de las transformaciones alotrópicas que experimenta el acero y los procesos de recristalización de grano y los procesos de difusión. Todos y cada uno de los procesos de transformación del acero para cambiar sus propiedades y obtener los resultados que se desean viene acompañado con la transformación de la austenita, así pues los tratamientos térmicos de un acero se puede clasificar en cuatro grupos de enfriamiento continuo los cuales son:

- El normalizado.
- El recocido.
- Templado o temple.
- Revenido.

Se debe destacar la importancia que posee cada uno de los tratamientos que se mencionaron anteriormente, como se contempla en el Metals Handbook Volume 04 – Heat Treating, esto es debido a que cada uno de ellos amerita que se lleve a cabo un ciclo para calentar, uno de mantenimiento de temperatura y por último un ciclo para que se lleve a cabo el enfriamiento, cada ciclo de calentamiento y enfriamiento así como también el mantenimiento de una temperatura adecuada, dependerán de la forma,

espesor y tamaño de la pieza, lo que conlleva a que es necesario considerar el realizar una cierta cantidad de pruebas a las mismas, con la finalidad de establecer de manera idónea las condiciones necesarias con las cuales se obtendrán las propiedades deseadas de la pieza en estudio.

2.2.2 Aleaciones ferrosas.

2.2.2.1 Diagrama Hierro-Carbono (Fe-C) y diagrama Hierro-Cementita (Fe-Fe₃C)

El punto de partida para el entendimiento de los tratamientos térmicos a los aceros como hoy en día se conoce, es el conocido diagrama de fases Fe-C, en el cual muchas de las propiedades de los aceros y de las fundiciones de las aleaciones al carbono, así como la clase de microestructura a poseer, se pueden entender y explicar en referencia a este diagrama, así pues, la relación que existe entre una fase y otra en el diagrama se puede expresar en términos del contenido de carbono existente en esta, por lo cual, esta razón lleva a la consideración de que existe un sistema el cual es estable y otro el cual es un sistema metaestable. Dicho diagrama presenta entonces dos diagramas en conjunto, los cuales son el diagrama que existe en la estabilidad del Hierro-Grafito y el diagrama metaestable que existe entre el Hierro-Carbono, por lo que el diagrama de interés en la industria y en el presente proyecto para el estudio de los aceros es el segundo mencionado, debido a que el primero requiere una gran cantidad de tiempo para desarrollarse, sobre todo en el lugar de la baja temperatura y del bajo porcentaje de carbono. Tomando como referencia el diagrama Hierro-Carbono, los aceros son aquellos que se comprenden con un contenido de carbono menor o igual al 2,1% de este, aunque este contenido varía dependiendo del autor, mientras que las fundiciones de hierro poseen contenidos de carbono superiores al 2,1% hasta aproximadamente 6,67% del mismo. Tomando lo anterior mente mencionado, se puede entonces dividir la figura 1 hasta en 2,1% de carbono en tres (3) clasificaciones, las cuales son:

- **Aceros de bajo contenido de carbono o aceros Hipoeutectoides:** aquellos los cuales su contenido de carbono se comprende entre 0.08% y 0.25%, debido a su bajo porcentaje en peso de carbono estos aceros poseen una alta ductilidad.
- **Aceros de medio contenido de carbono o aceros Eutectoides:** son aquellos aceros los cuales poseen un contenido de carbono se encuentra entre 0.3% y 0.77%, su mayor ventaja es su tenacidad y resistencia.
- **Aceros de alto contenido e carbono o Hipereutectoides:** son los cuales poseen un rango de porcentaje de carbono de 0.77% a 2.1%, son entre los aceros los que poseen mayor dureza.

En dicho diagrama existen soluciones las cuales son la esencia de este, la solución

También se puede apreciar en la Figura 1 la existencia de otros puntos de importancia, los cuales son:

- **Reacción eutectoide:** la cual ocurre aproximadamente a los 723°C y a un porcentaje de carbono de 0.77%, la cual ocurre estando en el estado sólido pasando de tener austenita pura a una composición bifásica de ferrita alfa y cementita, a la composición de estas dos fases se le conoce como perlita.
- **Reacción peritectica**
y líquido, obteniendo de esta austenita.
- **Reacción eutectica:** la cual se produce a los 1148°C y a un porcentaje de carbono de 4.3%, llevándose a cabo en estado líquido y transformándose así en una composición bifásica de austenita y cementita.

2.2.3 Operatoria.

Como ya fue mencionado, los tratamientos térmicos se basan en el calentamiento y mantenimiento de piezas de acero a temperaturas correctas durante un cierto tiempo determinado para garantizar así la obtención de las propiedades deseadas, dependiendo además de las condiciones de enfriamiento que ameriten para esto, es por ello que el tiempo y la temperatura son variables importantes al momento del tratamiento, por ende estos deben ser fijados con antelación de acuerdo a las características que posea el acero a tratar, obviamente sabiendo también las en qué condiciones de forma, tamaño y características se encuentra la pieza, de esta forma se puede decir entonces que:

- **Calentamiento:** se debe aumentar de manera progresiva la temperatura de la pieza de manera uniforme hasta alcanzar la temperatura deseada, la forma y tiempo en que se calentara la pieza dependerá de sus dimensiones. Es importante tener en cuenta que se debe controlar la velocidad de calentamiento, así como también la temperatura a la cual se produce este.
- **Tiempo de permanencia a la temperatura fijada:** la finalidad de esta es la transformación de la microestructura al inicio el tratamiento térmico, es de vital

importancia el tiempo que permanecerá a la temperatura fijada para que así se transforme de manera homogénea toda la microestructura de la pieza.

- **Enfriamiento:** es quizás la parte más crítica del tratamiento, debido a que es necesariamente debe ser controlada de manera rigurosa dependiendo del tratamiento que se esté realizando a la pieza, pues para cada tratamiento térmico las condiciones de enfriamiento variaran y por supuesto las propiedades finales de la pieza, todo con el fin de poseer una microestructura cristalina final la cual dará las propiedades deseadas con el tratamiento.

2.2.3.1 Diferentes tratamientos térmicos.

Los diferentes tipos de tratamientos térmicos ya fueron mencionados anteriormente, en esta parte se procederá a describir cada uno de ellos, teniendo de esta forma:

Normalizado: es un tratamiento térmico el cual consiste en llevar a la pieza a una fase austenítica y luego de que se encuentre totalmente homogénea en esta fase, proceder a un enfriamiento en aire tranquilo, normalmente en este tratamiento se calienta entre 55°C a 60 °C por encima de la línea crítica de transformación, esto es por encima de la línea Ac₃ para los aceros hipoeutectoides y por encima de la línea Ac_m para los hipereutectoides. En lo que se refiere a términos de microestructura, las zonas que se encuentran cerca del 0.77% de carbono poseen una estructura perlítica mientras que las zonas en las cuales el porcentaje de carbono son inferiores a este 0.77% son ferríticas.

Las posibilidades para lo cual se puede emplear el normalizado es variable, este puede aumentar o disminuir la dureza y resistencia del acero dependiendo de de la historia térmica y mecánica que posea, una de las razones principales para emplear un normalizado a una pieza de acero es excelente maquinabilidad que este brinda a las piezas, la organización de las tensiones residuales de la pieza y el refinamiento de grano en el acero. Comparando el normalizado con otros tratamientos térmicos, presenta una

temperatura de enfriamiento mucho menor a la empleada en el temple pero más lenta que la empleada en el recocido.

Recocido: consiste en el calentamiento de la pieza hasta que esta alcance la fase austenítica y luego dejar que se enfríe dicha pieza dentro del medio de calentamiento, las ventajas que este tratamiento posee son la mejora de las propiedades tanto eléctricas tensiones internas, el recocido puede clasificarse en diferentes tipos, los cuales son:

Recocido completo o total: este recocido se le aplica a toda la pieza, se los aceros hipereutectoides deben calentarse aproximadamente 50°C por encima de línea A_{cm} , para que así ocurra la recristalización del acero.

- 1) **Recocido de homogeneización:** en este tipo de recocido se usa el fenómeno de difusión para obtener un material homogéneo, con el fin de reducir la heterogeneidad química que se produce gracias a la solidificación, como la velocidad de difusión es función exponencial de la temperatura, se debe realizar el recocido a la temperatura más alta posible.
- 2) **Recocido de ablandamiento:** se realiza con el propósito de poseer una estructura de acero la cual tiene la dureza mínima posible de obtener.
- 3) **Recocido isotérmico:** su objetivo principal es el de obtener perlita gruesa, lográndolo mediante una transformación isotérmica, lo cual se realiza enfriando la pieza hasta temperatura de transformación apropiada para obtener perlita, y manteniendo esa temperatura hasta que se realice la transformación completamente.

En la figura 2 se representa claramente la diferencia que existe entre realizar un tratamiento térmico por normalizado a una pieza de acero y un tratamiento de recocido a una pieza con las mismas propiedades.

Temple: este tratamiento se refiere al proceso de calentamiento y enfriamiento rápido de piezas a partir de la temperatura de austenización, la cual se encuentra generalmente entre 815°C y 870°C para los aceros, de manera fundamental, el objetivo de este es el enfriar el acero desde dicha temperatura de manera rápida para la formación de fases microestructurales que no se consiguen normalmente con los otros

tratamientos térmicos mencionados, las cuales son la Bainita y la Martensita mayormente. Para realizar esto, se debe controlar la transferencia de calor que ocurre en la superficie de la pieza hasta el centro de la misma. El proceso de temple puede ser empleado además en otros aceros para eliminar en gran medida la presencia de carburos de hierro en los límites de grano de los mismos, pero de forma general se emplea para la producción de cantidades de martensita adecuadas para cada pieza, consiguiendo así una alta dureza, resistencia o tenacidad en la pieza.

Para la selección de un medio de enfriamiento a emplear en el temple, es necesario saber que la templabilidad de la aleación en particular, la forma y el tamaño de esta además de las velocidades de enfriamiento necesarias para poder conseguir la microestructura que se desea en la pieza, los más empleados son gases o líquidos, entre los que se emplean para los medios de enfriamiento líquidos tenemos:

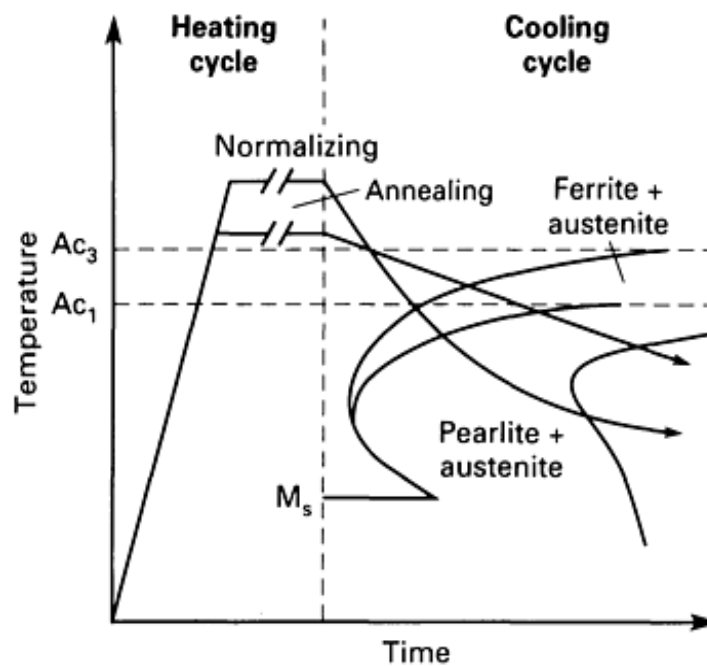


Figura 2. Comparación de los ciclos que existen entre Tiempo-Temperatura de un normalizado y un recocido completo.

- Agua, el cual es el medio más empleado.
- Agua que puede poseer aditivos salinos.
- Aceite con cierta variedad de aditivos.
- Soluciones acuosas de polímeros.

Para el temple con gases se emplea lo más común es el uso de gases inertes los cuales incluyen el Argón, Nitrógeno y Helio, los cuales se emplean algunas veces después de la austenización en vacío. La capacidad que posee un acero para ser templado dependerá de las características de enfriamiento del medio en el cual se realizara el temple, mientras que la eficiencia del enfriamiento va a depender es de la composición del acero a ser templado, de las condiciones de uso al ser curado, el sistema de enfriamiento, el medio de enfriamiento el cuidado con el cual se mantendrá el sistema para realizar el temple presentara un gran aporte para que el proceso resulte de manera exitosa.

Existen diferentes tipos de temple los cuales pueden ser empleados en una pieza de acero para obtener diferentes tipos de propiedades, es por esta razón que se tiene:

- **Temple rápido:** se emplea cuando se necesita que la velocidad de enfriamiento de la parte de la pieza a templar produzca un cambio drástico durante el enfriamiento, un ejemplo claro de esto se da al enfriar bruscamente la pieza en agua, esto se realiza con la finalidad de eliminar el calor de la manera más rápida posible de la pieza y posteriormente a conseguir una temperatura que no alcance la nariz de la curva TTT, se cambie el medio a uno el cual la enfríe más lentamente pero sin perder la microestructura ya formada.
- **Temple selectivo:** empleado cuando se desea que algunas zonas de la pieza a recibir el tratamiento no sean afectadas por este, esto se logra por ejemplo colocando un aislante térmico en las zonas a convenir para que su capacidad de enfriamiento sea menor que el resto de las zonas que no fueron aisladas.

- **Temple por niebla:** este temple emplea una niebla fina o una niebla de pequeñas gotas de líquido el cual se encuentra en un recipiente de gas que será empleada como medio de enfriamiento.
- **Temple directo:** es el temple mas empleado, el cual se realiza estando la pieza a la temperatura de austenización y posterior a esto, enfriarlo de manera abrupta en un medio de enfriamiento el cual llevara a la pieza de la temperatura de austenización a la Ms y pasara directamente a la temperatura Mf.
- **Temple por pulverización:** es el temple en el cual básicamente se emplea líquido a altas presiones y se aplica a ciertas zonas de la pieza a ser templada, para así generar mayores tasas de velocidades de enfriamiento en esas zonas.
- **Temple interrumpido o escalonado:** este tipo se utiliza enfriando la pieza hasta que esta alcance un punto cercano a la temperatura Ms y posterior a esto sostener la temperatura por un tiempo determinado para luego ser enfriado en aire, existen tres tipos de enfriamiento interrumpido o escalonado los cuales se conocen como Martempering, Austempering y enfriamiento isotérmico.

Básicamente lo que se busca con el Martempering es que luego e calentar un acero por encima de la línea de temperatura A3 hasta el punto de la austenización completa de la pieza sea enfriado en un medio de enfriamiento el cual posee sales fundidas la cual posee temperaturas que se encuentran entre los 200°C y los 300°C, estando por encima del punto Ms, se debe de dejar la pieza el tiempo suficiente hasta que equilibre totalmente su temperatura con la que posee el medio de sales fundidas para luego ser retirada y dejar que sea enfriada en aire.

El proceso de Austempering es un poco diferente al mencionado anteriormente, pues, este tratamiento térmico se basa en que la austenita sea transformada en bainita empleando una temperatura constante, para realizar este proceso se debe de calentar el acero hasta la temperatura de austenización, siendo esta temperatura un poco mayor a la temperatura critica y posterior a esto, realizar un enfriamiento rápido en un medio

de sales, de esta forma permanece de manera constante durante el tiempo necesario para que la austenita de la pieza sea transformada en vainita.

Por último se tiene el enfriamiento isotérmico, en el cual en lugar de emplear un solo medio de enfriamiento rápido, utiliza dos, luego de realizar el primer enfriamiento y antes de que se lleve a cabo el inicio de la transformación, la pieza se mueve a un segundo medio de enfriamiento el cual se encuentra a una temperatura un poco más alta que el primero. En la figura 3, se tiene la comparación existente entre realizar un enfriamiento convencional y revenido por Austempering, mientras que en la figura 4 se aprecia claramente la diferencia entre un proceso convencional de templado, un proceso de Martempering normal y un proceso de Martempering modificado.

Selección del medio para realizar el Temple: al momento de realizar un temple, este se debe de hacer de forma que el medio a emplear sea capaz de hacer que la velocidad de enfriamiento del acero sea mayor a la crítica para así conseguir una estructura 100% martensítica, un problema que se corre en las piezas que son enfriadas de manera brusca es, son las tensiones internas que se pueden generar producto de un enfriamiento discontinuo dentro de la misma, esto debido a que mientras la parte más externa de la pieza se encuentra enfriándose de manera abrupta, la parte interna de la misma se encuentra aun a una alta temperatura. Debido a la gran cantidad de aceros que existen hoy en día, resulta difícil saber qué medio de enfriamiento sería el más adecuado para cada uno de ellos de manera empírica, es por esta razón que lo más factible es seguir las indicaciones de sociedades metalúrgicas o realizar un análisis de propiedades y dimensiones iniciales de la pieza, por lo general existen normas que se pueden tomar en cuenta al momento de realizar un proceso de templado, entre las cuales tenemos:

- Aceros al carbono con dimensiones de espesor más de cinco milímetros (5mm) y aceros especiales de baja aleación con espesores de más de veinticinco milímetros (25mm), deben ser templadas en agua a temperaturas entre 15 y 20 °C.

- Aceros de alta aleación deben ser templados en aire.
- Los aceros mencionados anteriormente con perfiles inferiores aproximadamente a cinco milímetros (5mm) o diez milímetros (10mm), el temple debe ser realizado en aceite y estando a una temperatura que se encuentre entre los 30 y los 60 °C para obtener un buen tratamiento térmico.
- **Comparación de los diferentes medios de Temple:** debido a los diferentes medios que existen para realizar el temple, es importante comparar que ventajas representan uno respecto a otro, por supuesto todo dependerá de las propiedades que se deseen tener y las características de la pieza a ser templada, pero cabe destacar la importancia que presenta conocer cada uno de estos medios, de esta forma se tiene que:

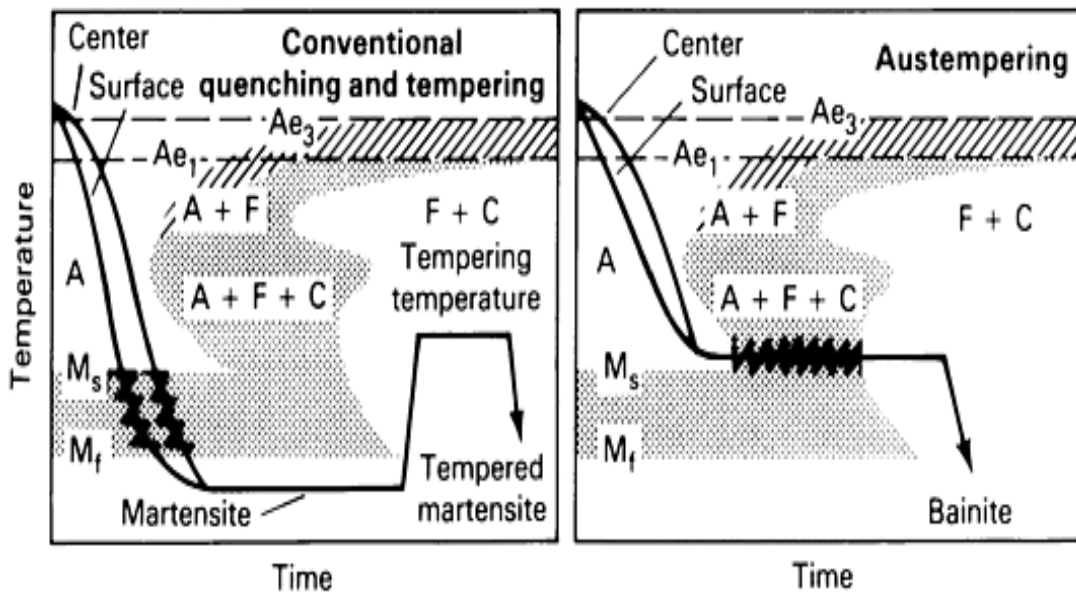


Figura 3. Comparación de transformación Tiempo-Temperatura de un ciclo convencional de enfriamiento y revenido con un Austempering.

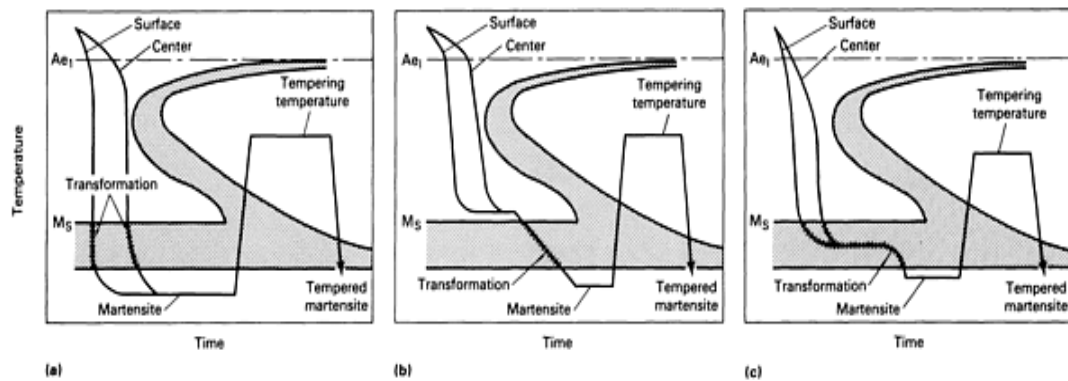


Figura 4. Diagramas de Tiempo-transformación con curvas superpuestas que muestran: A) Proceso convencional. B) Martempering. C) Martempering modificado.

- **Agua:** está junto con los medios que son de base acuosa son los medios para realizar temple que menos costos generan y de mayor uso, siempre y cuando la pieza a desear realizar el temple no sufra distorsiones excesivas o sufran de un agrietamiento durante el tratamiento térmico, por si sola, el agua suministra casi la máxima velocidad de enfriamiento que se puede obtener de un liquido, además de eso no produce contaminación al momento de ser empleada o daños a la salud de los usuarios. Es conveniente que el agua se encuentre entre 15 a 20°C debido a que si la temperatura supera los 30°C ocasiona un gran problema debido a que disminuye la velocidad de enfriamiento en la zona de 750°C a aproximadamente 500°C, produciendo así la formación de estructuras blandas, sobre todo en los aceros de baja templabilidad.
- **Salmuera:** se refiere a la solución de base acuosa que contiene ciertos porcentajes de sales como lo son el Cloruro de Sodio o Cloruro de Calcio, junto con diferentes aditivos especiales e inhibidores de corrosión, algunas de las ventajas que ofrece la salmuera son:

 - 1) Velocidad de enfriamiento mayor en comparación a la del agua para una misma agitación.
 - 2) Temperatura menos critica que el agua, requiriendo menos control.

- 3) Distorsión disminuye en gran medida en comparación con el agua.
- 4) No aparecen en gran cantidad manchas suaves debido a bolsas de vapor, en comparación con el temple el agua.

Aunque por supuesto no todo puede ser perfecto, la salmuera presenta algunas desventajas a tener en cuenta:

- 1) Debido a poseer sales, requiere que el equipo para el temple contenga inhibidores de corrosión.
- 2) Requiere de un equipo especial para la extracción de la pieza, debido a los vapores tóxicos que emite.
- 3) Mayor costo debido a las diferentes pruebas a realizar para comprobar que la solución se encuentra en buenas condiciones.
- 4) El costo también aumenta debido a los diferentes aditivos e inhibidores.

· **Aceite:** entre los diferentes tipos de aceites que existen, los mejores al momento de realizar un tratamiento térmico por temple, son los aceites minerales gracias a sus diferentes propiedades:

- 1) Viscosidad debe ser controlada, encontrarse en un rango aceptable de forma que no sea ni muy viscoso ni posea baja viscosidad.
- 2) Volatilidad debe ser baja, de esa forma no se pierde aceite debido al uso y el medio de enfriamiento se espesa, produciendo pérdida en la velocidad de enfriamiento.
- 3) Deben poseer temperaturas de inflamación y combustión elevadas, así se evita el posible riesgo de ocasionar un incendio o explosión.

Revenido: al momento de sufrir un endurecimiento por un tratamiento térmico, el acero en esta condición carece de practicidad debido a la gran fragilidad que está presenta, esto se debe a la formación de martensita que presenta el acero y la gran cantidad de esfuerzos internos que se generan en el proceso de temple, es por ello que a los aceros a los que es aplicado tal tratamiento térmico es necesario eliminar estas tensiones residuales que presenta, por esta razón existe lo que es el revenido, cuya

función es básicamente la eliminación de estas tensiones internas en la pieza, mejorando así la ductilidad y tenacidad de la pieza, sacrificando en parte la dureza obtenida por la formación de la martensita. Para realizar este tratamiento térmico es necesario calentar el acero luego del temple a una temperatura que sea inferior a la temperatura A_{c1} para luego ser enfriado a una velocidad que convenga para obtener diferentes propiedades, pero al realizar este calentamiento como ya se dijo anteriormente se sacrifica parte de la dureza obtenida en la formación de la martensita para obtener mayor tenacidad, cabe destacar que a medida que se aumenta la temperatura y se aproxima a la línea de temperatura A_{c1} disminuye la dureza aumentando la tenacidad de la pieza, el calentar el acero en un rango de temperatura comprendida entre 200 y 450°C sirve como una zona divisoria para aquellas aplicaciones en las cuales se requiere que posea mayor dureza y otra en la que se requiera mayor tenacidad.

Si el principal objetivo es obtener piezas con una alta dureza o que posean una buena resistencia al desgaste, lo ideal es revenir la pieza a menos de 200°C, eliminando notoriamente los esfuerzos residuales, en cambio, si lo que se desea es obtener piezas que posean una buena tenacidad pero no posean tanta dureza, lo idóneo es revenir el material a una temperatura superior de 450°C, logrando de esta forma que las tensiones residuales sean eliminadas casi por completo. La razón por la cual la martensita posee tal dureza, se debe a su sobresaturación de carbono al ser enfriada bruscamente en el temple debido a la microestructura que se forma, la cual es tetragonal centrada en el cuerpo (BCT).

2.2.4 Curvas de transformación.

2.2.4.1 Diagrama de Transformación – Tiempo - Temperatura

El estudio de la transformación de la austenita fue realizado por primera vez en 1930, en el cual el estudio se llevo a cabo teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Con una velocidad de enfriamiento elevada, la transformación de la martensita no empieza en la temperatura M_s .

- En temperaturas que se comprenden entre A_1 y la temperatura M_s , la austenita puede permanecer en estado maleable, siempre y cuando la velocidad de enfriamiento para lograr dicha temperatura sea lo suficientemente elevada.

Así pues, se obtuvieron las velocidades de transformación que posee la austenita maleable a temperaturas constantes junto con su microestructura y propiedades de los componentes que se generan de esta forma, los diagramas TTT se empleando principalmente dos métodos los cuales son: metalografía y por dilatometría. Mediante el primer método se emplean probetas de acero las cuales se llevan a la temperatura de austenización para luego ser templadas en un medio de enfriamiento por sales o plomo líquido, a temperaturas que son constantes entre la temperatura A_1 y la M_s , luego de pasar un tiempo en el medio pasan a ser templadas en agua la cual se encuentra a temperatura ambiente, para que de esta forma la austenita que aún queda por transformarse se vuelva martensita, así entonces se puede evaluar la cantidad de austenita transformada en función de la temperatura y del tiempo realizando ensayos metalográficos.

Posteriormente a realizar los ensayos, los resultados son llevados a una gráfica la cual se encuentra en una escala logarítmica para el tiempo, lo cual genera una curva generalmente en forma de “S”, cuando se obtienen todas las curvas para el rango de temperatura que existe entre A_1 y M_s , en el cual el tiempo se da en una escala logarítmica, la cual muestra:

- Curva de inicio y final de la transformación.
- Formación de carburos.
- Zona de formación perlítica y zona de formación bainítica.
- Curvas con diferentes porcentajes de transformación.

En la figura 5 se muestra un ejemplo claro de las curvas TTT y de que es lo que estas representan.

El adicionar elementos aleantes a los aceros produce que exista un cambio en la curva de la nariz de los diagramas TTT convencionales para los aceros al carbono, así pues se tiene que las líneas A_1 , A_3 y A_{cm} en conjunto con el punto eutectoide sean

desplazados, la influencia de los elementos en la variación de A1 y del punto eutectoide se representa en la figura 6, teniendo en cuenta lo siguiente:

- 1) Los elementos aleantes estabilizadores de austenita producen que la línea A1 disminuya, producto de la adición de Manganeso y Níquel.
- 2) Los elementos aleantes que se encargan de producir estabilidad en la ferrita como lo son el Cromo, Silicio, Molibdeno y Tungsteno producen un aumento de la línea A1.
- 3) Todos los elementos empleados en aleación producen una disminución del contenido de carbono en el punto eutectoide.

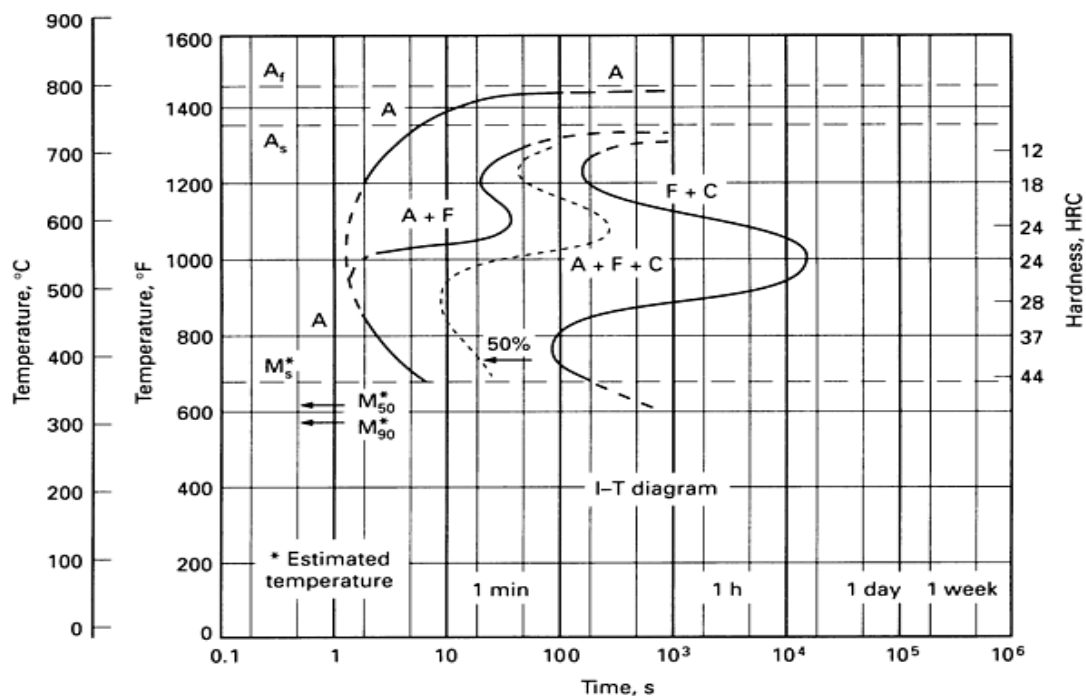


Figura 5. Diagrama TTT para un acero 4130 de baja aleación.

La principal función que estos elementos al ser agregados a una aleación de acero es la de aumentar la templabilidad de este, lo que se refleja en las curvas “S” en un desplazamiento horizontal de de las curvas de inicio y final de transformación de la

austenita, en la figuras 7 y 8 se puede apreciar claramente la influencia que tienen los aleantes en la alteración de las curvas.

2.2.5 Simulación computarizada.

Gracias al crecimiento de los computadores, que hoy en día es quizás una de las herramientas más importantes para el hombre en su vida cotidiana, es posible la realización de análisis, diseños y procesos complejos de manera más sencilla que hace unas décadas atrás y todo esto se puede realizar empleando una simulación. Como bien se sabe, al surgir nuevos métodos para la resolución de problemas que en su momento parecían complejos surgen nuevos problemas cuya dificultad es cada vez mayor no solo teóricos sino además prácticos. La palabra “simulación” posee un contexto bastante amplio, pero entre las definiciones que la rodean, una muy aceptable es la formulada por R.E Shannon, la cual dice:

La simulación es el proceso de diseñar el modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema.

Dentro de este contexto, se puede decir entonces que la finalidad de una simulación es que esta permita evaluar de manera más simple modelos que existen en un sistema ya creado para así conocer como es el comportamiento del mismo, o si bien plantear nuevos métodos que se encuentran dentro del criterio del diseñador para así simplificar el sistema o si bien, realizar una mejora a este. Para realizar una simulación en las curvas S se deben tener en cuenta factores como lo son las temperaturas de estabilización, microestructuras y la cantidad de aleantes que se encuentran afectando el material, por supuesto cada una de estas características depende una de la otra en conjunto con factores propios del material, como lo son la cantidad de pureza de este, las condiciones mecánicas en las que se encuentre, condiciones de la austenización, distribución de fases, esfuerzos residuales, entre muchos otros factores.

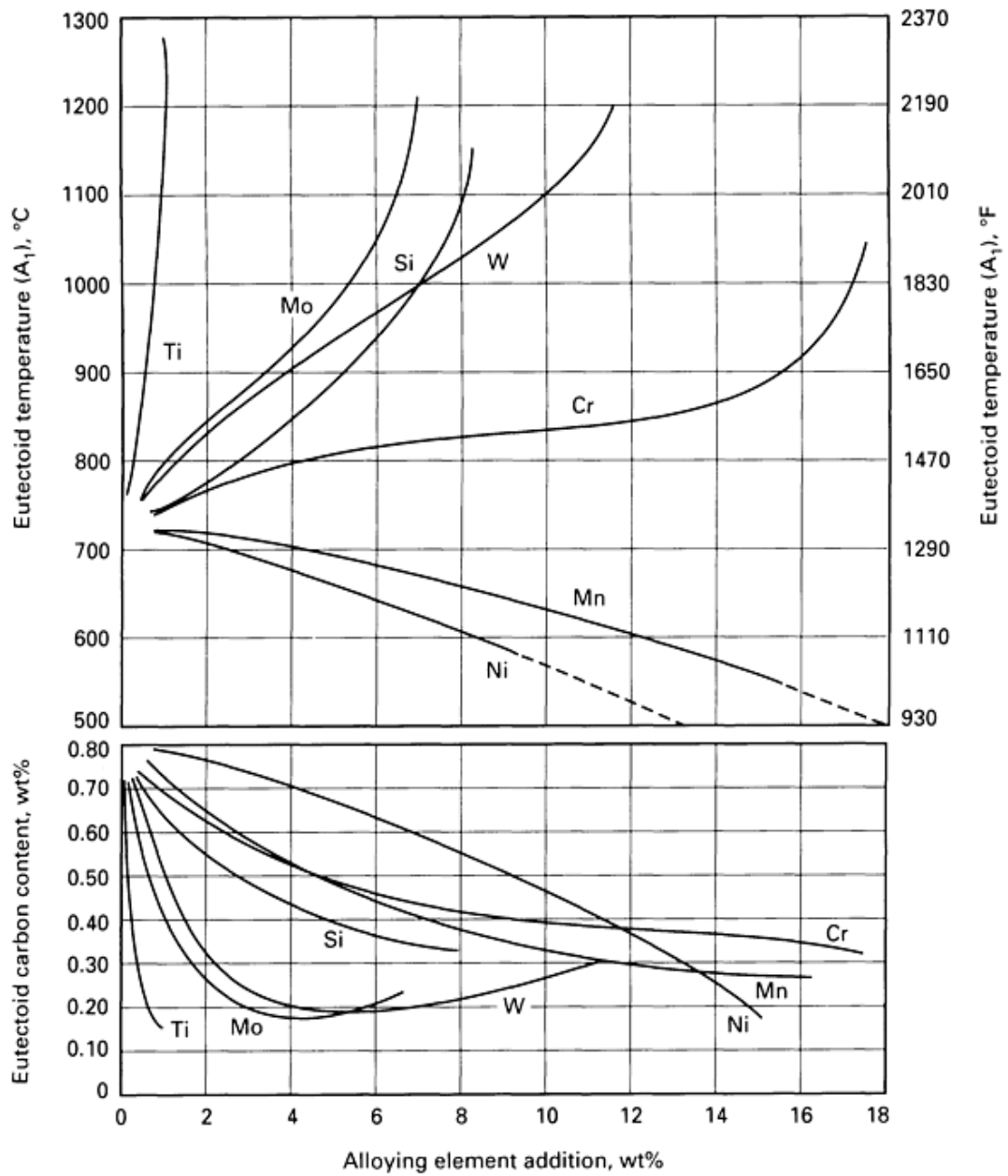


Figura 6. Influencia de los elementos aleantes en la temperatura Eutectoide y del contenido de carbono Eutectoide.

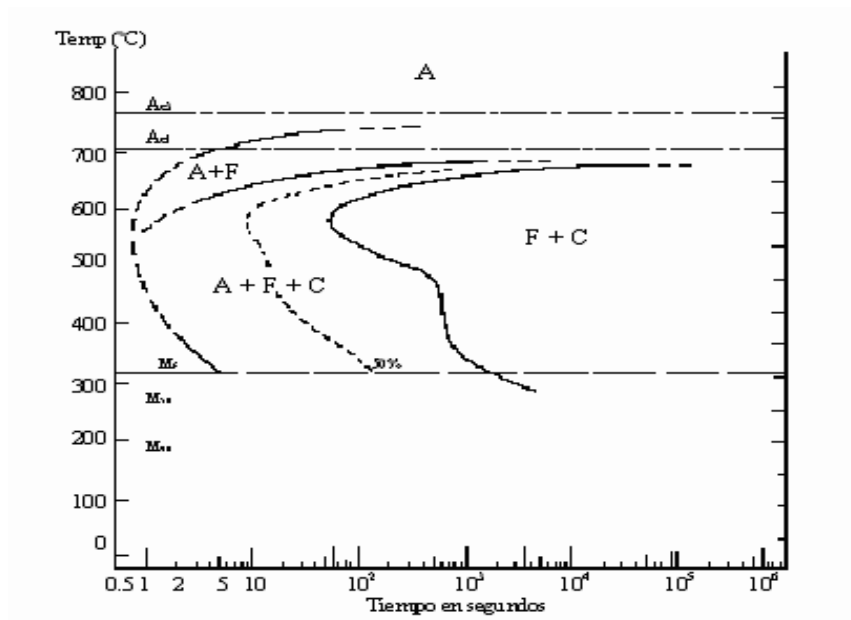


Figura 7. Diagrama TTT para un acero sin presencia de elementos aleantes.

2.2.5.1 Modelos matemáticos.

Los procesos térmicos son a nivel industrial, procesos muy importantes, debido a que estos permiten dar a los componentes diferentes propiedades que mediante otros procesos es difícil de conseguir, las propiedades que poseerá la pieza luego de ser sometida estos procesos viene ligada al tipo de acero a tratar, la cantidad de elementos aleantes que el mismo posee, las temperaturas de estabilización de las fases presentes y el tiempo en el cual se desarrollan los diferentes puntos de la curva para lo cual puede ocurrir la transformación, la inclusión de cada una de estas variables exige que se empleen modelos matemáticos que reproduzcan el proceso real con la mayor exactitud posible.

2.2.5.2 Software a evaluar para la simulación.

MATLAB: de su abreviatura en inglés Matrix Laboratory, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE), con un lenguaje de programación propio. Creado por el matemático programador de

computadoras Cleve Moler en 1984, surgió la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de algebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M que es el empleado por este programa fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices sin la necesidad de usar Fortran.

Las aplicaciones de MATLAB se desarrollan en un lenguaje de programación propio mencionado anteriormente, este lenguaje es interpretado y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo como a través de un archivo script (archivo .m). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, calculo lambda y programación orientada a objetos. Gracias a estas funciones, MATLAB ofrece funciones en las cuales se puede visualizar datos tanto en 2D como en 3D. El principal programa de MATLAB es el Simulink.

Simulink es un entorno de programación visual el cual funciona sobre el entorno de programación MATLAB, es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje que interpreta MATLAB ya que este genera archivos con extensión .mdl, para luego poder apreciar un sistema de control automático, junto a su modelización y finalmente un sistema de un automóvil, vinculando la simulación a un entorno de realidad virtual. Simulink viene a ser una herramienta que presenta un cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos, es ampliamente empleado en la ingeniería sobretodo en la electrónica en lo que se refiere a temas relacionado con procesamientos digitales de señales, involucrando también temas específicos de ingeniería biométrica, telecomunicaciones de control y robótica.

ANSYS: desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de un software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinados productos bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otro software para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. En el año 1963 el Dr. John Swanson trabajó en los laboratorios nucleares de

Westinghouse en Pittsburgh. Él era el responsable del análisis del reactor nuclear junto a todos sus componentes, el empleo códigos computacionales para predecir las curvas de esfuerzos del rotor del reactor, el cual se veía afectado tanto por la presión como por la temperatura, con el pasar de los años Swanson fue afinando el método para poder ser empleado bajo geometrías en 3-D, análisis no lineales para deformaciones plásticas, análisis dinámico, y los códigos para análisis de transferencia de calor fueron avances efectuados por Wilson Aerojet, con el pasar del tiempo el Dr. Swanson quería una integración que hiciera del código una herramienta para disminuir el tiempo de cálculo y análisis de los ingenieros en la planta y en otras compañías, por lo que esta herramienta ahorraría mucho dinero a las mismas, el Dr. Swanson se hizo independiente y empezó a desarrollar el programa, que hoy en día se conoce como ANSYS.

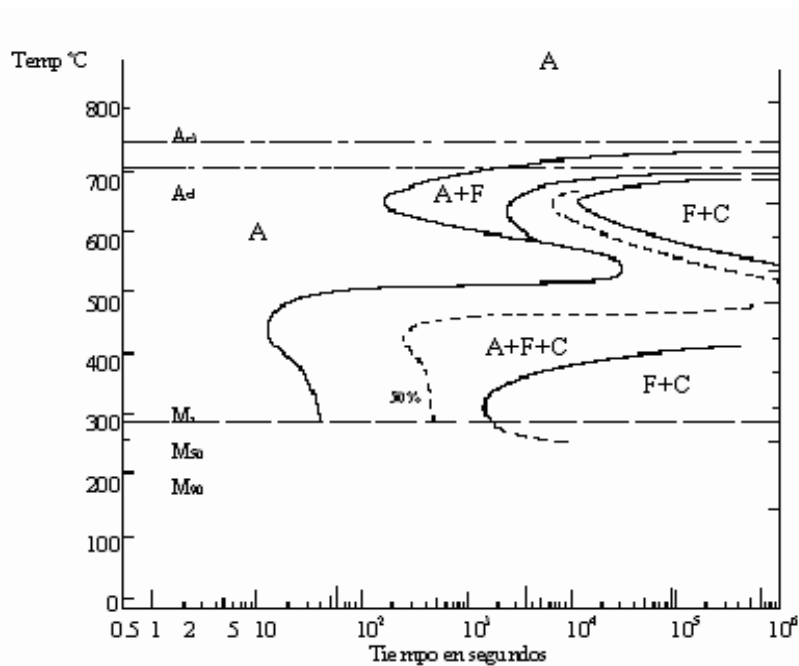


Figura 8. Diagrama TTT con la influencia de elementos aleantes.

La primera versión de ANSYS fue programada a finales de 1970, la planta nuclear de Westinghouse fue el primer cliente que usaba ANSYS como programa principal de análisis en el diseño, en un principio el empleo del programa requería de grandes ordenadores, hoy en día funciona en ordenadores de escritorio y realizan al mismo tiempo el análisis de diferentes fenómenos, como por ejemplo: termomecánica, electromecánica y mecánica estructural y algunos de los productos disponibles en el mismo son:

- ABAQUS.
- FLUENT.
- ANSYS.

2.3 Términos básicos:

- **Aleación:** Es la mezcla sólida homogénea de dos o más metales o de uno o más metales con algunos elementos no metálicos.
- **Acero:** Se emplea este término comúnmente para definir la mezcla que existe entre el hierro con una cantidad de carbono que puede variar entre el 0.03% y el 2.14% en masa de su composición, dependiendo del grado. Si la aleación posee una concentración mayor al 2.14%, se producen entonces las fundiciones, que oposición al acero, son mucho más frágiles y no es posible forjarlas sino que deben ser moldeadas.
- **Acero Hipereutectoide:** Se denomina a este tipo de aceros a aquellos cuyo porcentaje de carbono según el Diagrama Hierro-Carbono tienen un porcentaje de Carbono entre 0.77% y el 2.1%. Su constituyente principal es la Cementita.
- **Cementita:** También conocida como Carburo de Hierro (Fe_3C) se produce por efecto del exceso de carbono por sobre el límite de solubilidad. Posee una estructura cristalina ortorrómbica con doce átomos de hierro y cuatro átomos de carbono por cada celda.

- **Perlita:** Es la microestructura formada por capas o laminas alternadas de las dos fases de la aleación de hierro y carbono (ferrita alfa y cementita), la cual se genera durante el enfriamiento lento de este a temperatura eutectoide.
- **Ferrita alfa:** Es una estructura cristalina del hierro, la cual cristaliza en el sistema cubico centrado en el cuerpo y posee propiedades magnéticas.
- **Bainita:** es una mezcla de fases de ferrita y cementita, y su formación intervienen procesos de difusión.
- **Martensita:** esta fase se genera a partir de una transformación de fases sin difusión, a una velocidad que es muy cercana a la velocidad del sonido en el material.
- **Difusión:** es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando de esta forma la entropía del sistema conjunto formado por partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disuelven.
- **Dureza:** es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, abrasión, rayado, cortadura, deformaciones permanentes, entre otras.
- **Tenacidad:** es la energía de deformación total que puede absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto, por acumulación de dislocaciones.
- **Estructura cristalina:** es la forma solida en la cual se empaquetan u ordenan los átomos y que forman patrones repetitivos que se extienden en tres dimensiones.
- **Polimorfismo:** se da cuando un material presenta múltiples estructuras cristalinas las cuales son variables en función de la temperatura y de la presión.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico se encuentra orientado a determinar las técnicas, formas e instrumentos a utilizar para lograr los objetivos definidos, de manera que exista un sustento de forma metodológica para la realización sistemática de pasos con el fin de lograr los objetivos de la forma la favorable posible. Por consiguiente, el marco metodológico es necesario en toda investigación, y por ende, está determinado en el siguiente capítulo.

3.1 Tipo de investigación.

El tipo de investigación empleado en el siguiente proyecto es del “
y se encuentra sustentada en investigaciones del tipo: documental. Debido a que se emplea documentos de investigación anteriores que de forma directa o indirecta aportan información de sustento al proyecto, así como también es necesario el desarrollo de averiguaciones de campo, para la obtención de información de la realidad que se estudia.

La investigación de tipo “
la definió Ander-Egg, Esequiel en 1993 como “es la organización del trabajo de investigación y consiste en disponer de todas las operaciones necesarias para la realización de ese trabajo”.

Así mismo, Ruiz Olabuenaga, Jorge. Aistegui y Melgosa, Luis en el año 2002, definen este tipo de proyecto como “

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño de investigación constituya el plan general del investigador para conseguir una respuesta clara a sus interrogantes o comprobar una hipótesis de

investigación. El diseño de la investigación en el campo de la simulación de las curvas TTT para aceros hipereutectoides se encarga de detallar las estrategias básicas que el investigador adopta para conseguir información exacta y que se pueda interpretar. El diseño estratégico con el cual se van a obtener las respuestas a las preguntas realizadas son:

- Documentar.
- Simular.
- Comparar.

3.3 Nivel de investigación.

El nivel de investigación empleado en el siguiente proyecto es de tipo exploratoria, esto se basa en que este tipo de nivel de investigación posee muy poco o nulo campo de estudio en el cual se ha realizado avances.

3.4 Población y muestra.

La población Hurtado y Toro (2001), la definen como: “es la composición de todos los elementos a ser estudiados y a quienes podrán ser generalizados los resultados de la investigación, una vez concluida ésta, para lo que es necesario que la muestra con la cual se trabaje sea representativa de la población”. Por ende, la población será los diferentes porcentajes de carbono entre la cual se comprende los aceros hipereutectoides en los diagramas TTT que se tienen, los cuales son los Aceros AISI 1080, 1095 y 1095 Modificado, los cuales poseen 0.79%, 0.89% y 1.13% de Carbono respectivamente.

La muestra a emplear en este proyecto es una muestra del tipo no probabilística, donde Véliz, y Arredondo determinan en su trabajo de grado titulado **Aspectos Teóricos sobre tipos de Muestreo**, que este tipo de muestra es: “aquel tipo de muestra para el cual no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra (p. 30).”

Por lo tanto, la muestra seleccionada son: los aceros hipereutectoides que poseen 0.79%, 0.89% y 1.13% de Carbono que corresponden a los Aceros AISI 1080, 1095 y 1095 Modificado.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (1998) se define a la técnica de recolección de datos como “las observaciones que consisten en el registro sistemático, cálido y confiable de comportamientos o conductas”. Las técnicas para la recolección de datos son básicamente: revisiones bibliográficas, entrevistas, registros de prensa, observaciones directas, entre otras. Existen diversos instrumentos para la recolección de estos datos los cuales son: computadores, lápiz, hojas, grabadoras, fotografías, entre otras.

En el presente trabajo se contara con la utilidad de computadores para conseguir los datos necesarios para poder realizar la comparación con los diagramas TTT.

3.6 Fases metodológicas.

Fase I- investigar las ecuaciones a emplear

Método:

- Investigar las ecuaciones existentes que describan los diferentes comportamientos de las Curvas TTT que presentan los aceros hipereutectoides para un tratamiento térmico. Razón por la cual se realizó la investigación en la cual las ecuaciones rigieran el comportamiento de los aceros para la presencia de dos fases, las cuales son la cantidad de fases presentes en los aceros al carbono tal como lo son los aceros hipereutectoides.
- La investigación realizada fue efectuada en diferentes artículos de la simulaciones para aceros, en las cuales se encontró uno en particular titulado **Obtención del Diagrama de Transformación Isotérmica para un Acero Dual Phase**, en el cual se contemplan las ecuaciones de Kirkaldy para los aceros de dos fases, siendo así dichas ecuaciones las siguientes:

(1)

Donde:

%Mn: porcentaje de Manganeseo.

%Ni: porcentaje de Níquel.

%Cr: porcentaje de Cromo.

%Mo: porcentaje de Molibdeno.

N: tamaño de grano.

en °C.

R: Constante universal de los gases en J/K* mol .

T: Temperatura de estudio variando en el tiempo en °C.

e: número de Euler.

I: integral.

(2)

Donde:

%Mn: porcentaje de Manganeseo.

%Ni: porcentaje de Níquel.

%Cr: porcentaje de Cromo.

%Mo: porcentaje de Molibdeno.

N: tamaño de grano.

en °C.

T: Temperatura de estudio variando en el tiempo en °C.

Donde D viene representada por:

I: integral.

(3)

Donde:

R: constante universal de los gases en J/K* mol .

T: variación de la temperatura en el tiempo en °C.

e: número de Euler.

%Mo: porcentaje de Molibdeno.

$$\text{-----} * I \quad (4)$$

Donde:

%C: porcentaje de carbono.

%Cr: porcentaje de Cromo.

%Mo: porcentaje de Molibdeno.

N: tamaño de grano.

T: Temperatura de estudio variando en el tiempo en °C.

R: constante universal de los gases en J/K*mol.

I: integral

$$\text{-----} \quad (5)$$

Donde:

0.01: inicio de la fracción transformada.

0.99: final de la fracción transformada.

X: variable de la integral

Y para el cálculo de la temperatura Ms, en la misma referencia bibliográfica se consiguió una ecuación la cual describe el comportamiento de dicha temperatura en función de los elementos aleantes en el material, y que a medida que posee mayor cantidad de los mismos, esta temperatura se ve afectada en gran medida produciendo así una disminución del lugar en la cual va a encontrarse la temperatura de inicio de la martensita en el diagrama, la temperatura viene dada por la ecuación 6:

(6)

Donde:

%C: porcentaje de carbono.

%Mn: porcentaje de Manganeso.

%Ni: porcentaje de Níquel.

%Cr: porcentaje de Cromo.

%Mo: porcentaje de Molibdeno.

Fase II- seleccionar un programa para la resolución de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas TTT.

Método:

- Investigar sobre programas que sean capaces de dar solución a las ecuaciones investigadas y graficar los resultados. Para lo cual se requirió de un programa el cual fuera capaz de resolver ecuaciones diferenciales así como también que fuera capaz de graficar dichas ecuaciones y que al momento de ser necesario alterar algún valor, la interacción entre el usuario y el software fuera rápida y dinámica para maximizar la experiencia entre hombre y maquina.
- Seleccionar un programa que pueda resolver dichas ecuaciones y cuya complejidad a la hora de manejar sea baja para asegurar la dinámica entre hombre y software, de tal forma que sea rápido y sencillo el empleo del mismo así como también cuyo entorno virtual sea didáctico y explicativo a la vez que se emplean las ecuaciones en el mismo y se realizan las graficas.

Fase III – realizar simulaciones computarizadas de las curvas TTT de aceros hipereutectoides.

Método:

- Introducir las diferentes variables en el programa a emplear para poder realizar las simulaciones, variables de las cuales dependen las ecuaciones tales como los porcentajes de elementos aleantes, la constante universal de los gases, la variación de la temperatura, entre otros.
- Incluir las ecuaciones en el programa. Una vez incluidas las variables en el programa, adicionar las ecuaciones que emplean dichas variables.

- Obtener las curvas TTT para tres (3) tipos de aceros hipereutectoides empleando las ecuaciones que fueron introducidas en el programa.

Fase IV- comparar los resultados que se obtendrán en el programa con las curvas TTT experimentales.

Método:

- Se compararon los resultados obtenidos con los diagramas TTT existentes de la USS Steels para así constatar la similitud existente entre los diagramas experimentales y los obtenidos en forma de simulación y así comprobar el modelo establecido por Kirkaldy.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fase I- investigar las ecuaciones a emplear.

Al recolectar información para realizar la simulación de las curvas TTT de los aceros en general, se encontró que las ecuaciones que rigen el comportamiento de las mismas son en donde las representan, para calcular las curvas de de ferrita, de la perlita y de la bainita respectivamente, sustentadas en el trabajo titulado **“Obtención del Diagrama de Transformación Isotérmica para un Acero Dual Phase”**, en el cual empleando técnicas de calorimetría diferencial de barrido se midieron las temperaturas A_1 (696°C) y A_3 (875°C) para dos aceros de este tipo de composiciones químicas parecidas, que a partir de experiencias de tratamientos térmicos clásicos de transformación isotérmica de austenita subenfriada, se cuantificaron las diversas fases presentes en los aceros, empleando técnicas de microscopia, con estos resultados experimentales procedieron a compararlos empleando las ecuaciones de Kirkaldy que son las que veremos a continuación, en las cuales propuso un modelo sencillo para la generación de los diagramas empleando como bases a la termodinámica y cinética de materiales, para así comparar :

$$\text{-----} \tag{1}$$

$$\text{-----} \tag{2}$$

$$\text{- - - - -} \tag{3}$$

$$\text{-----*I} \tag{4}$$

Se debe de observar como las ecuaciones dependen de las cantidades de los elementos aleantes, dependiendo de tales elementos las curvas se verán afectadas como se explico en el capitulo dos (2), entre las páginas 26 y 27 del presente trabajo, incluso el mismo carbono que es el elemento principal a fusionar con el hierro es un elemento aleante, estos producen un desplazamiento en las mismas, tales compuestos harán que se muevan a la izquierda o a la derecha, obviamente el tamaño de grano especificado para el acero el cual es representado en las ecuaciones por “N” producirá un desplazamiento de igual forma que los aleantes y los llamados ΔT representan la diferencia entre la temperatura de estabilización de la fase para cada ΔT y la variación de temperatura desde la temperatura de calentamiento en que el material se encuentre totalmente austenizado hasta la temperatura de formación de martensita que es básicamente donde las curvas culminan de formarse, la variable “T” se obtiene de la siguiente forma:

$$\int_{T_0}^{T_f} \dots \quad (5)$$

Donde los límites de la integral se representan desde el inicio de transformación es decir desde el momento en que se empieza el crecimiento de fase hasta el punto final de crecimiento que es cuando generalmente se encuentra con otra porción de fase y hasta ese momento existe el crecimiento.

4.2 Fase II- seleccionar un programa para la resolución de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas TTT.

Como ya se nombró con anterioridad en el capítulo dos (2) entre las páginas 28 y 32, se investigó de dos programas que eran capaces de resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas TTT para los aceros, en esta fase se procederá a seleccionar el mejor de ambos para poder así entonces seguir con el proyecto de investigación y claro con los resultados.

Para poder resolver las ecuaciones y poder obtener las gráficas se empleó el programa "**Matlab**" debido a que primordialmente ya se tenían conocimientos previos del mismo, además de esto se suma el conocer y tener relación con un facilitador para la aclaración de dudas respecto al programa en conjunto con ser una herramienta dinámica la cual era capaz de resolver las ecuaciones de forma sencilla ya que para esto es que se emplea en gran medida así como también posee las herramientas para realizar la grafica de los valores obtenidos en la solución de las ecuaciones, como ya se explicó anteriormente esta es una herramienta computacional con una gran versatilidad, tanto para la resolución de ecuaciones diferenciales como también matrices y vectores hasta incluso llegar y emplear el método de elementos finitos el cual como ya se sabe es un método complejo que mediante ciertas condiciones puede predecir de manera muy aproximada lo que sucede en un proceso real, así pues con todas estas consideraciones se seleccionó dicho programa para poder efectuar lo que se deseaba realizar en el proyecto.

4.3 Fase III-realizar simulaciones computarizadas de las curvas TTT de aceros hipereutectoides.

Se realizaron simulaciones computarizadas empleando el programa ya seleccionado con anterioridad en el lapso de tiempo del 23 de Abril al 20 de Mayo del año 2017 con el propósito de obtener las gráficas de las curvas TTT de los aceros hipereutectoides seleccionados, para generar dichas curvas y así entonces poder realizar la comparación entre la simulación y las graficas que se tienen de forma experimental. Este análisis es una propuesta novedosa para la rama de materiales, la cual debe de obtener los resultados de forma empírica para así entonces proceder a plasmarlos en el papel.

Para poder empezar la simulación, primero se deben de plasmar en el programa las variables a emplear, las cuales afectaran las ecuaciones a utilizar para obtener la simulación de las curvas, algunas de estas variables son el tamaño de grano, las temperaturas de estabilización, los porcentajes de elementos aleantes, la temperatura de estudio la cual es variable, entre otros, los cuales son datos que afectan en gran

medida a las curvas, cosa que se verá a medida que esta parte del capítulo se desarrolle para entender de mejor forma como por ejemplo un cambio en la cantidad de elementos aleantes harán variar las curvas de una forma significativa, modificando tales curvas bien sea hacia a la izquierda o a la derecha. A continuación se muestra la inclusión de las variables en el programa (figura 9, 10 y 11) para los aceros AISI 1080, 1095 y 1095 modificado, la selección de tales materiales fue efectuada gracias a que se encontraban contemplados con todas sus propiedades en la USS, facilitando de esta forma el proceso por tener a la mano todos los datos necesarios para poder realizar las simulaciones y poder compararlas directamente con las experimentales. Se tiene que el porcentaje de los elementos como el Cromo, Molibdeno, Silicio y Níquel posee un valor de cero (0) en los tres casos debido en que en estos tipos de aceros no existen presencia de tales compuestos o en el caso de que existieran es en un porcentaje tan pequeño que se puede considerar despreciable. Hay que detallar como varia el porcentaje de Carbono y Manganeso en todos los casos, para así entonces observar que a pesar de que parezca un cambio pequeño afectan en gran medida el desarrollo de las curvas, no solo en si estas son más propensas a estar hacia la izquierda o derecha sino además de la forma misma que poseen.

```

1  %Discretización de las variables a afectar el efecto de la simulación
2  %de las curvas TTT
3
4  N=5;%Tamaño de grano del Acero
5  A1=723;%Temperatura crítica inferior
6  C=0.79;%Cantidad de Carbono presente en el Acero
7  Mn=0.76;%Cantidad de Manganeso presente en el Acero
8  Cr=0;%Cantidad de Cromo presente en el Acero
9  Si=0;%Cantidad de Silicio presente en el Acero
10 Mo=0;%Cantidad de Molibdeno presente en el Acero
11 Ni=0;%Cantidad de Níquel en el Acero
12 R=8.31447;%Constante Universal de los Gases en (J/K*mol)
13 Tf=700;%Temperatura de estabilización de la Ferrita para el Acero 1080
14 Tp=695;%Temperatura de estabilización de la Perlita para el Acero 1080
15 Ms=230;%Temperatura de Formación de Martensita (Finel de las curvas de Ferrita y Perlita) (Constante)
16 Ti=750:-1:Ms;%Temperatura de estudio, variando en 1°C hasta las temperatura de formación de Martensita
17

```

Figura 9. Inclusión de las variables que afectan las curvas TTT en Matlab para un Acero AISI 1080.

Hay que acotar además, que la variación de temperatura de estudio llega hasta la temperatura Ms porque es ahí hasta donde prácticamente las curvas existen, ya cuando están muy próximas a dicha temperatura o incluso cuando llegan a la misma las curvas básicamente dejan de producirse y no se desarrollan mas, ahora bien esta temperatura posee una ecuación para poderla representar la cual depende exclusivamente de los elementos aleantes presentes, que al fijarse en dicha ecuación a mayor cantidad de elementos aleantes más baja será esta temperatura de formación de martensita, la cual se representa por la ecuación 6.

```

Editor - C:\Users\Knibal\Desktop\Matlab Tesis\Curvasttt1095.m
Curvasttt1080.m x Curvasttt1095.m x Curvasttt1095Modificado.m x +
1 %Discretizacion de las variables a afectar el efecto de la simulacion
2 %de las curvas TTT
3
4 N=5;%Tamaño de grano del Acero
5 A1=723;%Temperatura critica inferior
6 C=0.89;%Cantidad de Carbono presente en el Acero
7 Mn=0.29;%Cantidad de Manganeso presente en el Acero
8 Cr=0;%Cantidad de Cromo presente en el Acero
9 Si=0;%Cantidad de Silicio presente en el Acero
10 Mo=0;%Cantidad de Molibdeno presente en el Acero
11 Ni=0;%Cantidad de Niquel en el Acero
12 R=8.31447; %Constante Universal de los Gases en (J/K*mol)
13 Tf=700;%Temperatura de estabilizacion de la Ferrita para el Acero 1080
14 Tp=695;%Temperatura de estabilizacion de la Perlita para el Acero 1080
15 Ms=230;%Temperatura de Formacion de Martensita
16 % (Final de las curvas de Ferrita y Perlita) (Constante)
17 Ti=750;-1:Ms; %Temperatura de estudio, variando en 1°C hasta las temperatura de formacion de Martensita
18

```

Figura 10. Inclusión de las variables que afectan las curvas TTT en Matlab para un Acero AISI 1095.

Empleando la ecuación ya descrita entonces se procedió a calcular las temperaturas Ms para los aceros a considerar en el proyecto, teniendo entonces así que para el acero 1080 la temperatura de formación de la martensita es de

aproximadamente 181.73°C, para el acero 1095 es de 153.71°C y para el acero 1095 modificado es próximo a los 50°C, hay que destacar como estos aumentos en la cantidad de Carbono y Molibdeno hacen que la temperatura de formación de martensita disminuya, lo que genera así una alteración en la templabilidad de los aceros. Luego de representar las variables en el programa se procedió a entonces introducir las ecuaciones ya descritas al inicio del capítulo, representadas en las figuras 12, 13, 14 y 15.

(6)

Se debe señalar que en las ecuaciones de cada una de las curvas en todos los aceros se encuentran multiplicadas por un factor que en el caso del AISI 1080 es de 10^4 para las ecuaciones de formación de ferrita y perlita, esto se debe a que al momento de realizar las curvas, se encuentran en un rango en la escala logarítmica de tiempo que es simplemente a falta de palabras, absurdo, pues la escala alcanza los valores en los cuales se representa es de incluso de 10^{-5} , debido a que el modelo de Kirkaldy no contempla tales factores que se debieron de tener en cuenta para realizar las simulaciones, de igual forma todo esto se verá representado más adelante cuando se representen las curvas obtenidas en la simulación, para tener una idea más clara del porque estos factores, de igual forma se realiza en los llamados “tauprom” que simplemente son las curvas que representan el 50% de las transformaciones, que al no ser ecuaciones lineales presentan ciertas distorsiones al momento de ser representadas por un promedio y es por ello que se les multiplica por diferentes factores propios tomados de forma experimental de manera que pudieran adaptarse y concordaran con las establecidas por la USS y realizar las comparaciones, todo esto se detalla a medida que el proyecto avance.

En el caso de la representación de la curva bainítica se toma el factor de 10^{-2} debido a lo alejada que se encuentra la curva de las demás, es decir encontrándose de manera muy próxima hacia el lado derecho.

```

Editor - C:\Users\Knibal\Desktop\Matlab Tesis\Curvasttt1095Modificado.m
Curvasttt1080.m x Curvasttt1095.m x Curvasttt1095Modificado.m x +
1 %Discretizacion de las variables a afectar el efecto de la simulacion
2 %de las curvas TTT
3
4 - N=7;%Tamaño de grano
5 - A1=723;%Temperatura critica inferior
6 - C=1.13;%Cantidad de Carbono
7 - Mn=0.30;%Cantidad de Manganeso
8 - Cr=0;%Cantidad de Cromo
9 - Si=0;%Cantidad de Silicio
10 - Mo=0;%Cantidad de Moligdeno
11 - Ni=0;%Cantidad de Niquel
12 - R=8.31447; %Constante Universal de los Gases
13 - Tf=780;%Temperatura de estabilizacion de la Ferrita
14 - Tp=770;%Temperatura de estabilizacion de la Perlita
15 - Ms=230;%Temperatura de Formacion de Martensita (Final de las curvas de Ferrita y Perlita)
16 - Ti=800:-1:Ms; %Temperatura de estudio, variando en 1°C hasta las temperatura de formacion de Martensita
17

```

Figura 11. Inclusión de las variables que afectan las curvas TTT en Matlab para un Acero AISI 1095 Modificado.

```

Curvasttt1080.m* x Curvasttt1095.m x Curvasttt1095Modificado.m x +
18 %Discretizacion de las ecuaciones a emplear para poder realizar la
19 %simulacion de los aceros
20 |
21 %Fraccion de volumen transformado
22 - fun=@(x)1./(x.^(2.*(1-x)./3).*(1-x).^(2.*x./3));
23 - I=integral(fun,0.01,0.999);
24
25 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
26 - Df=exp(-23500./(R.*Ti));
27 - tauf=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*((Tf-(Ti)).^3.).*Df).*I).*10^6;
28
29 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Perlita
30 - sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)./(exp(37000./(R.*Ti)));
31 - Dp=sp.^-1;
32 - taup=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I.*10^6;
33
34 %Ecuacion para la graficacion del 50% de austenita transformada
35 - tauprom=((tauf+taup)./2)*10^-0.12;

```

Figura 12. Inclusión de las ecuaciones para el acero AISI 1080

```

19 %Discretizacion de las ecuaciones a emplear para poder realizar la
20 %simulacion de los aceros
21
22 %Fraccion de volumen transformado
23 fun=@(x)1./(x.^(2.*(1-x)./3).*(1-x).^(2.*x./3));
24 I=integral(fun,0.01,0.999);
25
26 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
27 Df=exp(-23500./(R.*Ti));
28 tauf=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*((Tf-(Ti)).^3).*Df).*I).*10^6;
29
30 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Perlita
31 sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)./(exp(37000./(R.*Ti)));
32 Dp=sp.^-1;
33 tau= (1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I.*10^6;
34
35 %Ecuacion para la graficacion del 50% de austenita transformada
36 tauprom=((tauf+tau)./2).*10^-0.07;

```

Figura 13. Inclusión de las ecuaciones para el acero AISI 1095

Para empezar entonces se procedió a graficar las curvas sin estas poseer los factores ya mencionados para poder entonces ver como se representan en el programa y observar los valores que quizás para algunos sean sin sentido por el rango de tiempo tan pequeño en los cuales son mostradas, esto anteriormente explicado se puede apreciar en las figuras 16 y 17 para el acero AISI 1080.

Como se puede apreciar, en la escala logarítmica que es donde se representa el tiempo transcurrido para que ocurra el cambio de microestructura en segundos, este tiempo es tan pequeño que incluso llega a un valor de hasta 10^{-4} , lo cual es como ya se dijo antes un tiempo absurdo en el cual dice que está ocurriendo la transformación, por esta razón se multiplican las ecuaciones por 10^4 para así entonces llevarlas a una escala de tiempo la cual tendrá mayor sentido, es decir, que el punto de partida del tiempo se encuentre a como mínimo 10^{-1} segundos, el cual es un valor ya bastante aceptable para las curvas de transformación. Ya una vez entendido esto, se representó entonces las

mismas figuras pero esta vez empleando el factor de 10^4 en las ecuaciones para detallar como estas se modifican, ver figuras 18 y 19.

```

Editor - C:\Users\Kriba\Desktop\Matlab Tesis\Curvastt1095Modificado.m*
Curvastt1080.m x Curvastt1095.m x Curvastt1095Modificado.m* x +
18 %Discretizacion de las ecuaciones a emplear para poder realizar la
19 %simulacion de los aceros
20
21 %Fraccion de volumen transformado
22 - fun=@(x)1./(x.^(2.*(1-x)./3).*(1-x).^(2.*x./3));
23 - I=integral(fun,0.01,0.999);
24
25 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
26 - Df=exp(-23500./(R.*Ti));
27 - tauf=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*((Tf-(Ti)).^3.*Df).*I).*10^6;
28
29 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Perlita
30 - sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)./(exp(37000./(R.*Ti)));
31 - Dp=sp.^-1;
32 - taup=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I.*10^6;
33

```

Figura 14. Inclusión de las ecuaciones para el acero AISI 1095 Modificado.

Se puede ver entonces como mejora enormemente la grafica al realizar esta acción, por lo que para efectos prácticos se seguirá haciendo esto a lo largo del proyecto para representar en una escala mucho más aceptable las curvas y así además acercarnos de manera mucho más acertada a lo que se encuentra representado en las graficas experimentales de los aceros, se debe señalar que estas curvas y este factor de 10^4 son exclusivamente para el Acero AISI 1080, puesto que los otros aceros poseen un comportamiento diferente en las curvas y por lo tanto en la escala de tiempo en las cuales las mismas se grafican.

Para comprender mejor como varia la escala para el acero AISI 1095 se deben observar las figuras 20 y 21, en las cuales se pueden constatar las ecuaciones tal como estas son descriptas y también los resultados de graficar dichas ecuaciones respectivamente, se puede entonces ver un cambio notorio en las curvas,

primordialmente debido a la cantidad de elementos que se encuentran mezclados con el acero, las temperaturas de estabilización de las fases así como también el cambio en la temperatura Ms, como ya se mencionó anteriormente, a medida que existen más elementos en conjunto con el acero, la templabilidad del mismo se verá afectado en gran medida consiguiendo así que dicha propiedad sea expresado de alguna forma, la capacidad de alcanzarla sea más dificultosa a no ser que sufra un enfriamiento lo suficientemente brusco como para poder lograr así alcanzar la temperatura Ms que es donde se alcanza la máxima templabilidad si por supuesto lo que se desea es llegar a ella y tener las propiedades que se consiguen al llegar a este punto en adelante, además de todo esto existe un cambio bastante notorio en la escala de tiempo para que las curvas alcancen la temperatura Ms y se detenga la transformación.

```

33
34 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Austenita mas Cementita
35 bs=830-270.*(C)-90.*(Mn);
36 Dc=exp(-27500./(R.*Ti));
37 taub=((2.3+10.*C).*10^4)/((6.*2.^(N./8)).*((bs-Ti).^2).*Dc)).*I*10^-2;
38
39 %Ecuacion para la graficacion del 50% de austenita transformada
40 tauprom=((tauf+taup)/2).*10^-0.07;
41

```

Figura 15. Continuación de la inclusión de las ecuaciones para el acero AISI 1095 Modificado.

```

Curvastt1080.m  Curvastt1095.m  Curvastt1095Modificado.m  +
- Ti=750:-1:Ms; %Temperatura de estudio, variando en 1°C hasta las temperatura de formacion de Martensita
%Discretizacion de las ecuaciones a emplear para poder realizar la
%simulacion de los aceros
%Fraccion de volumen transformado
- fun=@(x)1./(x.^(2.*(1-x)./3)).*(1-x).^(2.*x./3);
- I=integral(fun,0.01,0.999);
%Ecuacion para la transformacion de austenita en ferrite
- Df=exp(-23500./(R.*Ti));
- tauf=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)/(6.*2.^(N./8)).*((Tf-(Ti)).^3)).*Df).*I);
%Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
- 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;

```

Figura 16. Ecuaciones para curvas de Acero AISI 1080 sin factor 10^4 .

Como se puede apreciar en la figura 21, la escala de tiempo para que las curvas de transformación alcancen la temperatura Ms es a falta de palabras, demasiado amplia además de empezar en un intervalo de tiempo muy pequeño, ahora bien si se realiza una multiplicación a dichas ecuaciones con un factor de 10^4 como se muestra en la figura 22, para llevar la nariz de la curva a un valor próximo de 10^{-1} pues como se puede apreciar el valor más pequeño que alcanza la escala es de 10^{-5} segundos, lo cual en la realidad es algo prácticamente imposible de alcanzar para las transformaciones de un acero, en el caso de la curva de la bainita, lo más factible es que esta se encuentre más próxima al inicio de la escala, por lo cual a la ecuación se le multiplica por un factor de 10^{-2} para aproximarla mucho más a este punto y así tener una curva bastante aproximada a la curva experimental, se puede evidenciar entonces una notoria mejora a un valor mucho más aceptable y real al momento de realizar la simulación (ver figura 23).

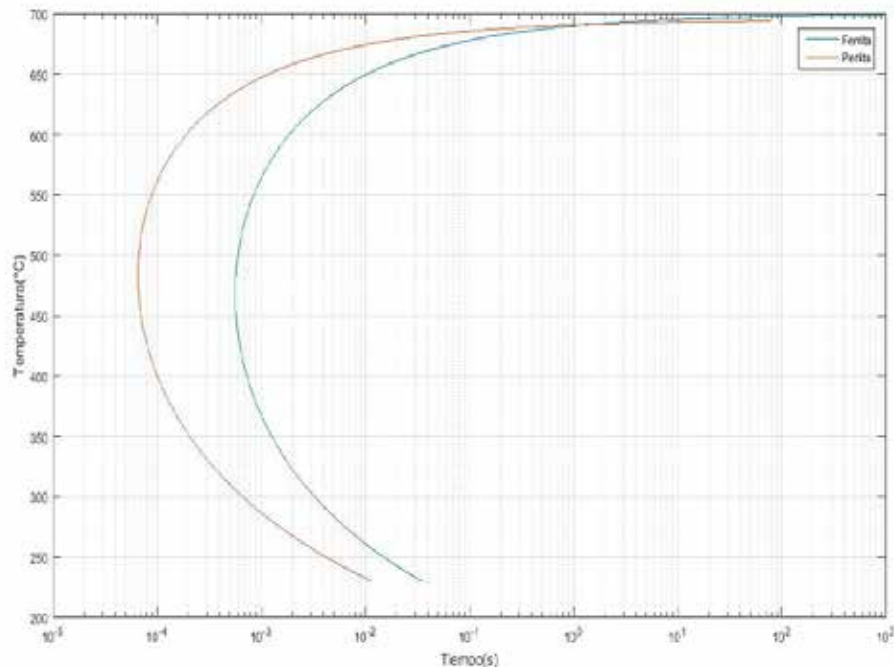


Figura 17. Grafica de las curvas TTT para Acero AISI 1080 sin factor 10^4 .

```

24
25 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
26 - Df=exp(-23500./(R.*Ti));
27 - tauf=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)/(6.*2.^(N./8).*((Tf-(Ti)).^3).*Df).*I).*10^4;
28
29 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Perlita
30 - sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)/(exp(37000./(R.*Ti)));
31 - Dp=sp.^-1;
32 - taup=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))/(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I.*10^4;
33

```

Figura 18. Ecuaciones para curvas de Acero AISI 1080 con facto 10^4 .

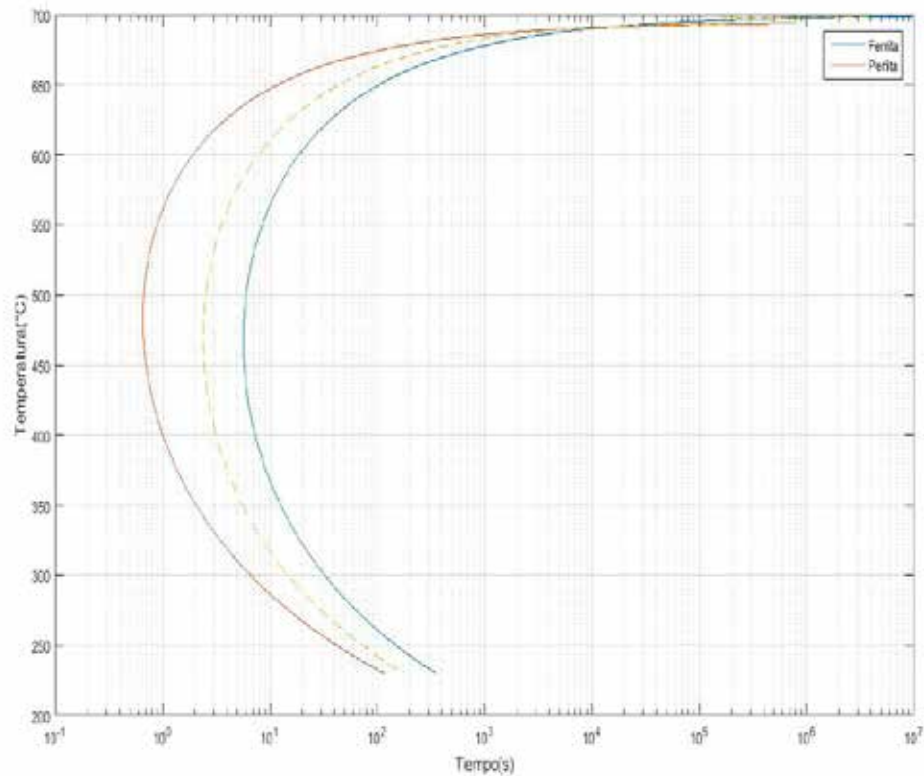


Figura 19. Grafica de las curvas TTT para Acero AISI 1080 con factor 10^4 .

```

Editor - C:\Users\Kniba\Desktop\Matlab Tesis\Curvastt1095Modificado.m
Curvastt1080.m x Curvastt1095.m x Curvastt1095Modificado.m x GraficoCte.m x +
27
28 %Fraccion de volumen transformado
29 fun=@(x)1./(x.^(2.*(1-x)./3).*(1-x).^(2.*x./3));
30 I=integral(fun,0.01,0.999);
31
32 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
33 Df=exp(-23500./(R.*Ti));
34 tauf=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*((If-Ti).^3).*Df).*I);
35
36 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Perlita
37 sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)./(exp(37000./(R.*Ti)));
38 Dp=sp.^-1;
39 taup=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I;
40
41 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Austenita mas Cementita
42 bs=830-270.*(C)-90.*(Mn);
43 Dc=exp(-27500./(R.*Ti));
44 taub=((2.3+10.*C).*10^4)./(6.*2.^(N./8).*((bs-Ti).^2).*Dc).*I;
45

```

Figura 20. Ecuaciones para las curvas del Acero AISI 1095 Modificado

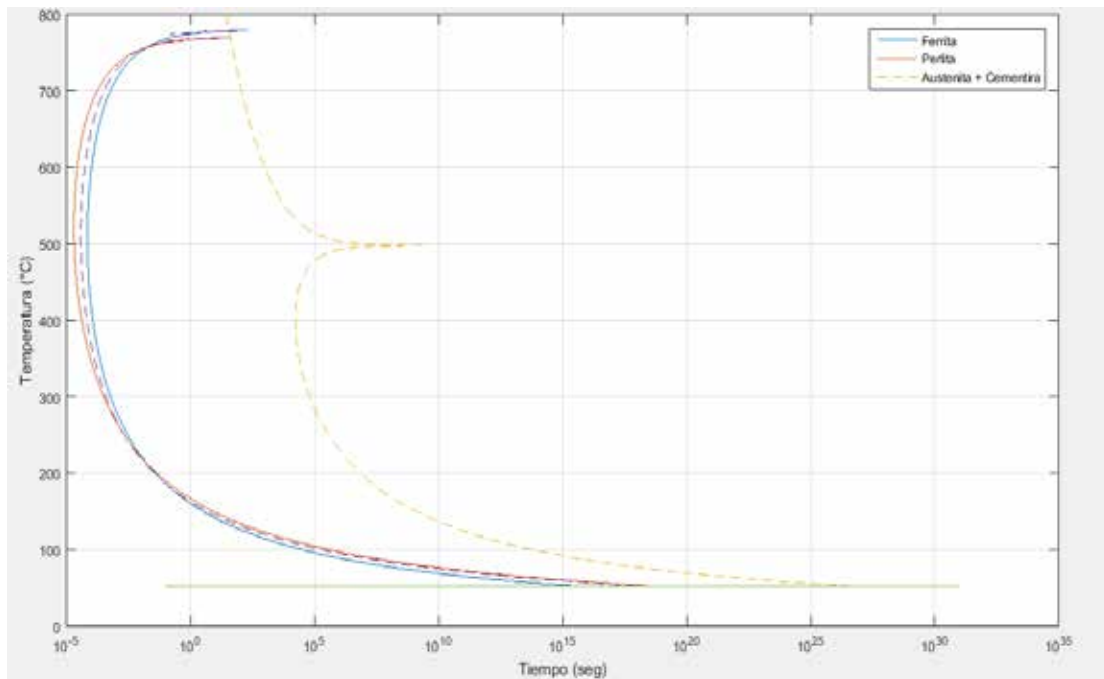


Figura 21. Grafica de las ecuaciones para Acero AISI 1095 Modificado

```

Editor - C:\Users\Knibal\Desktop\Matlab Tesis\Curvasttt1095Modificado.m*
Curvasttt1080.m x Curvasttt1095.m x Curvasttt1095Modificado.m* x GraficoCte.m x +
28 %Fraccion de volumen transformado
29 fun=@(x)1./(x.^(2.*(1-x)./3).*(1-x).^(2.*x./3));
30 I=integral(fun,0.01,0.999);
31
32 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Ferrita
33 Df=exp(-23500./(R.*Ti));
34 tauF=((60.*Mn+2.*Ni+68.*Cr+244.*Mo)./(6.*2.^(N./8).*(Tf-(Ti)).^3.*Df).*I).*10^5;
35
36 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Perlita
37 sp=1./(exp(-27500./(R.*Ti)))+(0.5.*Mo)./(exp(37000./(R.*Ti)));
38 Dp=sp.^-1;
39 tauP=(1.8+5.4.*(Cr+Mo+4.*Mo.*Ni))./(6.*2.^(N./8).*(Tp-Ti).^3.*Dp).*I.*10^5;
40
41 %Ecuacion para la transformacion de austenita en Austenita mas Cementita
42 bs=830-270.*(C)-90.*(Mn);
43 Dc=exp(-27500./(R.*Ti));
44 tauB=((2.3+10.*C).*10^4)./(6.*2.^(N./8).*(bs-Ti).^2.*Dc)).*I*10^-2;
45

```

Figura 22. Ecuaciones de las curvas TTT para el Acero AISI 1095 Modificado con factores 10^4 y 10^{-2} .

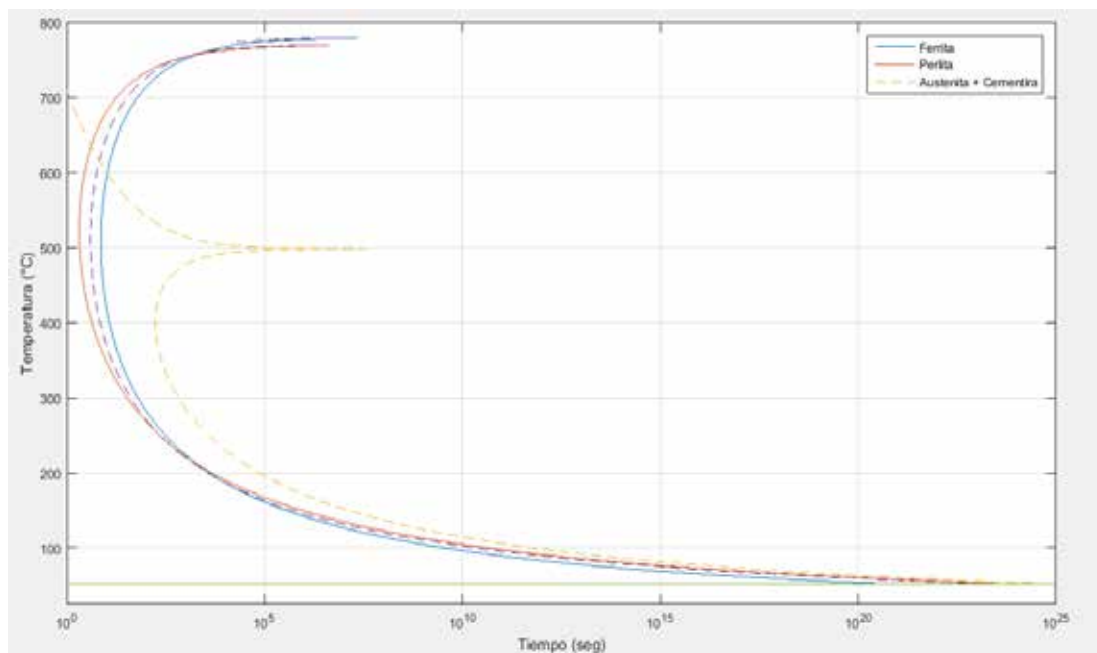


Figura 23. Grafica de las curvas TTT del Acero AISI 1095 Modificado con los factores 10^4 y 10^{-2} .

Para tener una mejor visión de la curva TTT para el acero AISI 1095 Modificado, en la figura 24 se encuentra representada dicha curva pero esta vez con una escala de tiempo que va desde el 10^{-1} hasta 10^6 , para así entonces verla de forma más detallada y verificar que la misma se asemeja en gran medida a la curva experimental con la cual se va a comparar más adelante del proyecto y además constatar que aunque lo ideal sería trabajar con esta escala de tiempo, para efectos del presente trabajo y las discusiones a plantear serán en referencia utilizando la escala de tiempo más amplia en la cual las curvas llegan hasta la temperatura M_s y una vez ahí deja entonces el proceso de simulación de ejecutarse, se debe destacar que esta escala de tiempo en la cual se efectúa todo el proceso como es evidente, demasiado grande, cosa que se debe tener en consideración.

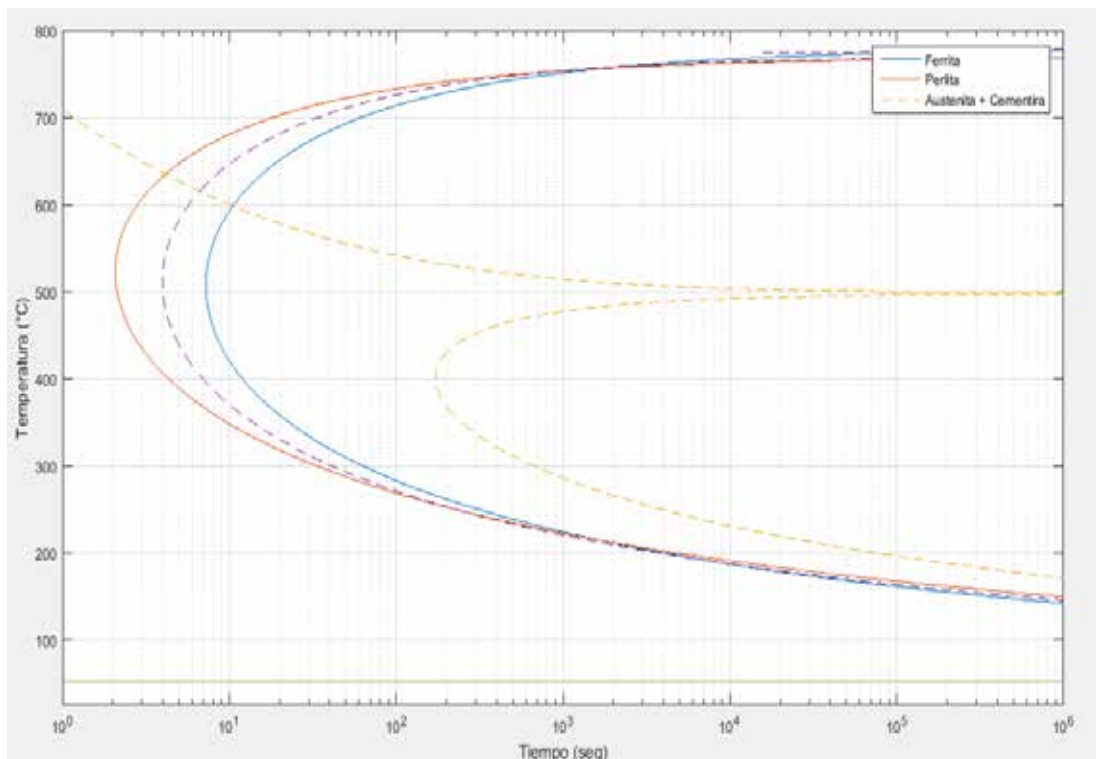


Figura 24. Grafica de curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado con escala de tiempo hasta 10^6 segundos.

Una vez representadas todas estas consideraciones, se procedió a modificar las curvas alterando la cantidad de elementos aleantes para saber cómo se modifican las mismas en presencia de mayor cantidad de tales elementos, sin modificar sus cantidades de Carbono y de Manganeso pero agregando Cromo, Níquel, Silicio y Molibdeno, por lo cual a el Acero AISI 1080 se le agregará 0,6% de Cromo, 0,4% de Níquel, 0,3% Silicio y 0,3% Molibdeno para así comprobar cómo se modifican las curvas, tales cantidades de los elementos fueron seleccionados para representar como la adición de pequeñas cantidades de tales compuestos hacen variar las curvas y por supuesto la temperatura M_s , en las figuras 25 se representa el Acero AISI 1080 solo con el 0.79% de Carbono y 0.76% de Manganeso que al mismo le corresponde, mientras que en la figura 26 se representa el mismo Acero AISI 1080 con la cantidad de elementos aleantes ya especificados, y así entonces ver como se diferencian entre ambas, en la figura 26 se aprecia como a diferencia de en la figura 25 las curvas se encuentran con tendencia más a la derecha, dando así más amplitud para alcanzar la velocidad crítica de enfriamiento, la cual es la máxima velocidad con la cual se produce la martensita sin que se produzca otra microestructura, es decir cuando pasa básicamente tangente a la curva de formación ferrítica.

Pues bien, este es el efecto que ocasionan los aleantes para este acero, también se aprecia claramente una diferencia en la temperatura M_s en la cual en la figura 26 es ligeramente menor a la representada en la figura 25, debido a que como ya se mencionó anteriormente en el marco metodológico, en la página 37, el efecto de los aleantes modifican esta temperatura, en este caso la temperatura M_s disminuyó de 182°C a aproximadamente 163°C , una diferencia de 19°C por lo que se evidencia que la presencia de mayor cantidad de aleantes no solo altera el lugar en donde se desarrollan las curvas sino que además hace variar en buena medida la temperatura a partir de la cual empieza la transformación martensítica, lo que genera adicionalmente que las graficas se desarrollen por un periodo mayor de tiempo al disminuir esta temperatura, como ya se sabe las curvas dejan de generarse básicamente en el momento en el que alcanzan a tocar a la temperatura M_s .

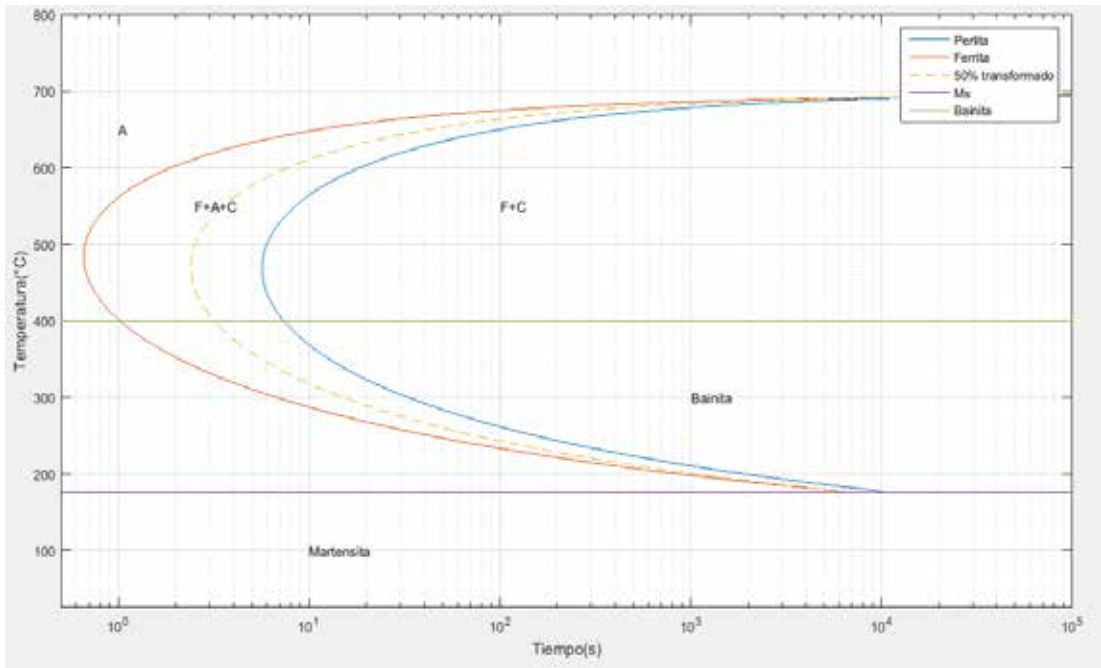


Figura 25. Curvas TTT para Acero AISI 1080 con 0.79%C y 0.76% Mn.

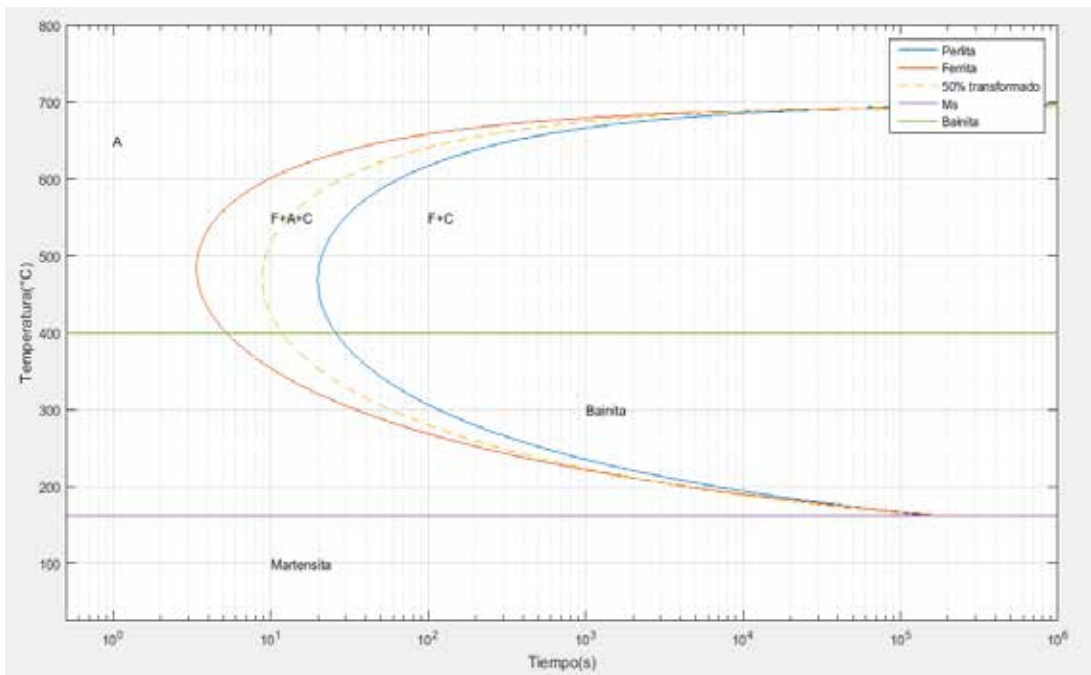


Figura 26. Curvas TTT para Acero AISI 1080 con 0.79%C, 0.76% Mn, 0.6% Cr, 0.4% Ni, 0.3% Si y 0.3% Mo.

Una vez mostrado que efecto tienen los aleantes para este acero en particular entonces se procedió a también modificar la presencia de dichos elementos en los otros aceros en estudios (Acero AISI 1095 y 1095 Modificado), los valores de los elementos involucrados pasaran a ser los mismos que para el Acero AISI 1080 a excepción por supuesto de su contenido de Carbono y de Manganeso que como ya se sabe para cada tipo de aceros estos varían para darles las propiedades que particularmente poseen cada uno, en la figura 27 se representa el Acero AISI 1095 con sus condiciones iniciales, es decir 0.89% de Carbono y 0.29% de Manganeso y 0% de los demás elementos aleantes (Cr, Ni, Si y Mo) y en la figura 28 se representa el mismo acero con las mismas condiciones iniciales pero adicionalmente con presencia de 0.6% Cromo, 0.4% Níquel, 0.3% Silicio y 0.3% Molibdeno, se debe recordar que estos valores de los demás elementos aleantes fueron tomados de manera arbitraria con el único fin de mostrar el efecto que los mismos producen en el acero. Se puede apreciar en los resultados obtenidos que los establecido en la teoría se sustenta también en la parte de la simulación, en la cual la presencia de más elementos alteran en gran medida la ubicación de la curva y en algunos casos la forma de la misma.

Como se evidencia en la figura 28, y al igual que en el Acero AISI 1080 la temperatura Ms disminuyó levemente, desde casi 154°C a aproximadamente 137°C, además de obviamente las curvas encontrarse levemente más hacia la derecha y aumentando también la escala de tiempo en la cual se desarrollan hasta alcanzar la temperatura de formación de la martensita, produciendo que la escala de tiempo aumente hasta 10⁸ segundos. Por último aplicando el mismo procedimiento, en la figura 29 se evidencia el Acero AISI 1095 Modificado con las condiciones iniciales ya descritas con anterioridad mientras que en la figura 30 se observa al mismo acero pero en lugar de tener 0% de Cr, Ni, Si y Mo, presentara los mismos porcentajes que los otros aceros, finalizando así la muestra para los tres casos de cómo es el comportamiento que infligen en ellos la adición de más elementos a su composición química.

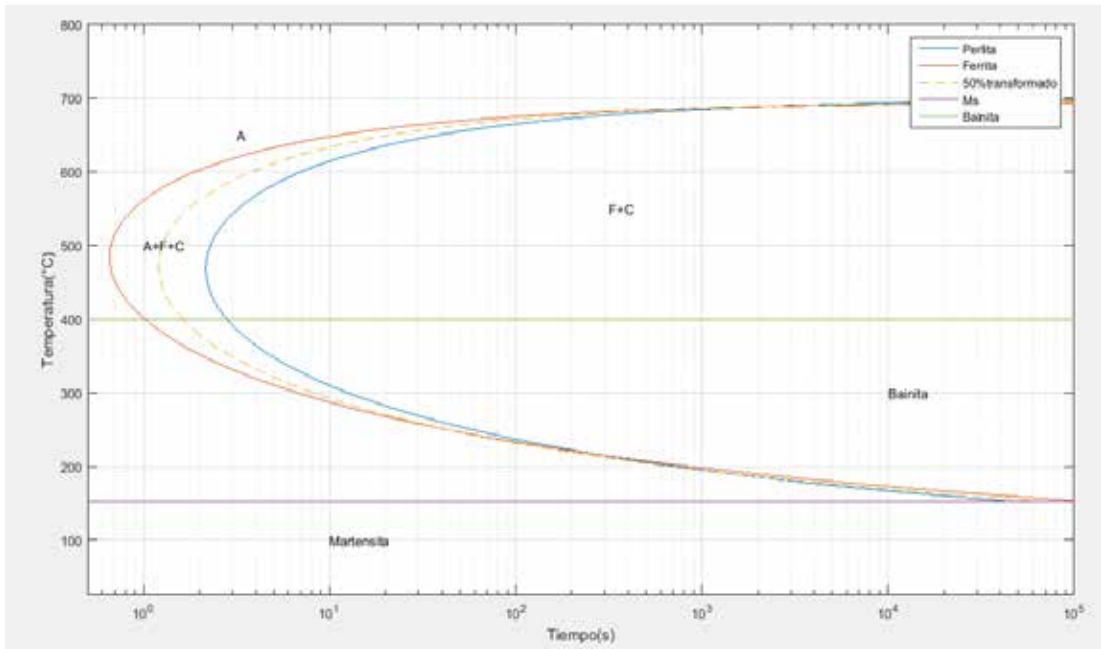


Figura 27. Curvas TTT para Acero AISI 1095 con 0.89% C y 0.29% Mn

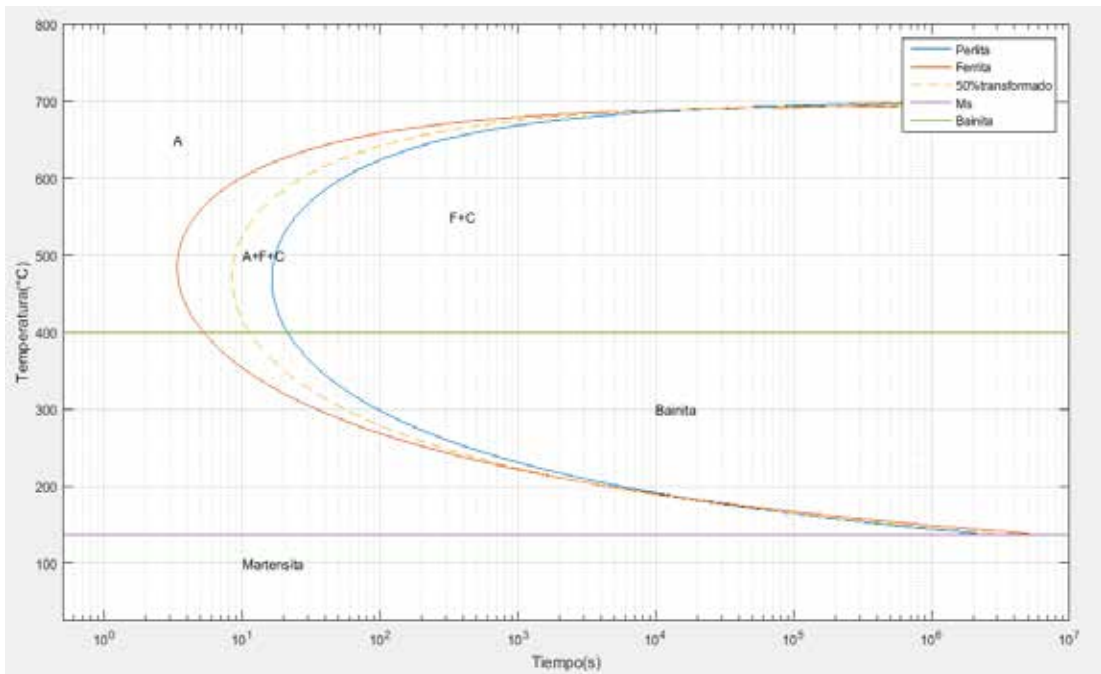


Figura 28. Curvas TTT para Acero AISI 1095 con 0.89% C, 0.29% Mn, 0.6% Cr, 0.4% Ni, 0.3% Si y 0.3% Mo.

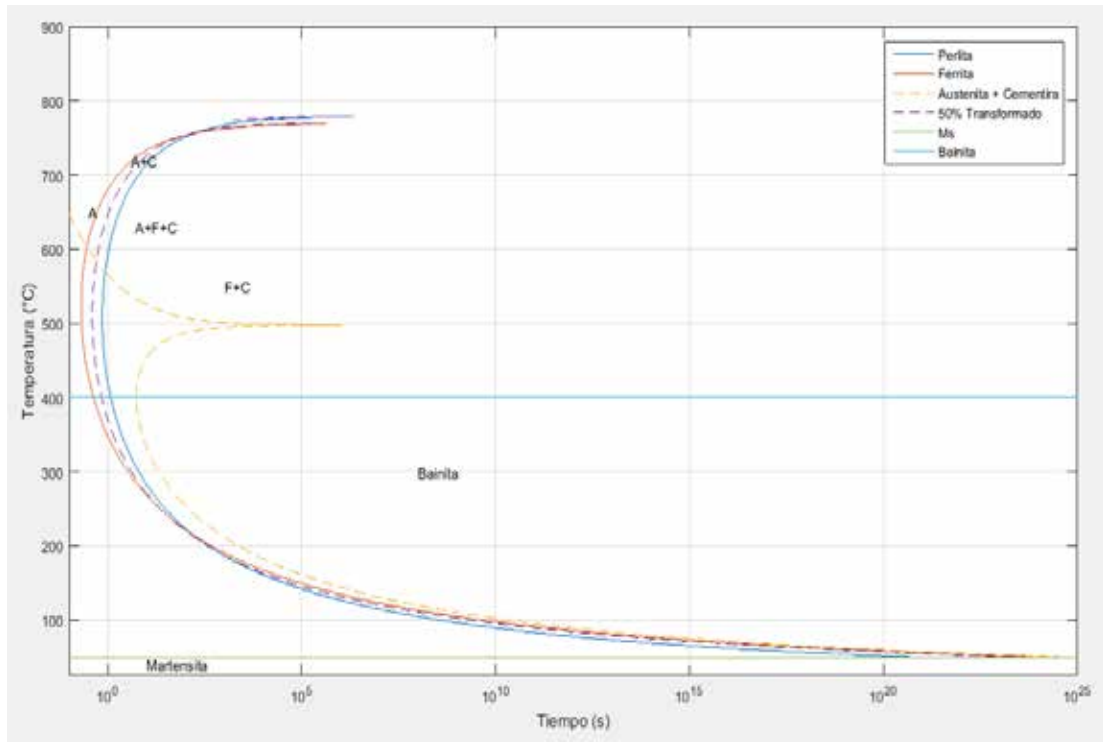


Figura 29. Curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado con solo 1.13% C y 0.30% de Mo.

Para finalizar esta parte del proyecto, en la figura 30 se puede apreciar por supuesto al igual que en las demás un leve cambio en el desempeño de las curvas, en las cuales al igual que en los casos anteriores las mismas se encuentran desplazadas más hacia la derecha, la recta de la temperatura Ms es ligeramente inferior, cercana a los 35°C en diferencia a los 50°C en los cuales antes de la adición de los demás elementos aleantes se encontraba, esto se debió a que en presencia de mayor cantidad de tales compuestos, la templabilidad del acero se vio afectada ocasionando tales cambios, ganando tiempo para que pueda ocurrir la transformación martensítica a costa de la disminución de la temperatura Ms, dificultando que se pueda obtener martensita en su 100%. Por último y quizás la diferencia más significativa es el gran prolongamiento que sufre la curva para poder alcanzar a la recta de formación de la martensita en conjunto con la gran diferencia en la escala de tiempo la cual aumenta

desde básicamente 10^{25} hasta llegar hasta un poco mas de 10^{35} . Ya una vez demostrado como alteran los elementos aleantes a las curvas, entonces ahora se puede proceder a mostrar las curvas simuladas de los aceros seleccionados para así poder compararlas con las curvas experimentales y poder dar un análisis enfocado al comportamiento que estas sufren en comparación a las curvas experimentales, por supuesto todo esto anteriormente realizado tuvo como propósito primero demostrar cómo funcionan las ecuaciones de Kirkaldy y también demostrar de forma didáctica que efecto tienen los aleantes al ser agregados en los aceros, demostrando además que en la simulación se cumple lo que se encuentra fundamentado en la teoría del efecto que tienen tales elementos al ser agregados en la aleación.

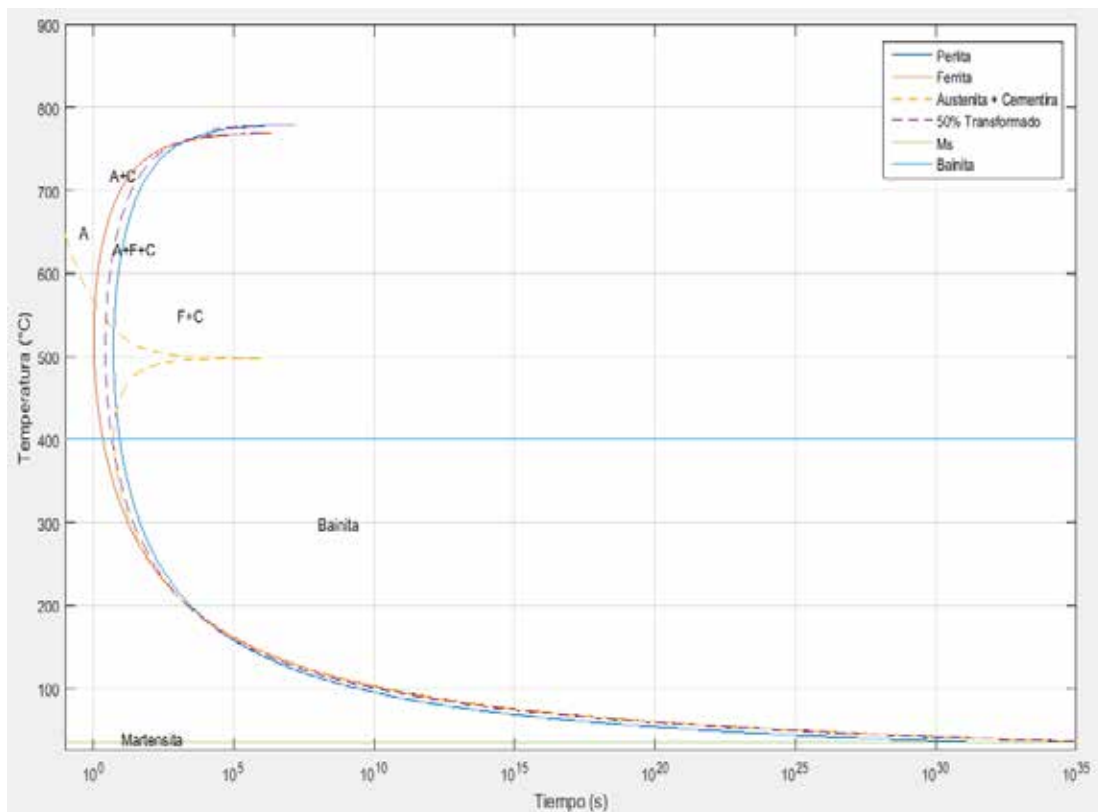


Figura 30. Curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado con 1.13% C, 0.30% Mn, 0.6% Cr, 0.4% Ni, 0.3% Si y 0.3% Mo.

Ahora que todo lo anterior fue aclarado, entonces se procedió a mostrar de forma definitivas las curvas a emplear para la realización de la comparación entre las curvas experimentales y las obtenidas empleando el modelo de Kirkaldy, para entonces saber si este modelo cumple la simulación para los aceros hipereutectoides, es decir si los resultados se encuentran por supuesto no de forma exacta a los experimentales pero si se encuentran bastantes próximos o por el contrario se encuentran totalmente alejados de lo que verdaderamente ocurre en tales aceros al momento de producirse las fases, por lo que en las figuras 31, 32 y 33 se mostraran las simulaciones definitivas del modelo de Kirkaldy mediante las cuales se realizará la comparación con las curvas experimentales que se tienen para los mismos aceros.

La bainita para los aceros al carbono, se encuentra al lado derecho de la curva de transformación perlítica, formándose en un rango de temperatura que va desde los 400°C hasta la temperatura Ms, en el presente trabajo no existe inconveniente para la representación de tal compuesto en los Aceros AISI 1080 y 1095, pero en el 1095 Modificado, quizás exista un problema de comprensión entre la curva que se expresa para representar el comportamiento y la recta misma de la bainita, por tal motivo es necesario explicar el empleo de la misma, habiendo representado las curvas en el programa no se encontró problema aparente en los dos primeros caso, pero en el último caso no existía una ecuación la cual ayudara a simular el comportamiento singular que tiene la curva del Acero AISI 1095 Modificado, el cual a pesar de que sus curvas de transformación para la ferrita y perlita no poseían ningún inconveniente al momento de ser simuladas, no había una representación que ayudara a observar el comportamiento ^{3C}), comportamiento que se tiene en las curvas experimentales, es por ello que se empezó a tantear con las ecuaciones de la bainita, para observar que comportamiento poseían las mismas en el programa, obteniendo que para el caso de este acero en particular, tiene una tendencia bastante próxima a la curva experimental hasta el punto en el cual toca a la curva de formación ferrítica.

En el presente proyecto dejó plasmado el comportamiento que posterior a tocar la curva ferrítica, posee la curva de la bainita que en este caso se empleo para representar la formación como ya se mencionó de austenita mas cementita, para que en el caso de futuros proyectos, las personas tengan conocimientos de que es lo que se deseó plasmar en este como tal y no se encuentren con una situación que genere confusión. Por lo tanto se puede destacar que el modelo de Kirkaldy para la ecuación de la bainita y en particular para el caso del Acero AISI 1095 Modificado, sirve de manera casi idónea la presentación de la curva de formación de austenita mas cementita, razón por la cual se siguió usando para fines prácticos y así poder seguir con el trabajo aquí planteado, por supuesto esta representación no es del todo exacta, incluso en comparación al comportamiento que posee la curva experimental, es un tanto amplia la diferencia, cosa que se verá un poco más delante de la discusión de los resultados obtenidos, en especifico en la fase final del capítulo en la cual se procede a comparar las curvas obtenidas en la simulación con las curvas experimentales.

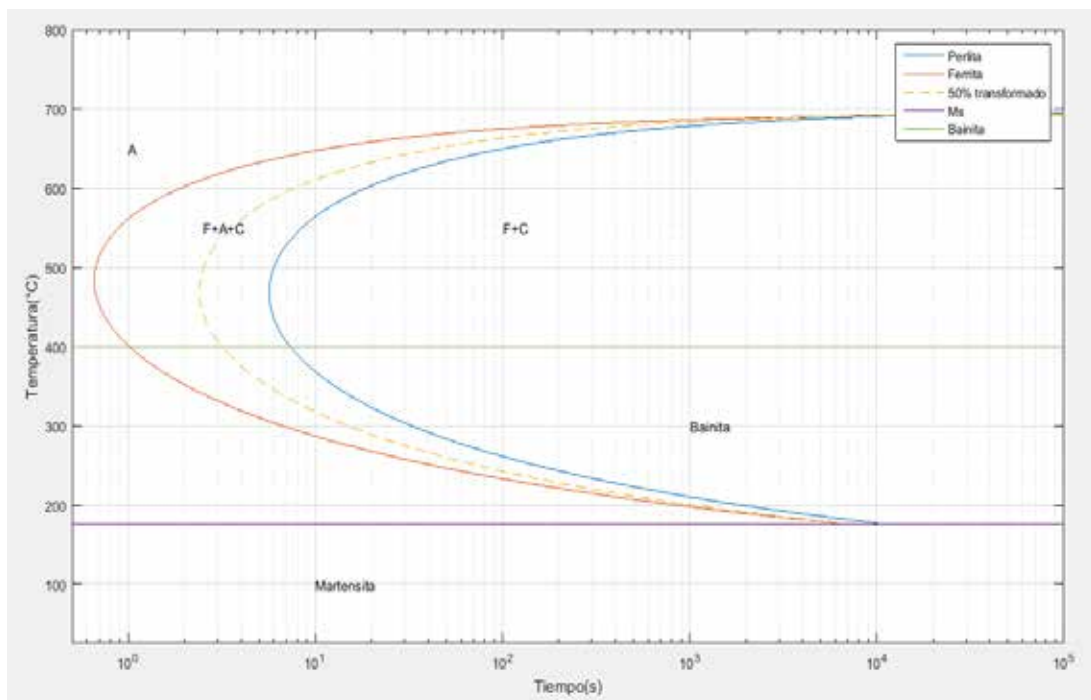


Figura 31. Diagrama TTT para Acero AISI 1080 mediante el modelo de Kirkaldy.

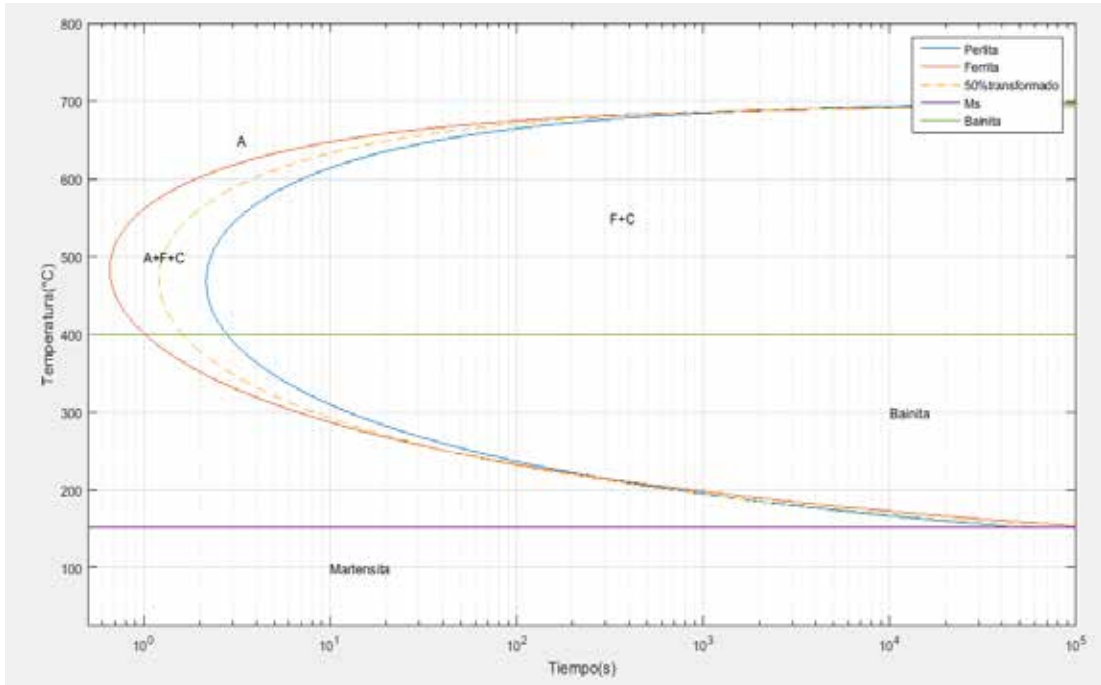


Figura 32. Diagrama TTT para Acero AISI 1095 mediante el modelo de Kirkaldy.

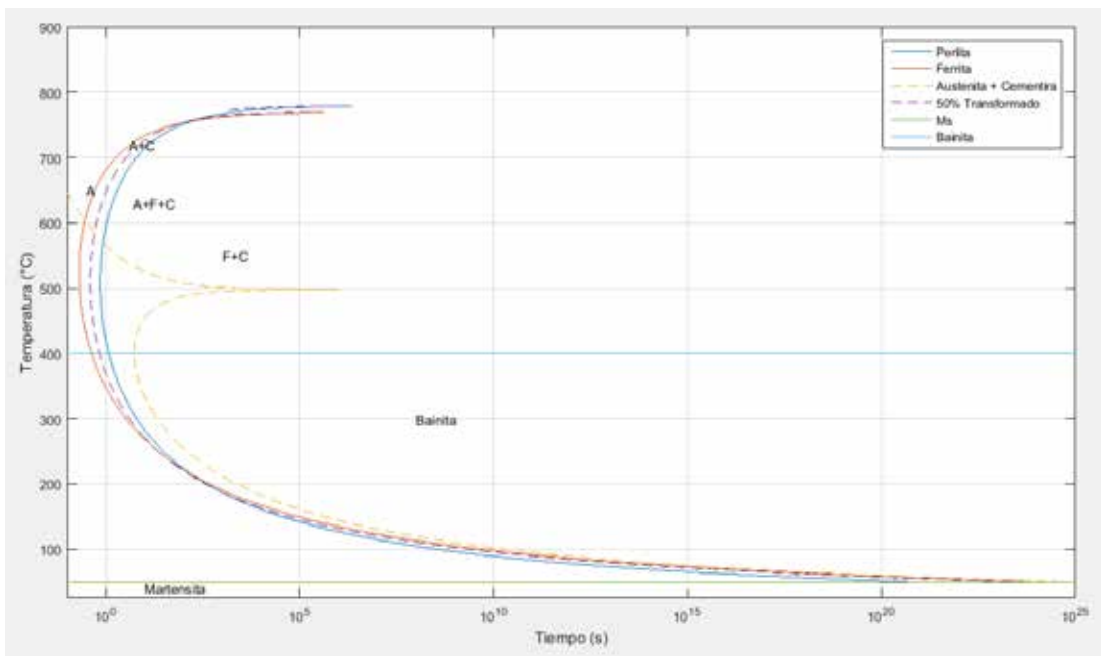


Figura 33. Diagrama TTT para Acero AISI 1095 Modificado mediante el modelo de Kirkaldy.

4.4 Fase IV- comparar los resultados que se obtendrán en el programa con las curvas TTT experimentales.

Esta etapa final del proyecto procedió a comparar las curvas TTT realizadas en la simulación con las curvas experimentales que se poseen en el USS Steels, para comparar como se diferencia el modelo de Kirkaldy con las curvas experimentales, para demostrar así si el modelo ofrece una aproximación bastante aceptable de lo que se representa en la forma experimental o por el contrario ofrece en realidad resultados que se encuentran de forma muy distante de lo que en realidad está sucediendo, es por ello que en esta fase se realizara la comparación entre las curvas, para ello es necesario conocer primero cuáles serán las que representaran la parte experimental, razón por la cual en las figuras 34, 35 y 36 se pueden apreciar las curvas experimentales que se emplearan para realizar la comparación pertinente.

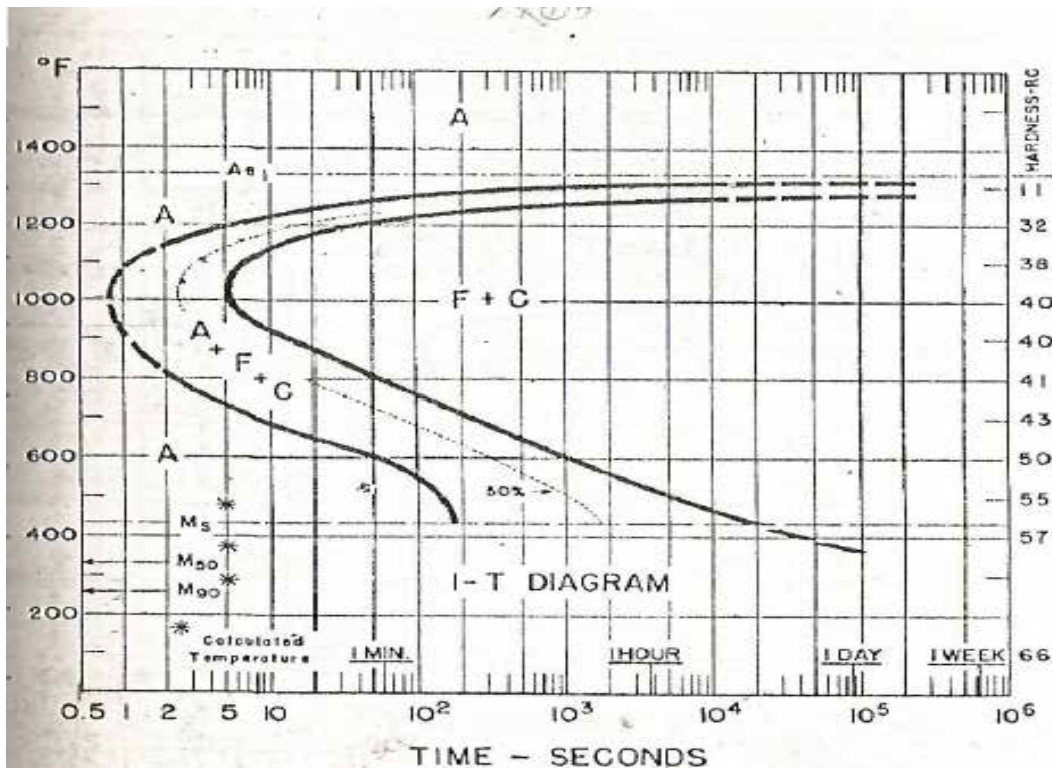


Figura 34. Curvas TTT para Acero AISI 1080, USS Steels

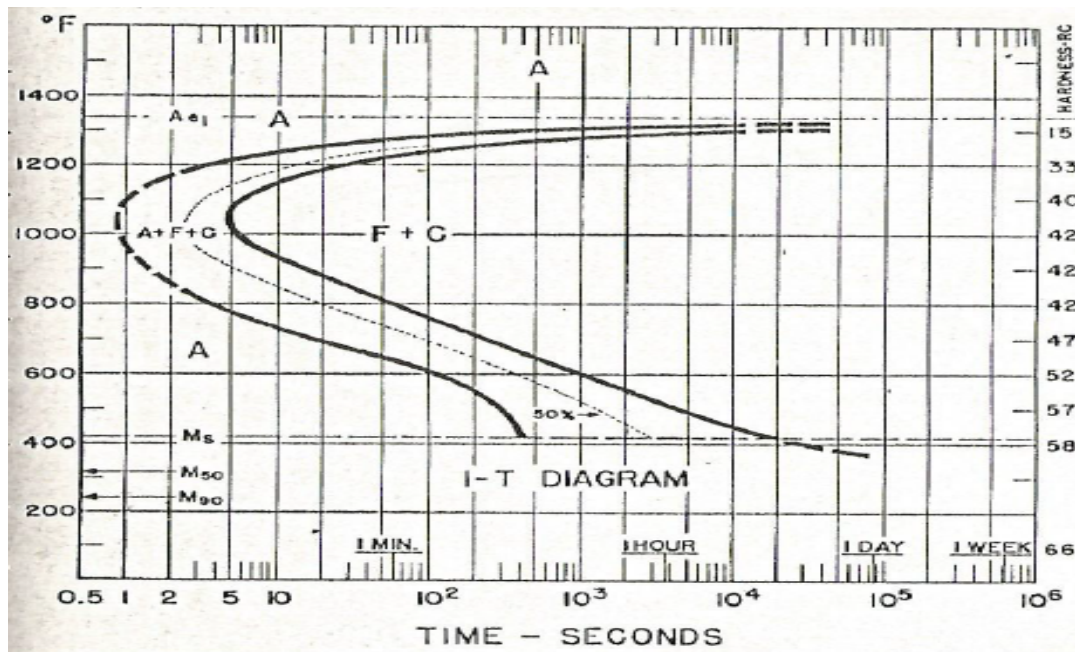


Figura 35. Curvas TTT para Acero AISI 1095, USS Steels.

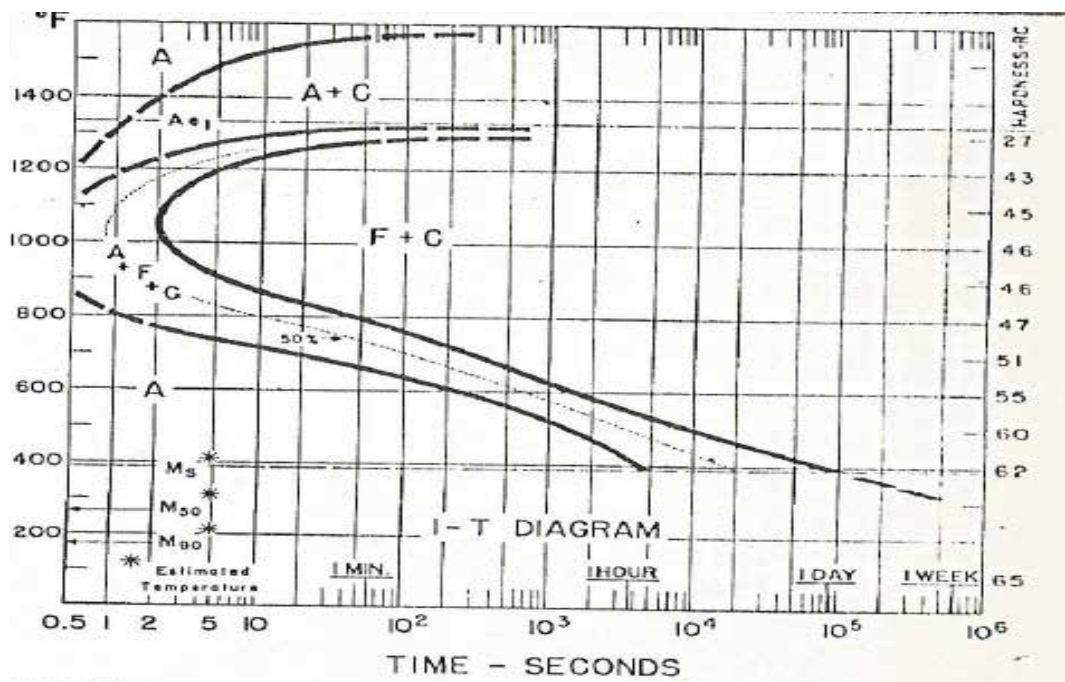


Figura 36. Curvas TTT para Acero AISI 1095 Modificado, USS Steels.

Si se denotan adecuadamente, las curvas experimentales que posee la USS Steels son diagramas que suministran una gran cantidad de información referente al acero en cuestión, inclusive llegando a mostrar a la derecha del mismo la dureza aproximada que puede poseer a medida que sufre un enfriamiento y denotando además a que proximidad de temperaturas se encuentran los diferentes porcentajes de austenita al sufrir un enfriamiento rápido y convertirse así en martensita, estas curvas suministran una gran cantidad de información en la rama de materiales pero como ya fue mencionado, obtener a las mismas lleva una gran cantidad de trabajo y de tiempo, ya una vez denotadas estas curvas y sabiendo con cuales son las que se deben comparar las experimentales, se procede a entonces a enfocar cada curva experimental con su respectiva simulada, para saber en cuanto difieren una con respecto a la otra y demostrar si el modelo de Kirkaldy funciona para predecir de forma aproximada cuales pueden ser las curvas TTT que representan a un acero o por el contrario, se encuentra bastante alejado de la realidad y por lo tanto debe de ser cambiado dicho modelo para ajustar los resultados arrojados a lo que sucede en la realidad.

Para empezar, se compararon las figuras 34 y 31 ya mostradas, para de esta forma observar cómo se encuentra una curva respecto a otra, de esta forma se encontró que el inicio de ambas curvas se asemejan bastante, es decir próximas a los 10^5 segundos y 700°C para seguir con el proceso y luego cerca de los 500°C y casi alcanzando los 0.5 segundos tener el máximo de la nariz para la formación ferrítica y perlítica, hasta este punto ambas curvas poseen una gran similitud, pero al momento de estar próximas a la temperatura M_s , ambas se diferencian enormemente, debido a que en las curvas TTT experimentales la curva de formación ferrítica termina un poco después de 10^2 segundos y la de formación perlítica poco después de 10^4 segundos alcanza la curva M_s y se prolonga un poco mas hasta los 10^5 segundos, por supuesto a todo esto hay que agregarle que la temperatura M_s empieza en los 200°C , mientras que en las curvas obtenidas mediante el modelo de Kirkaldy, la curva de formación ferrítica se prolonga hasta encontrarse próxima a 10^4 segundos al igual que lo hace la de formación perlítica, adicionalmente teniendo que la temperatura de inicio de transformación martensítica

empieza en los 176°C, al observar todo esto es evidente de que existe una gran discrepancia en relación a lo que se encuentra plasmado en las curvas experimentales de la USS Steels y lo que se encuentra en la simulación efectuada para este Acero AISI 1080, que si bien es cierto que en forma general se asemejan de manera un poco amplia a lo que sucede en forma experimental pero sin embargo existiendo una variedad de disyuntivas en ciertos puntos del grafico general.

Ahora bien, lo anterior explicado se encontraba enfocado en relación al comportamiento existente en el Acero AISI 1080 experimental y el simulado, se procedió a la comparación que existe entre los datos que se encuentran en plasmados en las gráficas de la USS Steels para el Acero AISI 1095 y las curvas realizadas en el programa computarizado, comparando así las figuras 32 y 35 del presente capitulo, al igual que en la comparación del Acero AISI 1080, en el Acero AISI 1095 conseguimos que al inicio de la formación de las curvas es bastante similar a las plasmadas en la USS, es decir próximas a 10^5 segundos y cercana a los 700°C y hasta el momento de la formación de la nariz ferrítica y perlítica las curvas simuladas se aproximan de excelente forma a las experimentales, pero al momento de que el desarrollo se aproxima a la temperatura de formación de la martensita que en este caso es de 151.53°C a diferencia de la experimental que está cercana a los 200°C, empiezan a notarse diferencias de una respecto a la otra, por ejemplo que en el caso de las curvas de la USS, en particular de curva de ferrita culmina en entre 10^2 y 10^3 segundos mientras que la de formación perlítica culmina un poco después de pasar los 10^4 segundos mientras que las que se obtienen empleando el modelo de Kirkaldy culminan como se puede apreciar en la figura 32 entre 10^4 y 10^5 segundos, y el caso más notorio es que a partir de cierto punto las curvas de ferrita y perlita se cruzan y luego intercambian de posiciones hasta el final de su desarrollo cosa que en de forma experimental no ocurre en los aceros .

Se puede notar que aunque al principio de formación de las curvas ambas se asemejan, en el transcurso del tiempo las mismas van variando de forma notable para el caso del Acero AISI 1095 al igual que en el caso del Acero AISI 1080. Por último

se procedió a la comparación de las figuras 33 y 36 que es el caso para el Acero AISI 1095 Modificado, y cabe destacar que tal acero se denomina modificado debido a que el mismo aunque en similitud con el AISI 1095, poseen casi la misma cantidad de Manganeso, su contenido de Carbono aumenta de 0.89% a 1.13%, en este último caso se aprecia una notable diferencia entre las curvas debido primordialmente la escala de tiempo en el que se desarrolla la simulación del modelo de Kirkaldy, sumado a esto la temperatura M_s es de casi 50°C en comparación a los 200°C en los cuales ocurre la experimental, mencionando además que al igual que en el caso de la AISI 1095 las curvas de ferrita y perlita se cortan entre ambas y luego de esto cambian de posición y la curva de bainita que en este caso para fines prácticos se empleo para representar la curva de formación de austenita mas cementita no se asemeja en básicamente nada a la que se encuentra en la curva de la USS. En relación a las otras dos comparaciones, esta curva es la que menos posee parecido con su homóloga experimental, debido a que como ya se menciono la escala de tiempo en la que se desarrolla es muy amplia primero que nada, esto se debe a que a partir de un punto determinado, las curvas empiezan a desarrollarse en una tendencia más lenta para alcanzar la temperatura M_s que como es notorio se encuentra muy por debajo en los 50°C .

Como se puede observar en todos los caso, existe una discrepancia significativa entre los diagramas contemplados por la USS y los diagramas que son reflejados mediante el modelo de Kirkaldy, debido primordialmente a que dicho modelo no comprende principalmente el efecto de la transferencia de calor que existe cuando se está efectuando el enfriamiento de las piezas, sino que solo toma como base el efecto de los elementos aleantes y la variabilidad de la temperatura en el tiempo, pero como bien es sabido, a medida que una pieza se enfría, la transferencia de calor entre el medio y dicha pieza va disminuyendo debido a que el equilibrio entre ambos se va haciendo más próximo, adicional a esto tampoco se toma en cuenta las condiciones iniciales de la pieza de acero en estudio, con esto se refiere a que no se toma en cuenta la calidad del proceso mediante el cual la pieza ha sido tratada, ni tampoco la pureza que posee la misma pues como se sabe a medida que sea mayor la impureza del acero, el

comportamiento que desarrollaran las curvas será diferente, por supuesto no se plantea que las curvas expresadas en la USS sean idóneas, a las mismas se les debería de realizar una corroboración principalmente porque estas no suministran información de las condiciones ya mencionadas en las cuales se encontraba la pieza ensayada, puede que incluso al momento de realizar nuevamente el ensayo bajo las normas que rigen como realizar las pruebas exista una diferencia que produzca que las mismas varíen de forma mínima o a gran escala por supuesto existe de igual forma la probabilidad de que las curvas se conserven de igual manera, demostrando así y reafirmando que el modelo de Kirkaldy se encuentra lejos del proceso real.

Si bien el modelo descrito por Kirkaldy no se asemeja a la realidad, la ecuación para la obtención de la temperatura M_s también debe de ser evaluada nuevamente, aunque si bien es cierto que dicha temperatura se encuentra alterada por la presencia de los elementos aleantes, en comparación a los resultados mostrados en las curvas USS existe una diferencia muy amplia, no tanto debido a los mismos aleantes sino gracias a los factores que se encuentran multiplicando a dichos elementos, factores que fueron tomados de forma por tanteo, lo que representa que no necesariamente dichos factores sean en realidad los que deban de modificar de forma significativa como se muestra el valor de la temperatura de inicio de transformación martensítica.

A continuación se presentan la comparación entre las curvas (figuras 37, 38 y 39) colocadas una encima de otra, para que se puede realizar la apreciación correspondiente de las diferencias entre las curvas y así colocar fin al presente proyecto demostrando que aunque el modelo planteado por Kirkaldy puede arrojar valores que se pueden considerar considerables, no son lo suficientemente parecidos a lo que se encuentra contemplado en las curvas realizadas en su momento de forma experimental por la USS Steels, por lo cual para simular las curvas TTT en aceros hipereutectoides debe emplearse otro tipo de modelo matemático.

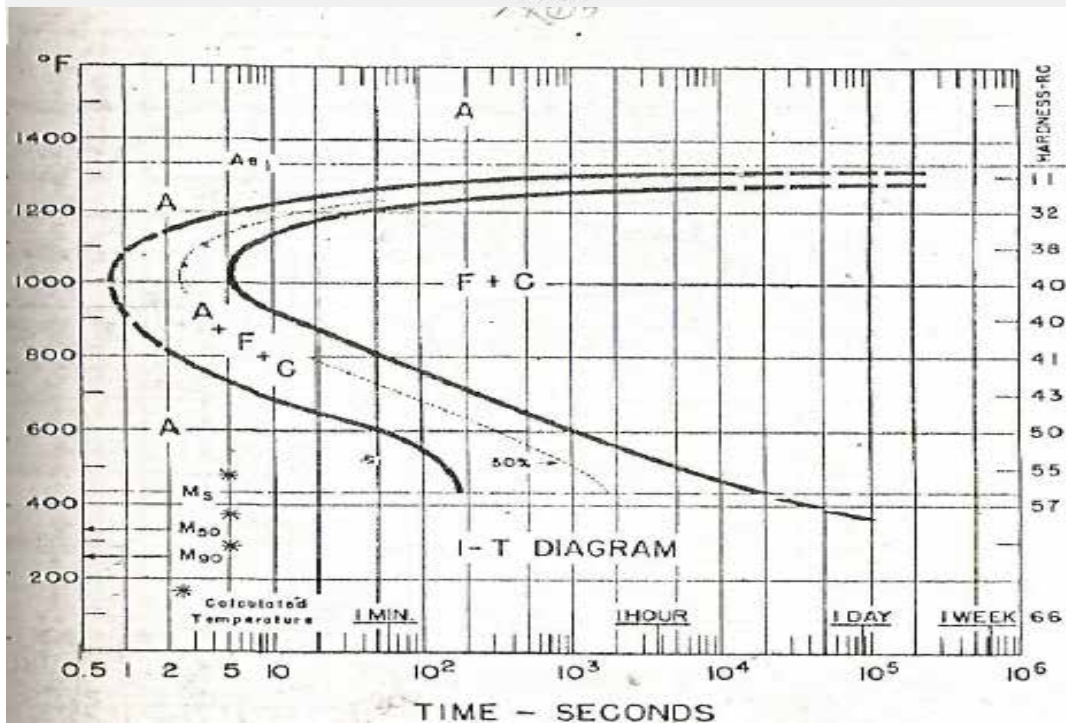
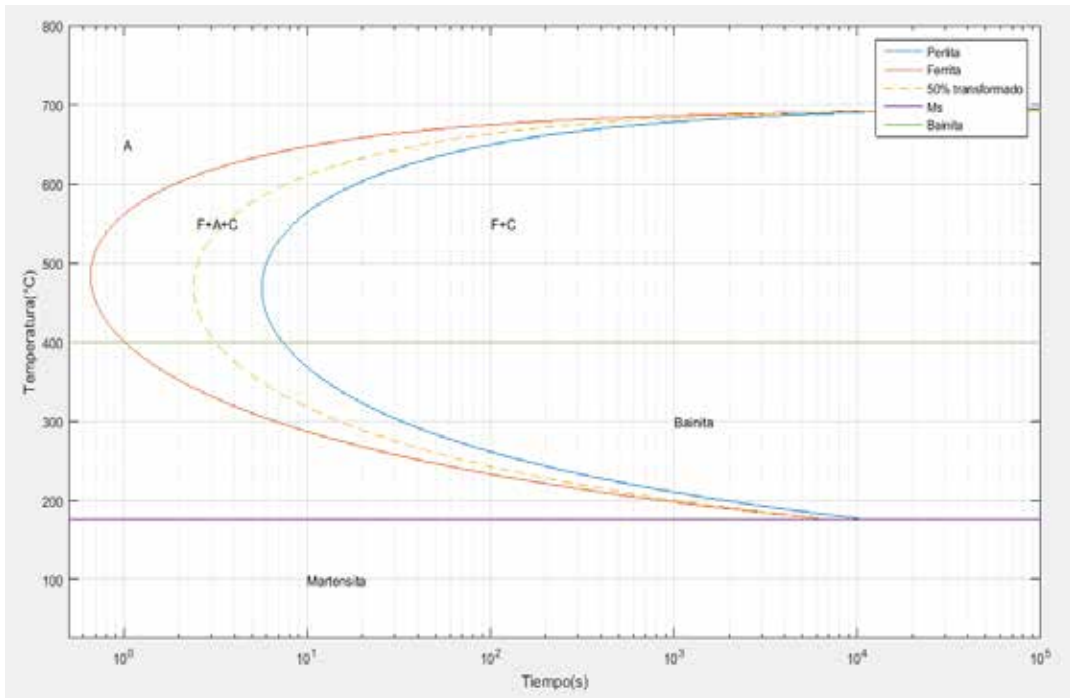


Figura 37. Comparación entre las curvas obtenidas en la simulación y las curvas de la USS Steels del Acero AISI 1080.

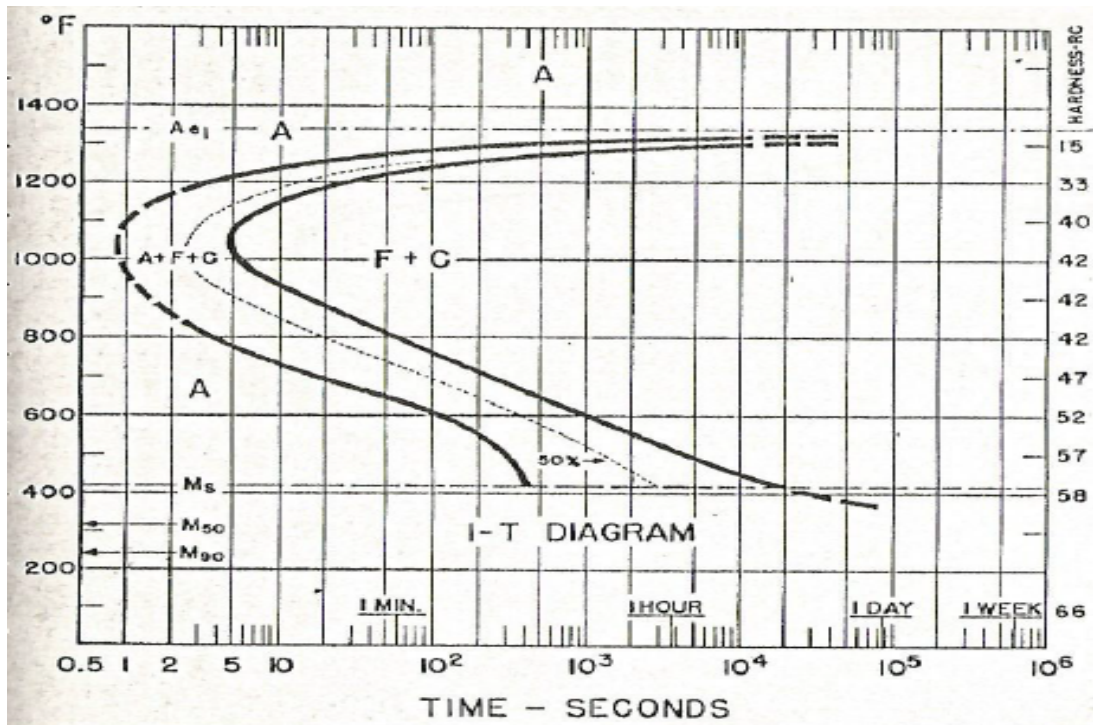
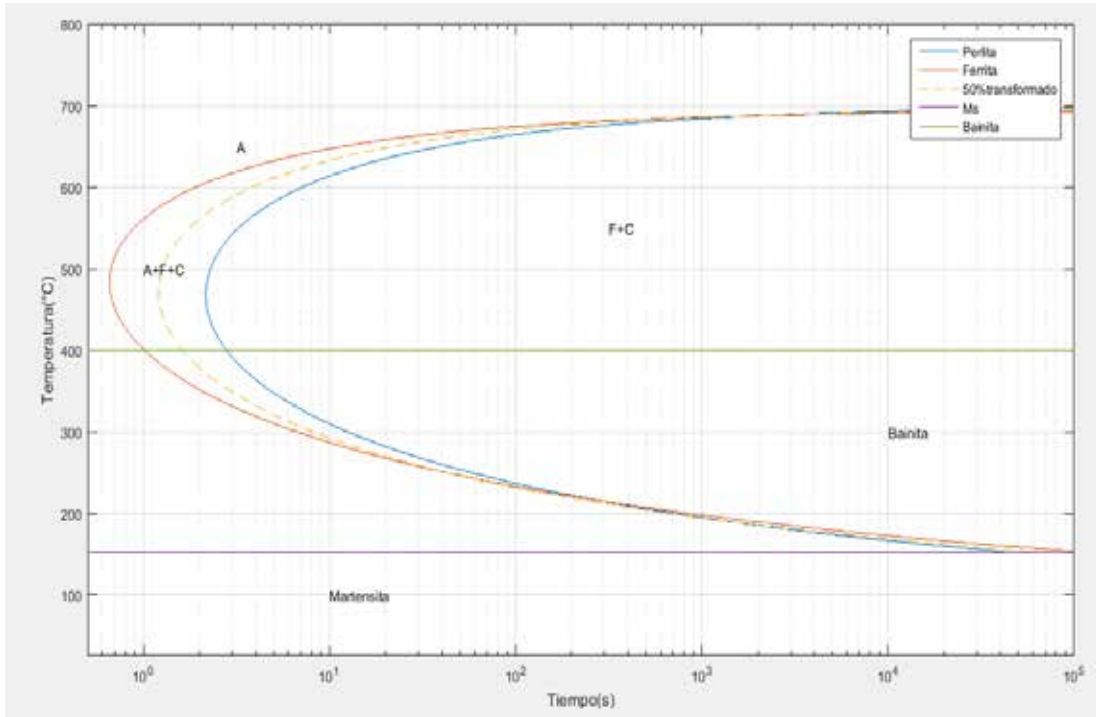


Figura 38. Comparación entre las curvas obtenidas en la simulación y las curvas de la USS Steels del Acero AISI 1095.

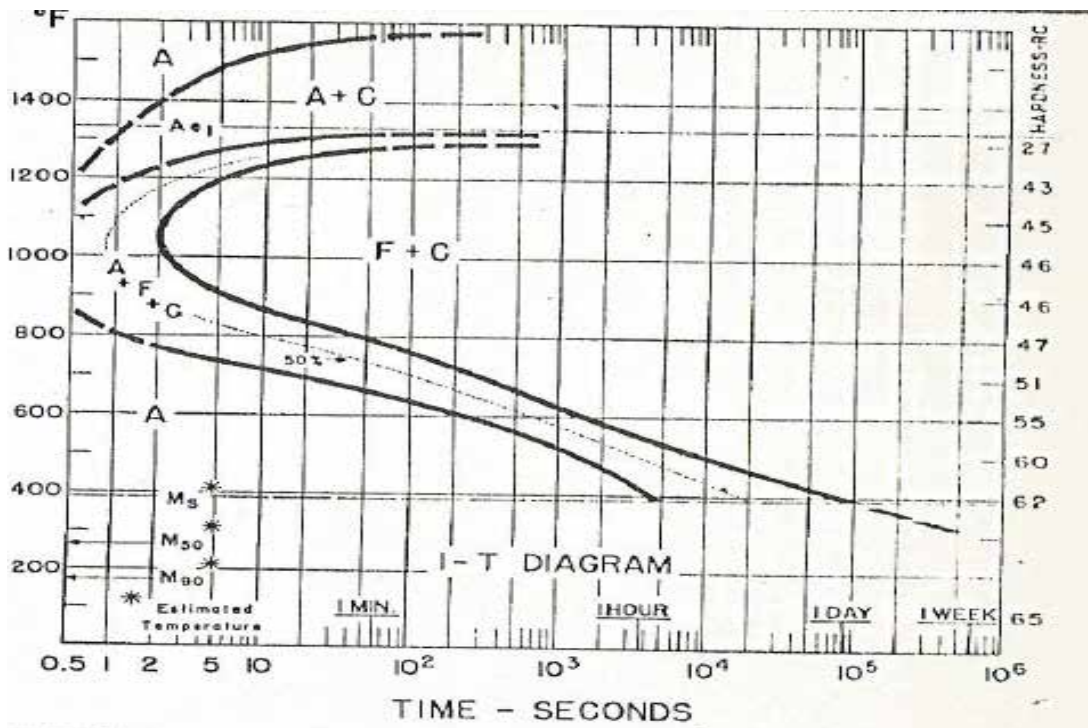
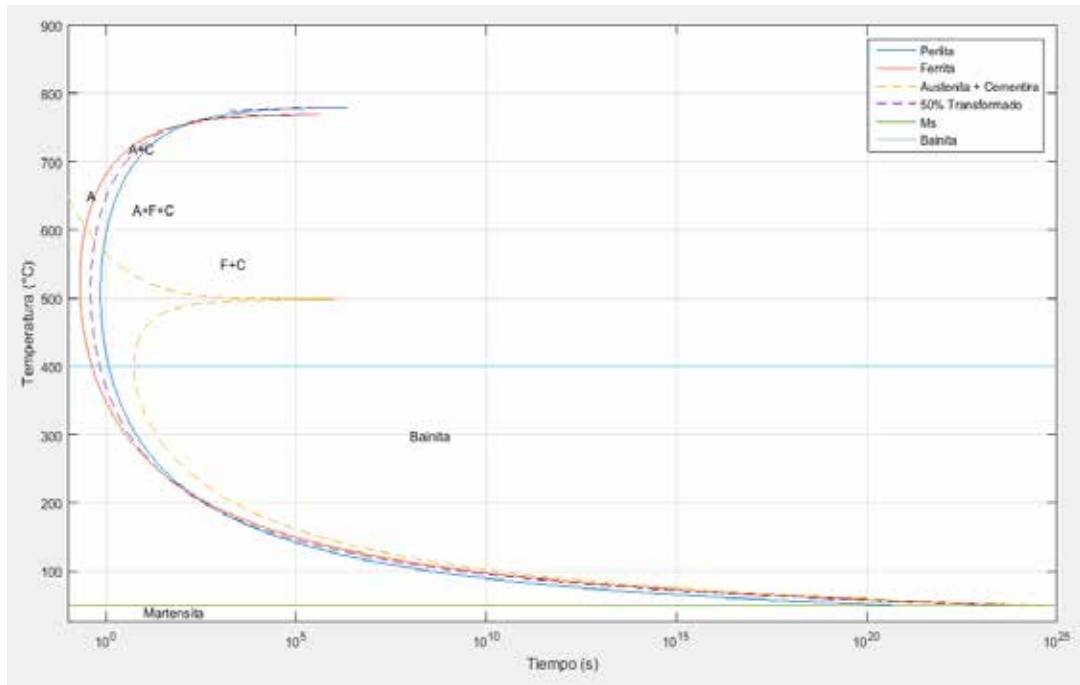


Figura 39. Comparación entre las curvas obtenidas en la simulación y las curvas de la USS Steels del Acero AISI 1095 Modificado.

CONCLUSIONES

- Al momento de recolectar información para la selección de las ecuaciones a emplear para realizar la simulación de las curvas TTT se consiguió que las empleadas en el trabajo titulado “**Obtención del Diagrama de Transformación Isotérmica para un Acero Dual Phase**”, funcionan adecuadamente para el cumplimiento de las fases posteriores, donde representan las ecuaciones necesarias para la obtención de los diagramas pertinentes debido a que se refieren a aceros de dos fases como lo son la ferrita y la perlita, fases que se encuentran presentes en los aceros hipereutectoides seleccionados..
- El programa empleado (Matlab) funcionó adecuadamente para realizar la simulación de las curvas TTT de los aceros seleccionados y facilitando la variabilidad de diferentes factores para la demostración de las bases teóricas, en comparación al otro programa estudiado el cual era ANSYS, del cual no se poseía conocimiento suficiente para poder usar además de cómo fue mencionado con anterioridad, contar con un facilitador y conocimientos previos del mismo para así hacer más simple el empleo del programa en cuestión.
- Las simulaciones fueron efectuadas de manera correcta en el programa para los Aceros AISI 1080, 1095 y 1095 Modificado demostrando además como variando la composición de los elementos aleantes produce una variabilidad en las curvas sustentando así lo descrito en las bases teóricas del presente proyecto, las cuales especifican que al adicionar tales compuestos afectan el comportamiento de las curvas obtenidas.
- Al momento de realizar las comparaciones entre las curvas simuladas y las USS Steels, existen una serie de diferencias bastante notables, las cuales demuestran

- que al realizar las comparaciones entre dichas curvas existe una diferencia en relación a las mismas al realizar los avistamientos pertinentes entre cada una de ellas, debido a primordialmente las curvas al momento de ser simuladas se encontraban en una escala de tiempo tan pequeña que es prácticamente imposible alcanzar para poder obtener las fases pertinentes durante el enfriamiento, así pues, existen diferencias apreciables al momento de la finalización de las curvas simuladas en comparación a las reales, en las cuales las que fueron efectuadas en el programa

RECOMENDACIONES

- Incluir en el modelo de Kirkaldy el efecto que produce la transferencia de calor cuando se realiza el enfriamiento de las probetas en los baños de sales.
- Contemplar en el modelo de Kirkaldy el efecto que produce los procesos de mecanizado por los cuales las piezas de acero han sido afectados.
- Tomar en cuenta la cantidad de pureza que posee el acero en estudio para el modelo de Kirkaldy.
- Reevaluar las curvas TTT descritas en la USS, por consiguiente, realizar los ensayos respectivamente dentro de las normas establecidas para corroborar que son las curvas TTT que corresponden a tales aceros.
- Replantear la ecuación descrita para la obtención de la temperatura M_s , debido a que los factores tomados para la multiplicación de los elementos aleantes son factores tomados por tanteo, por consiguiente no se tiene por seguro que los mismos son los que representan a la obtención de dicha temperatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ander-Egg, Esequiel (1993). **Técnicas de Investigación Social**. Madrid, España.
- American Society for Metals (1991). **Metals Handbook, Volumen 04-Heat Treating**. USA.
- Arias, Ángel (2008). **Obtención del Diagrama de Transformación Isotérmica para un Acero Dual Phase**. Universidad de Santiago de Chile, Chile.
- Días, Juan. Garcia, Concepcion. González, Maria. Ortegón, Francisco (2007). **Un Modelo para la Descripción de las transformaciones de Fases en una Barra de Acero**. Universidad de Cádiz, España.
- Goyos, Leonardo. Lobaina, Ramón. (2011). **Selección e Implementación de un Modelo para el Inicio de la Transformación Perlítica Durante el Enfriamiento en Aceros de Baja Aleación**. Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.
- Hurtado, Ignacio. Toro, Gustavo. (2001). **Paradigmas y Métodos de Investigación en Tiempos de Cambio**. 4ta Edición. Valencia-Carabobo.
- Hernandez, Roberto. Fernandez, Carlos. Baptista, Lucio. (2003). **Metodología de la Investigación**. McGraw-Hill Interamericana, Mexico D.F. Mexico.
- Ruiz Olabuéna, Jorge. Aristetegui, Ignacio. Melgosa, Luis. (2002). **Como Elaborar un Proyecto de Investigación Social**. Universidad de Deusto, España.
- United States Steel. (1951). **Isothermal Transformation Diagrams**. United States Steel Corporation, USA.

Véliz, Mary. Arredondo, José. (2009). **Aspectos Teóricos sobre tipos de Muestreo**. Universidad de Oriente. Cumaná, Sucre.