

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**SIMULACIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES  
RESULTANTES DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO DE  
TEMPLE EN PIEZAS CILÍNDRICAS DE ACERO.**

PRESENTADO POR:

**JOSÉ ALEXANDER SERMEÑO ZETINO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2014

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DIRECTOR :**

**ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**SIMULACIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES  
RESULTANTES DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO DE  
TEMPLE EN PIEZAS CILÍNDRICAS DE ACERO.**

Presentado por :

**JOSÉ ALEXANDER SERMEÑO ZETINO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, SEPTIEMBRE DE 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## **Agradecimientos.**

Finalmente tengo la oportunidad de terminar otra etapa de mi vida, me invade la alegría ya que para mí representa un paso necesario en mi búsqueda por encontrar la libertad, la oportunidad de definir mi propio futuro profesional y personal a partir de mi propio trabajo y voluntad.

Primero quiero dar gracias a mi madre Roxana, le agradezco todo sus sacrificios y esfuerzos, pero mucho más el amor y la comprensión cuando decidí emprender el reto de estudiar ingeniería mecánica. A mi hermano Mario, alguien a quien le tengo infinito cariño y admiración; no conozco a nadie que persiga sus sueños con la pasión que él lo hace. A mi hermana Roxana, a quien siempre he admirado por su gran inteligencia, quien por muchos años fue mi confidente y que me sorprendió cuando terminé el laberinto de FFVII sin ver nada. Agradezco a mis abuelos Mario y Ana María porque han sido como otro set de padres, siempre me han apoyado en todo. También a mi prima Diana y al resto de mi familia.

A mi amiga Marta, que fue la persona que me movió a corregir el error de haber comenzado Ingeniería Industrial y gracias a su ejemplo y palabras de ánimo hice el cambio a Ingeniería Mecánica. También agradezco a James Hetfield porque su música me ha movido a perseguir mis sueños y metas.

Debo agradecer a mi docente asesor, Doc. Berríos, por todo el apoyo y los conocimientos con los que me ha asistido durante esta investigación y le agradezco la confianza que me brindo al dejarme trabajar tema nuevo para la escuela. También agradezco a los docentes con los que tuve la oportunidad de aprender.

Le doy gracias a mi novia Rebeca, por ser tan genial, por el amor y la paciencia que ha tenido durante todo este proceso.

Le doy gracias a mis compañeros de carrera, a los que fueron mis compañeros de trabajo en Sykes, por toda la camaradería, la amistad y el apoyo que me brindaron.

Gracias en verdad a todos los que no he podido mencionar, por apoyarme durante estos años.

Con cariño Alexander Zetino.

# ÍNDICE.

pag

Resumen .....	i
Introduccion .....	ii
Capitulo 1. marco teórico .....	1
Antecedentes.....	2
1.1 Tamaño y masa .....	3
1.2. Medios de enfriamiento.....	6
1.3. Composición química y tamaño de grano .....	8
1.4 Esfuerzos residuales.....	15
1.5. Generalidades sobre simulación .....	24
1.5.1 Definición de simulación.....	25
1.5.2. Etapas para realizar un estudio de simulación .....	25
1.5.3. Ventajas y desventajas en el uso de simulación.....	27
1.6. Declaración completa del problema .....	29
1.7. El método de los elementos finitos.....	30
1.7.1. Generalidades del método de los elementos finitos .....	31
1.7.2. Aplicación del método .....	32
1.7.3. Ensamblaje y análisis de una estructura .....	38
1.7.4. Condiciones de contorno.....	40
1.8. Simulación usando abaqus cae.....	42
CAPITULO 2. Conceptos fundamentales para la simulación .....	45
2.1. Definición del sistema .....	46
2.2. Enunciado del proceso a simular .....	48
2.3 Definición de principios de mecánica de los solidos.....	51
2.3.1 Formulación del modelo .....	52
2.3.1.1. La relación elasto-plástica entre el esfuerzo y la deformación .....	52
2.3.1.2 Condiciones de equilibrio .....	53
2.3.1.3. Ecuación de compatibilidad.....	54
2.3.1.4. Condiciones de frontera .....	56
2.4. Fluido de temple. ....	57

2.4.1. Propiedades del fluido.....	57
2.4.2. Planteamiento del problema de transferencia de calor .....	58
2.4.2.1. Herramientas especializadas para la simulación de temple de aceros ....	62
2.4.2.2. Formas de obtener simulaciones más realistas.....	63
CAPÍTULO 3. Propiedades físicas del acero y parametros importantes de abaqus. ....	68
3.1. Desafíos de la predicción de los esfuerzos residuales .....	70
3.1.1 Propiedades del mecánicas .....	70
3.1.1.1 Esfuerzo de cedencia.....	70
3.1.2 Coeficiente de dilatación térmica.....	71
3.1.3 Densidad.....	71
3.1.4 Módulo de elasticidad o módulo de young.....	72
3.1.5 Relación de poisson.....	72
3.2 Propiedades térmicas .....	73
3.2.1 Calor específico .....	73
3.2.2 Conductividad térmica.....	74
3.2.3 Coeficiente de dilatación térmica.....	75
3.2.4 Implementación del modelo en la computadora .....	76
3.3. Características, metodos y parametros de abaqus en procesos de transferencia de calor.....	77
3.3.1 Análisis en abaqus.....	78
3.3.2 Definiendo pasos (steps).....	78
3.3.3. Especificando el procedimiento de análisis .....	78
3.3.4. Procedimientos de transferencia de calor en abaqus .....	79
3.3.5. Fuentes de la no linealidad en un análisis de la transferencia de calor .....	80
3.3.6. Análisis de tranferencia de calor en regimen transitorios.....	81
3.3.7. Análisis de la transferencia de calor acoplado secuencialmente .....	81
CAPITULO 4. Diseño y ejecución del experimento y simulación.....	83
4.1. Pruebas de temple.....	83
4.1.1 Selección de acero.....	84
4.1.2. Selección de dimensiones de las barras .....	85
4.1.3. Selección de medio de temple y temperatura de templado .....	86
4.1.4. Templado de las barras.....	87
4.1.5. Obtención de muestras para las pruebas. ....	89

4.2. Simulación de curvas de enfriamiento con abaqus/cae.....	92
4.2.1. Definición de las propiedades importantes para la simulación.....	92
4.2.1.1 Propiedades térmicas del acero .....	93
4.2.1.2. Determinación del coeficiente de transferencia de calor.....	94
4.2.1.3. Diametros críticos de las barras templadas .....	95
4.3 Implimentación del modelo y obtención de curvas de enfriamiento .....	103
4.3.1. Creación del modelo 3d .....	103
4.3.2. Selección de elementos y número de nodos .....	105
4.3.3 Validación de los coeficientes de transferencia de calor.....	108
CAPITULO 5. Análisis de resultados .....	109
5.1. Curvas de enfriamiento .....	110
5.1.1. Curvas de enfriamiento de barra de media pulgada .....	110
5.1.2. Curvas de enfriamiento de barra de una pulgada .....	115
5.1.1.3 Barra de dos pulgadas .....	123
5.2. Estados de esfuerzos.....	129
5.2.1 Barra de media pulgada .....	129
5.2.2 Barra de una pulgada.....	130
5.2.3 Barra de dos pulgadas .....	130
5.3 Resultado del estudio metalografico. ....	131
5.4. Resumen de resultados .....	139
Conclusiones .....	140
Recomendaciones. ....	141
Referencias .....	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Efecto de la masa sobre las curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de muestras de acero inoxidable templadas en aceite convencional para templar. Temperatura del aceite: 125 °F.	4
Fig. 1.2. Curvas de enfriamiento tiempo-temperatura para diferentes posiciones en una barra de una pulgada de diámetro templada drásticamente	5
Fig. 1.3. Curvas de penetración de dureza o transversas de dureza para muestras de varios tamaños templadas en agua: (a) acero SAE 1045 y (b) acero SAE 6140 al Cr-V	6
Fig. 1.4. Curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de una barra de acero inoxidable de ½ pulgadas de diámetro por 2.5 pulg de largo.	8
Fig. 1.5. Diagrama T-E de un acero de triple aleación (4340): 0.42% de C, 0.78% de Mn, 1.79 % de Ni, 0.80 % de Cr, 0.33 % de Mo <sup>[2]</sup> .	9
Fig. 1.6 Diagrama T-I de un acero 1035: 0.35% de carbono, 0.37% de Mn. Tamaño del grano: 75%, de 2 a 3; 25% de 7 a 8. <sup>[1]</sup>	10
Fig. 1.7. Microestructura de un acero de bajo carbono, templado en agua, que presenta una red de ferrita blanca rodeando las grises áreas de martensita de bajo carbono: (a) 100 x y (b) 500x. Atacada químicamente con nital al 2%. <sup>[1]</sup>	11
Fig. 1.8. Diagrama T-I de un acero 1050: 50% de carbono, 0.91% de Mn. Tamaño del grano: de 7 a 8; austenizado a 1670 °F <sup>[1]</sup>	11
Fig. 1.9 Microestructura de un acero al medio carbono, templado e agua,	12
Fig. 1.10. Diagrama T-I de un acero 1335 0.35% de C. 1.85% de Mn. Tamaño del grano: 70%, 7; 30%, 2. Austenizado a 1550 °F <sup>[1]</sup> .	13
Fig. 1.11. Diagrama T-I de un acero al 0.33 % de C, 0.45% de Mn, 1.97% de Cr. Tamaño de grano de 6 a 7. Austenizado a 1600 °F.	14
Fig. 1.12. Diagrama T-I de aceros al 0.87% de C, 0.30% de Mn, 0.27% de V. Tamaño del grano: de 2 a 3, austenizados a 1925 °F	14
Fig. 1.13. Representación esquemática de la distribución de esfuerzos por todo el diámetro, debido al gradiente de temperatura. La curva punteada indica una representación más real de la distribución de esfuerzos <sup>[1]</sup> .	17
Fig. 1.14 Curva esquemática de dilatación o expansión para la transformación martensítica	18
Fig. 1.15. Curvas de enfriamiento en el centro y en la superficie sobrepuestas en el diagrama T-I para ilustrar la condición de endurecimiento continuo.	19
Fig. 1.16. Croquis de una posible fractura en un acero endurecido en	21

forma continúa.

Fig. 1.17. Diagrama esquemático de transformación que presenta el austenizado por templado. <sup>[1]</sup>	21
Fig. 1.18 Curvas de enfriamiento en el centro y en la superficie sobrepuestas en el diagrama T-I para ilustrar la condición de endurecido superficial <sup>[2]</sup> .	23
Fig. 1.19 Croquis de una posible fractura en un acero endurecido en forma superficial. <sup>[2]</sup>	24
Fig. 1.20. Estructura típica formada por elementos interconectados <sup>[2]</sup> .	33
Fig. 1.21. Barra articulada en los extremos	36
Fig. 1.22. Interfaz gráfica de Abaqus CAE. Abaqus CAE User's manual <sup>[7]</sup> .	44
Fig. 2.1. Direcciones y planos en que actúan los esfuerzos. <sup>[2]</sup>	47
Fig. 2.2. Diagrama ejemplificando las fases del temple, relaciones y resultados	50
Fig. 2.3. Etapas de un proceso de simulación.	50
Fig. 2.4. Estados de esfuerzos: (a) Vectores unitarios representados en un plano tridimensional. (b) componentes positivas de los esfuerzos (c) componentes negativas de los vectores de esfuerzos.	54
Fig. 3.5. Diferentes mecanismos de transferencia de calor	59
Fig. 2.6. Proceso de simulación temple en acero, usada por Lauro y Sarmiento	64
Fig. 3.7. Análisis multifase del acero en Dante <sup>®</sup> .	65
Fig. 2.8. Curva de enfriamiento y la curva de tasa de enfriamiento derivada para un acero templado en agua a 23°C	67
Fig. 2.9. Coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura de la superficie durante el temple de acero en agua a 23 °C.	67
Fig. 2.10. Modelado de la evolución de las propiedades del material	69
Fig. 4.1. Fotografía de las barras de acero de 1 y ½ pulg antes de ser tratadas térmicamente.	85
Fig. 4.2. Fotografía de soporte hecho con alambre galvanizado usado para manipular las barras cuando AISI 1045 sacadas del horno a alta temperatura	87
Fig. 4.3. Fotografía tomada mientras se introdujo la última barra de acero de 2 pulg	88
Fig. 4.4. Momento en que se introduce una barra de acero al agua para ser templada.	89
Fig. 4.5. Presenta el momento en el que la barra fue extraída del medio de enfriamiento, se puede observar que su color ha cambiado evidenciando el cambio de temperatura en ese momento cercana a la temperatura ambiente.	89
Fig. 4.6. Barras cortadas y dos muestras que serán preparadas para realizar observaciones.	90
Fig. 4.7 Remanentes de las barras de las que ya fueron extraídas las	91

muestras de acero

Fig. 4.8. Muestras extraídas de las barras, el brillo de las mismas se debe a que han sido cubiertas con aceite para evitar que se corroan.	91
Fig. 4.9. Curvas de dureza según el porcentaje de martensita y el porcentaje de carbono en el acero	96
Fig. 4.10. Curvas de Lamont para una relación $r/R = 0$	97
Fig. 4.11. Curva Jominy de dureza promedio para el acero AISI 1045	98
Fig. 4. 13. Curvas de Lamont de relación $r/R = 0$ , en las que se ha marcado para una barra de diámetro de 0.5 pulg con una severidad de temple de $H = 1.5$	99
Fig. 4.14 Grafica de templabilidad promedio para acero AISI 1045 se ha marcado la dureza en el centro de una barra de 0.5 pulg de diámetro.	100
Fig. 4.15. Diagrama de templabilidad donde se ha marcado la dureza de un 50% de martensita como se ha definido teóricamente	100
Fig. 4. 16 Curvas de Lamont de relación $r/R = 0.3$	101
Fig. 4.16. Curvas de Lamont para una relación de radios de $r/R = 0.9$	102
Fig. 4.17. Ejemplo de cilindro creado en la interfaz de Abaqus/ CAE	104
Fig. 4.17. Ejemplo de cilindro creado en la interfaz de Abaqus/ CAE	105
Fig. 4.19. Asignación de superficies para la transferencia de calor en el modelo.	106
Fig. 4.20. Imagen que presenta la simulación de la transferencia de calor en la simulación del enfriamiento de una barra de 2 pulg de acero AISI 1045.	107
Fig. 4.21. Presenta las diferentes temperaturas durante el enfriamiento de una barra de acero AISI 1045 de 2 pulg de diámetro.	107
Fig. 4.22. Curva de enfriamiento obtenida del nodo 288 que se estima está a la distancia teórica donde debe de encontrarse el punto crítico.	107
Fig. 5.1 Curva de enfriamiento en la superficie de una barra de 1/2 pulg de diámetro simulada por medio de Abaqus.	111
Fig. 5.2. Curva de enfriamiento correspondiente a la mitad del radio de una barra de 1/2 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.	111
Fig. 5.3 Curva de enfriamiento en la en el centro de una barra de acero AISI 1045 de 1/2 pulg de diámetro, simulada por medio de Abaqus.	112
Fig. 5.4. Curva de enfriamiento de la superficie de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045	113
Fig. 5.5. Curva de enfriamiento de la mitad del radio de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045	113
Fig. 5.6. Curva de enfriamiento del centro de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.	114
Fig. 5.7. Curva de enfriamiento de la superficie, mitad del radio y	115

centro de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.	
Fig. 5.8. Curva de enfriamiento correspondiente a la superficie de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.	115
Fig. 5.9. Curva de enfriamiento correspondiente a la mitad del radio de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.	116
Fig. 5.10. Curva de enfriamiento correspondiente al centro de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.	116
5.11. Curva de enfriamiento a la distancia que se ha calculado teóricamente el radio crítico de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulado en Abaqus.	117
5.12. Curva de enfriamiento simulada de la superficie de una barra de 1 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.	118
5.13. Curva de enfriamiento simulada al a la mitad del radio de una barra de 1 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.	119
Fig. 5.14. Curva de enfriamiento simulada del centro de una barra de 1 pulg de acero, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.	120
Fig. 5.15. Curva de enfriamiento a la distancia teórica del diámetro crítico, que corta a aproximadamente un 45% de transformación de perlita y se ha formado aproximadamente un 5% de ferita proeutectoide.	121
Fig. 5.16. Curvas de enfriamiento sobrepuestas en el diagrama TTT de un acero AISI 1045.	122
5.17 Curva de enfriamiento de la superficie de una barra de 2 pulg simulada en Abaqus	123
Fig. 5.18 Curva de enfriamiento para el diámetro crítico obtenida por medio de simulación en ABAQUS a una distancia aproximada de 0.85 el radio de la barra.	124
Fig. 5.19. Curva de enfriamiento en la mitad del radio de la barra de 2 pulg de una acero AISI 1045.	124
Fig. 5.20. Curva de enfriamiento obtenida por medio de simulación en Abaqus de la curva de enfriamiento al centro de una barra de 2 pulg.	125
5.21. Curva de enfriamiento de la superficie sobrepuesta en el diagrama TTT	125
5.22 Curva de enfriamiento de la distancia del diámetro crítico sobrepuesta sobre le diagrama TTT.	126
5.23. Curva de enfriamiento de la mitad del tamaño de la barra, al ver la región donde se intersecta con el diagrama TTT	126
5.24. Curva de enfriamiento en el centro de la barra de 2 pulg sobrepuesta sobre el diagrama TTT de un acero AISI 1045.	127
5.25. Curvas de enfriamiento sobrepuesto sobre el diagrama TTT, la curva azul corresponde a la superficie, la morada al diámetro crítico,	128

la verdad a la mitad del radio de la barra y la roja al centro de la misma.	
Fig. 5.24. Esquema que representa el estado de esfuerzos en la barra 1/2 pulg de un acero AISI 1045.	129
Fig. 5.25. Esquema que representa el estado de esfuerzos en la barra 1 pulg de un acero AISI 1045.	130
Fig. 5.26. Esquema que representa el estado de esfuerzos en la barra 2 pulg de un acero AISI 1045.	131
Fig. 5.27. Fotografía del centro de la muestra de la barra de ½ pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.	132
Fig. 5.28. Fotografía del centro de la muestra de la barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.	132
Fig. 5.29. Fotografía de muestra extraída de barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	133
Fig. 5.30. Fotografía del centro de la barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500 x.	133
Fig. 5.31. Fotografía a un ½ del radio de una barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	134
Fig. 5.32. Fotografía a un ¼ del radio desde la superficie en una barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	134
Fig. 5.33. Fotografía a un ¼ del radio desde la superficie en una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	135
Fig. 5.34. Fotografía a la ½ del radio en una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	135
Fig. 5.35. Fotografía del centro de una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100 X.	136
Fig. 5.36 Fotografía cercana a la superficie de una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	136
Fig. 5.37 Fotografía de la superficie una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.	137
Fig. 5.38. Fotografía a un ¼ del radio de la superficie una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.	137
Fig. 5.39. Fotografía a un 1/8 de radio desde la superficie una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.	138
Fig. 3.40. Mosaico de la zona de transición correspondiente al radio crítico en una barra de 1 pulg de diámetro de acero AISI 1045.	138
Fig. 5.41. Mosaico de la zona de transición correspondiente al radio crítico en una barra de 2 pulg de diámetro de acero AISI 1045.	139

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1. Etapa de esfuerzos presentes en el enfriamientos de un cilindro de acero.	19
Tabla 1.2. Etapa de esfuerzos presentes en el enfriamiento de un cilindro de acero.	22
Tabla 2.2. Coeficientes de transferencia de calor obtenidos por Hasam	68
Tabla 3.1. Valores de conductividad térmica con respecto a la temperatura obtenidos por medio del software MAP_NEURAL_Thermal	75
Tabla 4.1. Composición del acero 1045.	84
Tabla 4.2. Propiedades físicas requeridas útil para la simulación del enfriamiento	94
Tabla 4.3. Coeficientes de transferencia de calor determinados para cada uno de los diámetros de barras usados en la investigación.	109

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se ha utilizado un software con el objetivo de simular el proceso de temple del acero, que consiste en el enfriamiento brusco desde la temperatura de austenización con el fin de provocar cambios en la estructura del acero. Se especifican las propiedades del acero que tienen un papel importante durante dicho proceso y cómo interactúan entre sí, se definen las propiedades físicas que son necesarias para simular el proceso de transferencia de calor. La transferencia de calor que se simula es en régimen transitorio y se obtiene información de la temperatura con respecto al tiempo que será usada para obtener las curvas de enfriamiento para diferentes radios al interior del acero. Se calcula el coeficiente de transferencia de calor, ya que no se pudo obtener información experimental para ser introducida en el software. Para validar el modelo se llevó a cabo pruebas experimentales para comparar los resultados que se han simulado basados en la información teórica con la que se cuenta. Para estas pruebas experimentales se utilizaron barras de  $\frac{1}{2}$ , 1 y 2 pulg de diámetro 22 cm de longitud, para cada diámetro de barra se usaron 3 barras. Además, se estiman los estados de esfuerzos residuales en la superficie y núcleo de las barras de acero AISI 1045. Se concluye que se logró simular con éxito y con relativa confiabilidad el enfriamiento que se produce durante el temple del acero; se ha demostrado por medio de información teórica y experimental que la transformación de fases esperada para puntos seleccionados en el sección transversal de la barra corresponden a puntos que coinciden con el diagrama TTT al sobreponer las curvas de enfriamiento simuladas, y se puede realizar la estimación de los estados de esfuerzo en la capa superficial como en el núcleo de las barras para cada diámetro estudiado.

## INTRODUCCIÓN

El temple es el proceso por el cual se endurece un acero mediante un enfriamiento rápido que provoca la formación de una fase llamada martensita, la formación de esta fase si bien endurece el acero también causa un aumento de volumen lo que provoca estados de esfuerzos de tracción o compresión.

La templabilidad del acero depende de varios factores, como la composición química y el tamaño de grano. La capacidad de obtener un enfriamiento a la tasa requerida depende de la severidad del medio de temple utilizado; los diagramas TTT son usados para conocer las temperaturas y tiempos requeridos para obtener productos de transformación y las curvas de Lamont obtenidas por medio de las pruebas Jominy permiten conocer la dureza a través de la sección transversal.

El métodos de los elementos finitos es una técnica matemática para resolver problemas complicados, que generalmente requieren mucho tiempo y esfuerzo para ser resueltos a mano o utilizando otras herramientas matemáticas, éste será usado para simular el enfriamiento de barras de acero simulando una rapidez de enfriamiento que se asemeje al temple real, el software que se ha elegido es Abaqus/CAE, un paquete de software para resolver problemas por medio del método de los elementos finitos.

Los resultados de las simulaciones serán corroborados por una fase experimental que consistirá en el temple de probetas cilíndricas de acero y se observará la microestructura para identificar los productos de transformación resultantes.

## CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO

La importancia de las simulaciones reside en el potencial del modelado matemático que se puede realizar para intentar predecir el comportamiento físico o mecánico de algún elemento, se crean modelos que generalmente son muy difíciles de resolver por cualquier persona, además proveen una interfaz gráfica que permite un acercamiento visual de los fenómenos, lo que resulta en una herramienta muy poderosa y resulta una pena no usarla en cualquier análisis de ingeniería.

Se buscaron antecedentes sobre algún tipo de simulación o modelado de esfuerzos residuales realizados por alguna institución de educación en El Salvador pero no se pudo encontrar algún tipo de registros de esta actividad, de hecho parece ser que las simulaciones y el modelado están fuera de las asignaturas que se deben de cursar en ingeniería, así mismo como el análisis de elementos finitos, no es parte de la enseñanza regular en los cursos de ingeniería en la Universidad de El Salvador o cualquier otra universidad.

Se ha encontrado información acerca de modelos en computadora sobre los esfuerzos residuales tomando en cuenta la transformación martensítica y los esfuerzos térmicos en distintos países y universidades, por ejemplo varios estudios realizados en el laboratorio computacional de la universidad de Argentina<sup>[10-11]</sup>, donde se hacen simulaciones sobre el proceso de la generación de esfuerzos residuales generando valores de cambios de densidad utilizando un software especial y luego utilizando las subrutinas de Abaqus (un software de simulación de elementos finitos, llevan a cabo modelos de esfuerzos residuales. Existen dos documentos describiendo este proceso. Además con diferentes niveles de detalles este mismo fenómeno ha sido estudiado y simulado por diferentes instituciones educativas estadounidenses.

En la universidad de El Salvador solo se realizan principalmente simulaciones de procesos CNC, y en algunas ocasiones de sistemas neumáticos o electro neumáticos, y en algún tipo de materias, pero no existe la

enseñanza de los análisis de los elementos finitos. Existe además un centro de cómputo donde se encarga de enseñar diferentes paquetes de software útiles para el diseño de procesos y simulaciones CNC. Por lo tanto la simulación usando Abaqus es algo prácticamente en la Universidad de El Salvador.

Además el tema de los esfuerzos residuales en acero parece que nunca se ha tocado o al menos nunca de esta manera, no existe record de simulaciones o modelados relacionados, en la Universidad de El Salvador sin embargo existen algunos equipos para realizar diferentes tipos de pruebas y tratamientos térmicos así como el estudio de microestructura y metalografía. Por lo tanto se puede concluir que el objetivo de este proyecto es un tema que ya ha sido tocado y realizado en otras partes del mundo pero no en El Salvador.

## **ANTECEDENTES**

El temple del acero consiste en el enfriamiento rápido del material que se encuentra a una temperatura determinada (alrededor de los 750 a 780 °C, dependiendo de la aleación) con el objetivo de obtener un endurecimiento de la superficie del metal.

Existen muchas variables que intervienen al resolver el problema de predecir el estado de las tensiones residuales en el acero, éstas se manifiestan a lo largo del proceso de enfriamiento que se realiza durante el temple y son las que definen el nivel de endurecimiento que se lograra mediante el mismo.

La geometría y la masa intervienen directamente en la velocidad de enfriamiento de una pieza, por lo tanto determinan la profundidad máxima de temple que se puede lograr con una determinada velocidad de enfriamiento; la composición química se puede usar como ventaja para obtener aceros con una templabilidad mucho mayor que permitan lograr niveles y profundidad de

enfriamiento mayores, además el tamaño de grano está relacionado con este mismo fenómeno.

Por último el fluido que se usara para el proceso de enfriamiento dependerá de la velocidad de enfriamiento que se necesaria para lograr obtener un acero endurecido, para esto se utiliza la curva S de la aleación para poder conocer que velocidad es la necesaria para obtener un porcentaje determinado de martensita, los detalles de estas relaciones están descritos a continuación.

## 1.1 TAMAÑO Y MASA

Como sólo una parte de la superficie está en contacto con el medio de temple, la razón del área superficial a la masa es un factor importante para determinar la rapidez real del enfriamiento.

Esta razón está en función de la forma geométrica de la pieza y resulta ser la más pequeña de una pieza esférica. Las placas delgadas y los alambres de diámetro pequeño tiene una gran razón del área superficial y, por lo tanto, grandes rapidezces de enfriamiento. Considérese un cilindro largo tal que el área superficial de los extremos sea despreciable. El área superficial es igual al perímetro de la circunferencia multiplicada por la longitud del cilindro, y la masa es igual al área transversal por la longitud multiplicada por la densidad del material <sup>[1]</sup>. La razón es:

$$\text{Razón} = \frac{\text{Área superficial}}{\text{Masa}} = \frac{\pi DL}{(\pi/4)D^2 L \rho} = \frac{4}{D\rho} \quad (1.1)$$

donde:  $\rho$ : densidad,

D: diámetro

L: longitud.

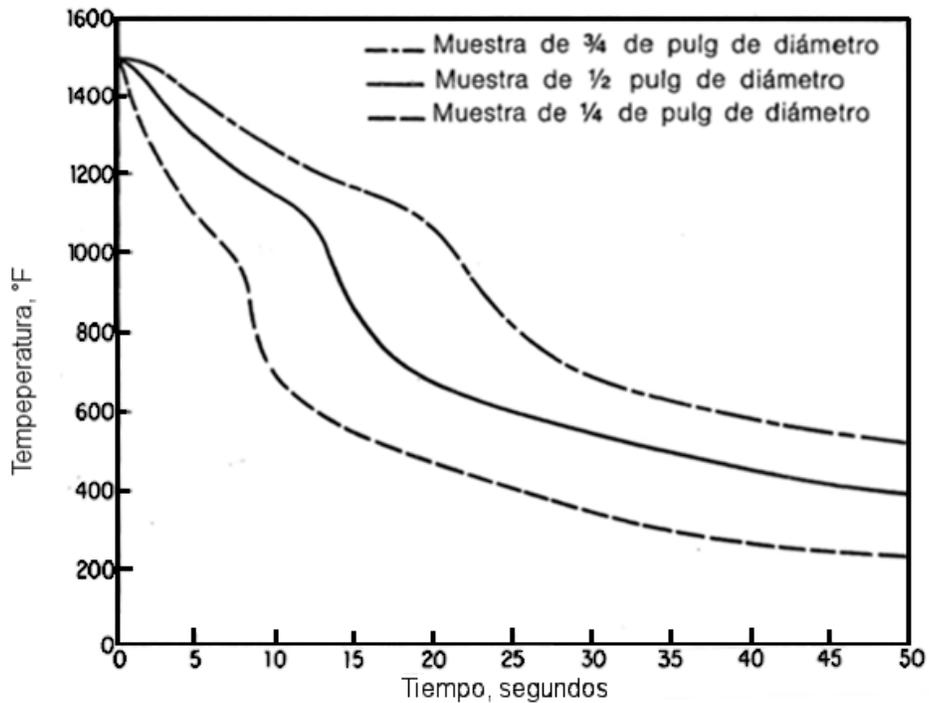


Fig. 1.1. Efecto de la masa sobre las curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de muestras de acero inoxidable templadas en aceite convencional para templar. Temperatura del aceite: 125 °F.

La ecuación expresa que la razón de enfriamiento es inversamente proporcional al diámetro. Si el diámetro aumenta, la razón del área superficial a la masa disminuirá, así como también la rapidez de enfriamiento. En otras palabras, con un medio de temple fijo, una pieza grande se enfriará más lentamente que una pequeña, tal como se presenta en la Fig. 1.1 [1].

En la Fig. 1.2 se presentan las curvas de enfriamiento tiempo vs temperatura, para diferentes posiciones de una barra de 1 pulg de diámetro durante un temple drástico. Si tal variación en las rapidezces de enfriamiento existe a lo largo del radio de una barra durante el enfriamiento, se puede anticipar que las variaciones en dureza serian evidentes cuando se cortan las mismas y se determina la dureza en la sección transversal [1].

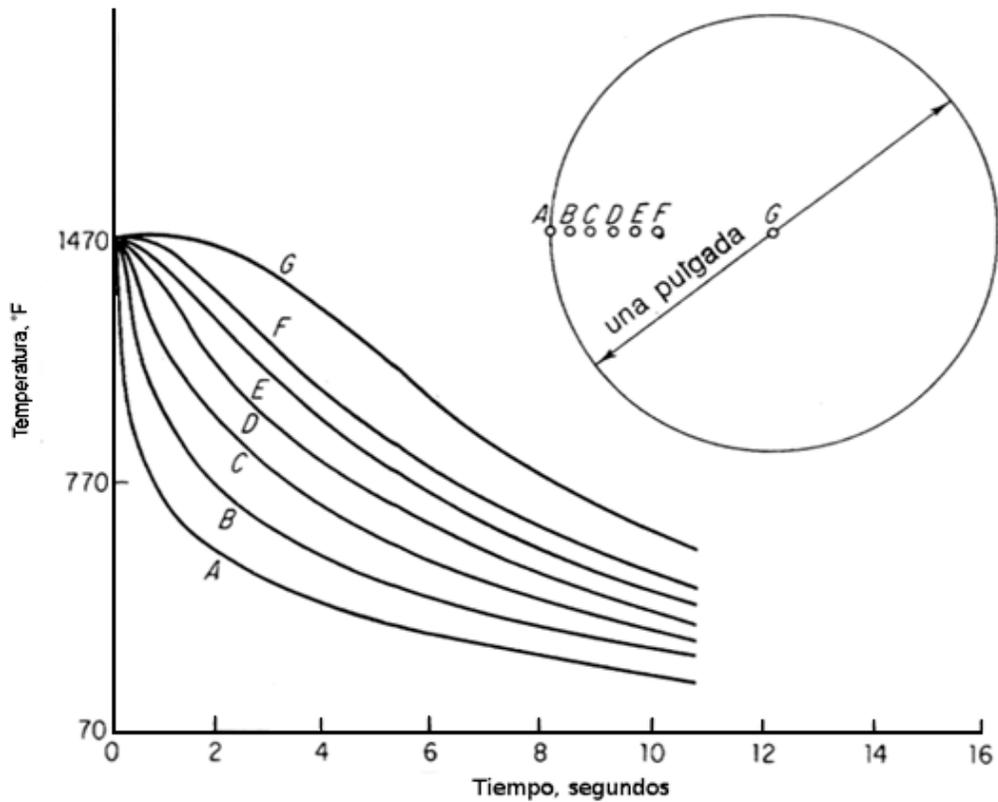


Fig. 1.2. Curvas de enfriamiento tiempo-temperatura para diferentes posiciones en una barra de una pulgada de diámetro templada drásticamente en <sup>[1]</sup>.

En la Fig. 1.3 se presentan los resultados de la dureza, obtenidos para los diferentes diámetros, cuya dureza superficial se mencionó antes. Esto puede llamarse diagrama de penetración de dureza o diagrama transversal de dureza, ya que la extensión se ha endurecido el acero durante el temple.

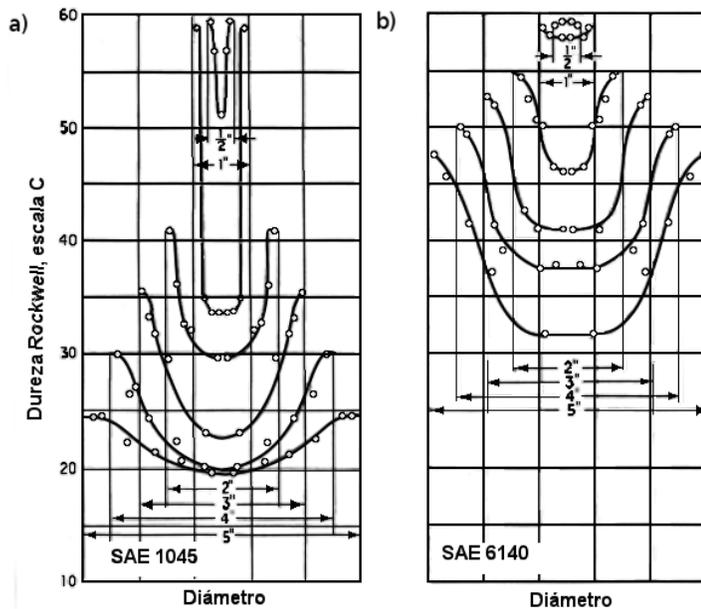


Fig. 1.3. Curvas de penetración de dureza o transversas de dureza para muestras de varios tamaños templadas en agua: (a) acero SAE 1045 y (b) acero SAE 6140 al Cr-V<sup>[1]</sup>.

El incremento en la templabilidad o la profundidad de penetración de la dureza puede lograrse mediante uno de dos métodos:

- a) Con las rapidezces reales de enfriamiento fijas, retardar la rapidez crítica de enfriamiento.
- b) Con la curva de **T-I** fija, incrementar las rapidezces reales de enfriamiento a través de un medio de temple más rápido.

Al aumentar las rapidezces de enfriamiento crece el peligro de distorsión o de agrietamiento agregar elementos de aleación es el método más seguro.<sup>[2]</sup>

## 1.2. MEDIOS DE ENFRIAMIENTO

El siguiente factor a considerar en la obtención de un temple adecuado son los medios de enfriamiento, este podría ser considerado como uno de los factores más importantes a tener en cuenta, de hecho la velocidad de

enfriamiento necesaria solo puede ser obtenida mediante la correcta selección del medio más adecuado para enfriar el acero.

El medio de temple ideal mostraría una alta rapidez de enfriamiento inicial para evitar la transformación en la región de la nariz del diagrama **T-I** y luego una lenta rapidez de enfriamiento para todo el intervalo inferior de temperatura a fin de minimizar la distorsión. Desafortunadamente, no existe un medio de temple que posea estas propiedades ideales. El agua y las soluciones acuosas de sales inorgánicas tienen altas rapidezces de enfriamiento inicial, pero estas rapidezces persisten a bajas temperaturas, donde la distorsión y el agrietamiento tienden a ocurrir. Los aceites de temple convencionales tienen una mayor etapa de capa de vapor, y una etapa de conducción de vapor más corta con una rapidez de enfriamiento menor.

Los siguientes medios de temple industriales se enumeran en orden de disminución de la severidad de temple.

- a) Solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (salmuera)
- b) Agua de Grifo o líquidas
- c) Aceite Soluble y soluciones acuosas
- d) Aceite y
- e) Aire

En la Fig. 1.4 se presentan las curvas de enfriamiento obtenidas por diferentes medios en el centro de una barra de acero inoxidable de  $\frac{1}{2}$  pulg de diámetro.

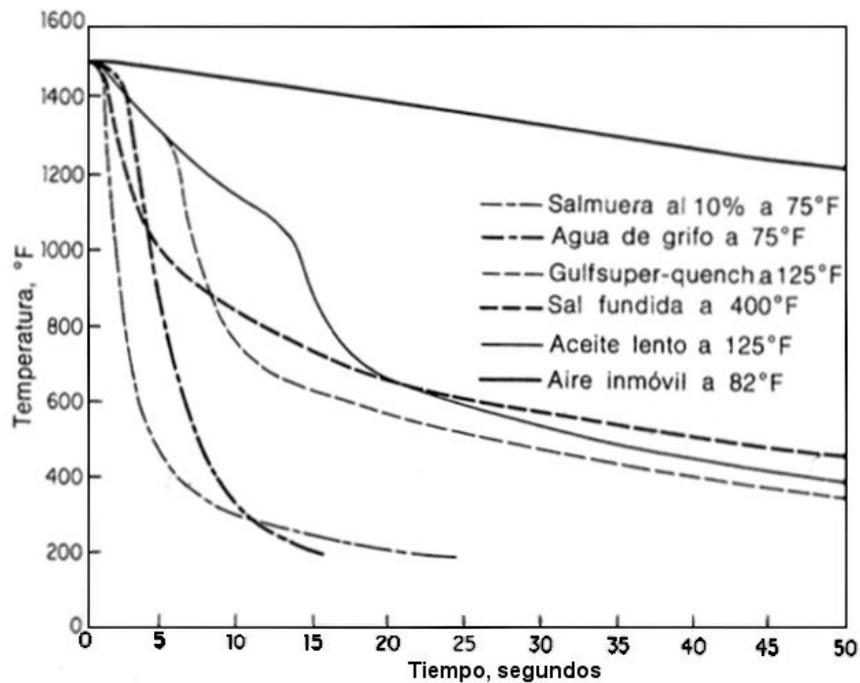


Fig. 1.4. Curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de una barra de acero inoxidable de ½ pulgadas de diámetro por 2.5 pulg de largo. [2]

### 1.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y TAMAÑO DE GRANO

Los aceros con mayor contenido de carbono mejoran su templabilidad. Esto es debido a que esta afirmación resulta bastante abstracta por sí misma, se refiere al modelo que se ha desarrollado para explicar este fenómeno. La dureza que se puede obtener mediante al temple puede variar dependiendo del tamaño y masa de un material, y hay que agregar el factor de los elementos que conforma la aleación. [1]

Sólo hay dos factores que cambian la posición de las curvas del diagrama T-I: la composición química y el tamaño de grano austenítico. Con algunas excepciones, un incremento en el contenido de carbón, en el contenido de la aleación o en el tamaño de grano de la austenita siempre retarda la transformación (mueve las curvas a la derecha), por lo menos a temperaturas superiores a la de la región de la nariz. A su vez, ésta permite la disminución de

la rapidez crítica de enfriamiento, haciendo más fácil la formación de martensita. Este retardo también se refleja en la mayor capacidad de endurecimiento, o sea, la profundidad de la penetración de dureza, de un acero con mayor contenido de aleación o tamaño de grano austenítico más grande [1].

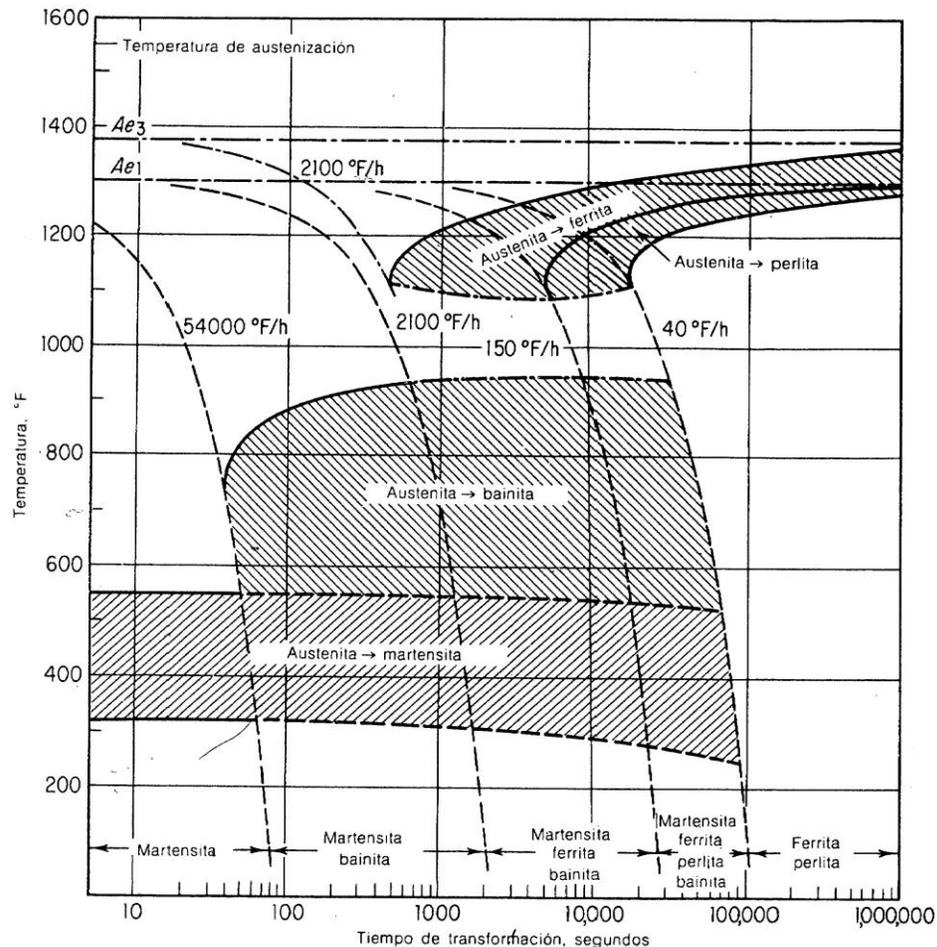


Fig. 1.5. Diagrama T-E de un acero de triple aleación (4340): 0.42% de C, 0.78% de Mn, 1.79 % de Ni, 0.80 % de Cr, 0.33 % de Mo<sup>[2]</sup>.

El efecto de aumentar el contenido de carbono apreciarse en las Figs. 1.6 - 1.8. La primera presenta el diagrama T-I de un acero de 1035. La temperatura  $M_s$  es  $\sim 750$  °F. Como éste es un acero hipoeutectoide, nótese la presencia de la región austenita y ferrita. La nariz de la curva no es visible, lo cual indica que resulta muy difícil enfriar este acero con la rapidez suficiente para obtener solo

martensita. La microestructura de un acero de bajo carbono templado en agua (Fig. 1.7) presenta una red de ferrita blanca que rodea las áreas grises de martensita de bajo carbono. En la Fig. 1.8 presenta el diagrama T-I para un acero 1050. El incremento en el contenido de carbono ha cambiado la curva alejándola lo suficiente a la derecha para hacer que la nariz sea apenas visible, y la temperatura  $M_s$  se ha reducido a 620 °F. En teoría, para formar sólo martensita, es necesario enfriar lo suficientemente rápido para alcanzar 1000 °F en ~0.7 s aproximadamente. Nótese que la región A+F se ha hecho más angosta y desaparece en vecindad de la nariz. La microestructura de un acero de medio contenido de carbono templado en agua (Fig. 1.9) presenta áreas oscuras de perlita fina que aparecen delinear algunas de las previas fronteras de grano de austenita, alguna vainita plumosa oscura, y sustancialmente más martensita, como la matriz que apareció en el acero de bajo carbono.<sup>[1]</sup>

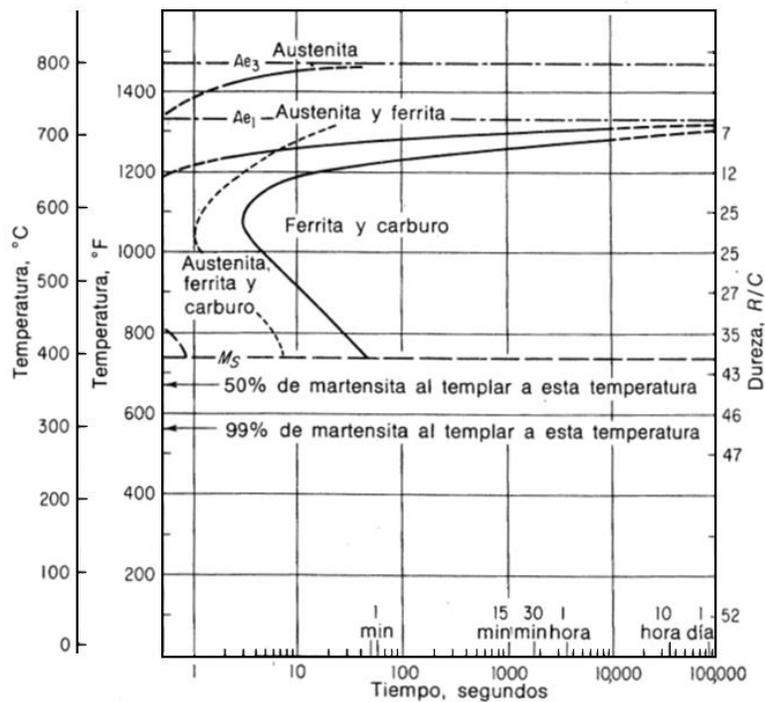


Fig. 1.6 Diagrama T-I de un acero 1035: 0.35% de carbono, 0.37% de Mn. Tamaño del grano: 75%, de 2 a 3; 25% de 7 a 8.<sup>[1]</sup>

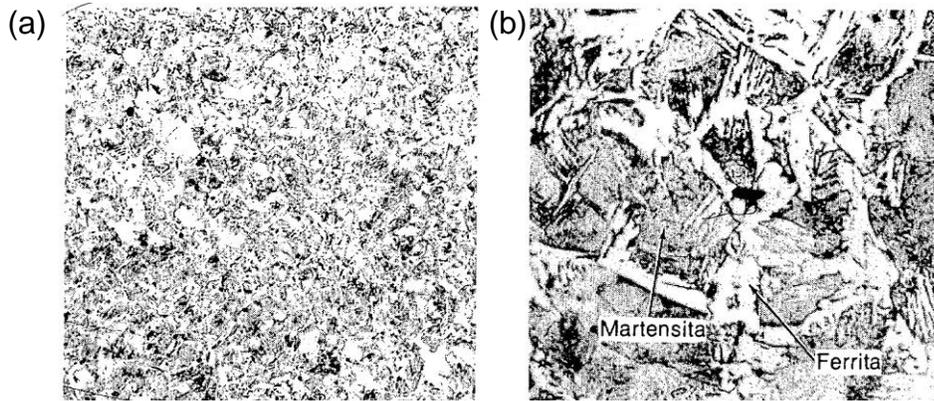


Fig. 1.7. Microestructura de un acero de bajo carbono, templado en agua, que presenta una red de ferrita blanca rodeando las grises áreas de martensita de bajo carbono: (a) 100 x y (b) 500x. Atacada químicamente con nital al 2%.<sup>[1]</sup>

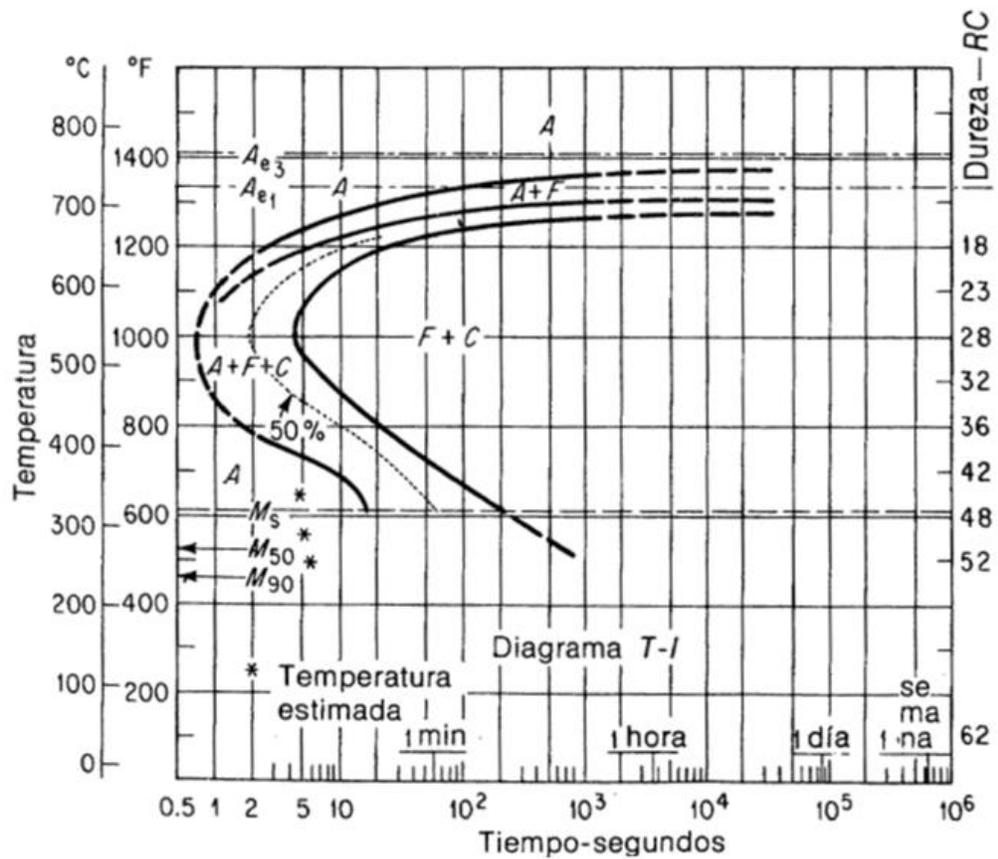


Fig. 1.8. Diagrama T-T de un acero 1050: 50% de carbono, 0.91% de Mn. Tamaño del grano: de 7 a 8; austenizado a 1670 °F<sup>[1]</sup>.

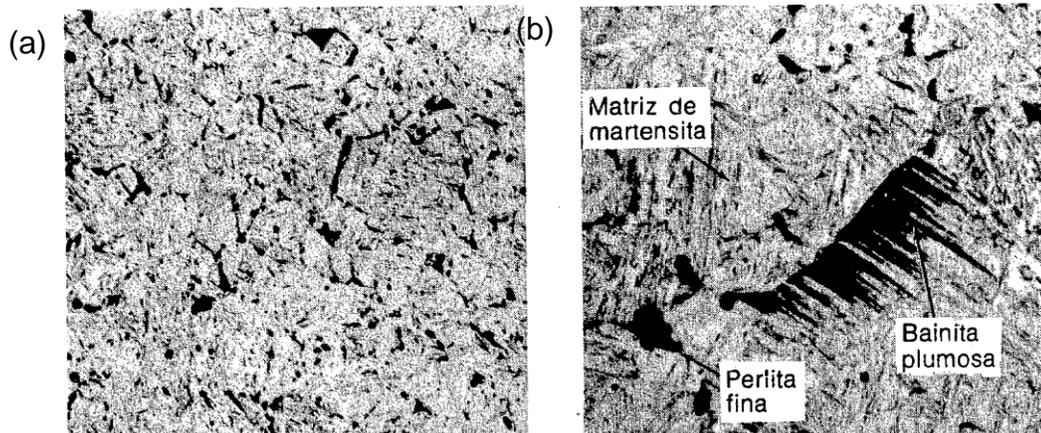


Fig. 1.9 Microestructura de un acero al medio carbono, templado e agua, que muestra áreas oscuras de perlita fina que parecen delinear alguna parte de las fronteras de grano de austenita previas, alguna bainita oscura y plumosa y una matriz de martensita: (a) 100x; (b) 750x. Atacada químicamente en nital al 2% [1].

La Fig. 1.10 presenta el efecto del Cr. La adición de 2 % de Cr no sólo ha desplazado la curva hacia la derecha, sino que también ha cambiado su forma, especialmente en la región de 900 a 1200 °F. El efecto de las adiciones de aleación es acumulativo, lo cual se presenta en el diagrama T-E para un acero de triple aleación (Fig. 1.5).

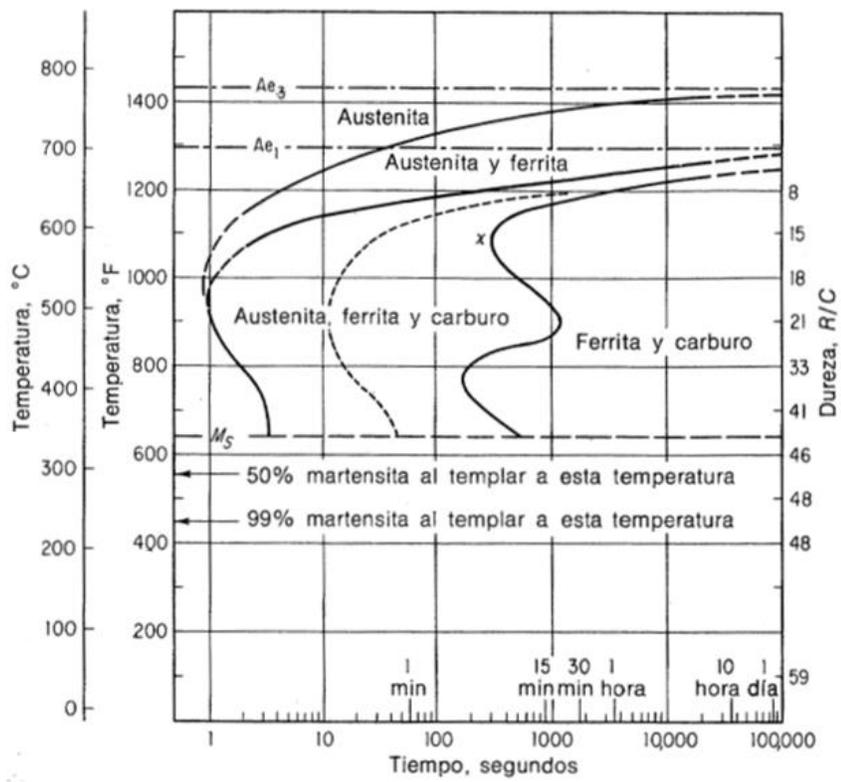


Fig. 1.10. Diagrama T-I de un acero 1335 0.35% de C. 1.85% de Mn. Tamaño del grano: 70%, 7; 30%, 2. Austenizado a 1550 °F [1].

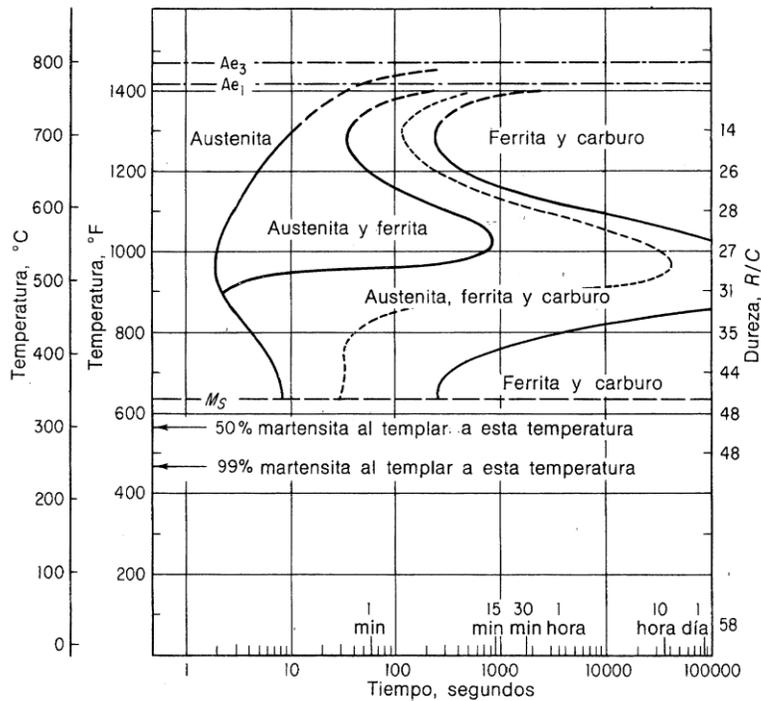


Fig. 1.11. Diagrama T-I de un acero al 0.33 % de C, 0.45% de Mn, 1.97% de Cr. Tamaño de grano de 6 a 7. Austenizado a 1600 °F.

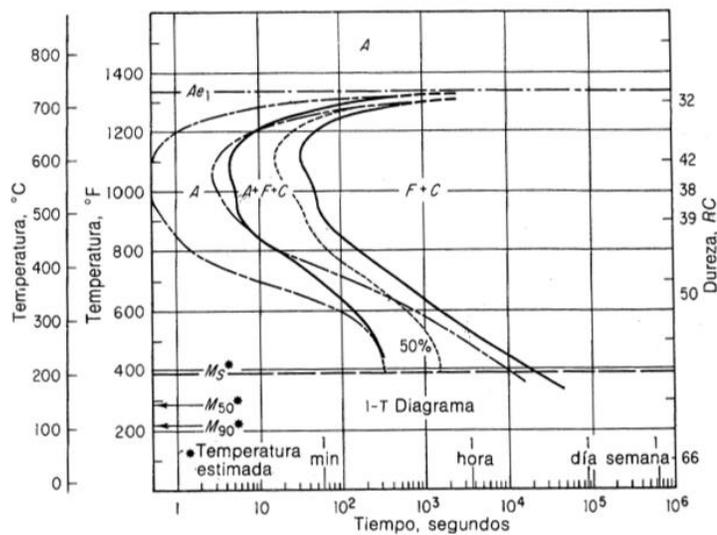


Fig. 1.12. Diagrama T-I de aceros al 0.87% de C, 0.30% de Mn, 0.27% de V. Tamaño del grano: de 2 a 3, austenizados a 1925 °F. Tamaño de grano: 11, austenizados a 1500 F, muestran el cambio de la curva T-I a la derecha engrasando el grano austenítico. °F [1].

## 1.4 ESFUERZOS RESIDUALES

Estos son esfuerzos que permanecen en la pieza después de que la fuerza aplicada ha desaparecido. Los mismos siempre se originan de una deformación plástica no uniforme. En el caso de tratamiento térmico, esta deformación plástica no uniforme puede originarla el gradiente de temperatura o el cambio de fase o generalmente una combinación de ambos factores durante el enfriamiento.

Considerando solo el efecto del gradiente de temperatura. Bajo el efecto del tamaño y la masa, previamente se mostró que durante el temple la superficie se enfría más rápido que el interior. Esto causa un gradiente de temperatura a través de la sección transversal de la pieza o una diferencia de temperatura entre la superficie y el centro. Casi todos los sólidos se expanden conforme se calientan, y se contraen conforme se enfrían. Esto quiere decir al haber pasado 10 seg, la superficie, ya que está a menor temperatura debe haberse contraído mucho más que el interior; sin embargo, como las partes externa e interna están enlazadas entre sí la parte interior, que es más larga prevendrá a la exterior de contraerse tanto como debe. Por lo tanto, se elongarán las capas exteriores, poniéndolas en tracción, mientras que las internas, a su vez, estarán a compresión. La magnitud aproximada de este esfuerzo térmico puede calcularse mediante la ecuación 1.2: <sup>[1]</sup>

$$S = \alpha E \Delta T \quad (1.2)$$

donde:  $s$  = esfuerzo térmico, lb/pulg<sup>2</sup>,

$\alpha$ : coeficiente de expansión lineal, pulg/(pulg)(°F),

$E$ : módulo de elasticidad, lb/pulg<sup>2</sup>,

$\Delta T$ : diferencia en temperatura, °F

Suponiendo que un valor promedio del coeficiente de expansión para el acero de  $6.5 \times 10^{-6}$  y  $E = 30 \times 10^6$  lb/pulg<sup>2</sup> e introduciendo estos valores en la ecuación con un  $\Delta T = 800$  (1500 a 700 °F), resulta:

$$s = (6.5 \times 10^{-6})(30 \times 10^6)(800) = 156000 \text{ lb/pulg}^2$$

El esfuerzo térmico aproximado que se encuentra entre la capa exterior y la capa interior debido a la diferencia de temperatura de 800 °F. Este esfuerzo se debe distribuir ahora entre la capa interior y exterior, el esfuerzo promedio será inversamente proporcional al área disponible para soportar este esfuerzo. Suponiendo que las capas externas constituyan la cuarta parte del área de la sección transversal, el esfuerzo de tracción promedio sobre la parte exterior será igual a  $\frac{3}{4} \times 156000$  o 11700 lb/pulg<sup>2</sup>, mientras que el esfuerzo compresivo promedio sobre la parte interior será de  $\frac{1}{4} \times 156000$  o 39000 lb/pulg<sup>2</sup>. La Fig. 1.13 se observa esquemáticamente esta distribución de esfuerzos. La Fig. 1.13 presenta una drástica caída en el esfuerzo que está en la unión de las capas internas y externa, debido a una drástica caída en la temperatura. Realmente la temperatura no cae en forma drástica, sino que cambia gradualmente a través de la sección transversal. Una representación de la distribución de esfuerzos aproximada a la real, se presenta por medio de la curva punteada de la Fig. 1.13 <sup>[1]</sup>.

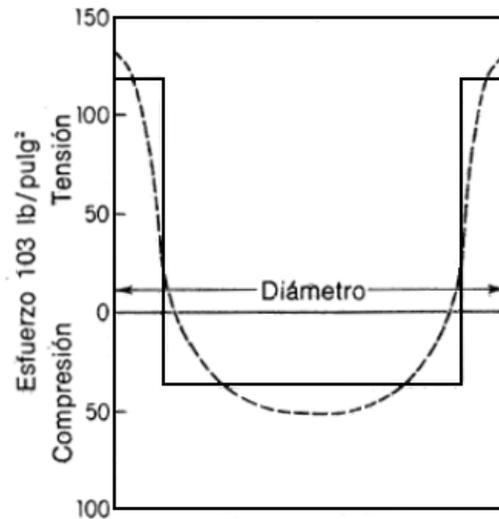


Fig. 1.13. Representación esquemática de la distribución de esfuerzos por todo el diámetro, debido al gradiente de temperatura. La curva punteada indica una representación más real de la distribución de esfuerzos <sup>[1]</sup>.

El análisis anterior revela que el esfuerzo en la superficie puede alcanzar un valor muy alto. Si el esfuerzo excede la resistencia límite del material, se producen fisuras. Si el esfuerzo está por debajo de la resistencia de cedencia del acero, se llevará a cabo elásticamente. Cuando la pieza ha alcanzado la temperatura ambiente y por lo tanto el esfuerzo por temperatura sea cero, no habrá distorsión, si el esfuerzo excede la resistencia de fluencia, la capa superficial se deformará plásticamente o se elongará en forma permanente. A la temperatura ambiente, la superficie tendrá esfuerzo compresivo residual en tanto la parte interna poseerá esfuerzo de tracción residual. <sup>[1]</sup>

Como la austenita fcc, constituye una estructura más densa que cualquier subproducto de transformación; por lo tanto, cuando la austenita cambia a ferrita, perlita, bainita o martensita, se presenta una expansión. Entre las temperaturas  $M_s$  y  $M_f$ , la transformación de austenita a martensita da lugar a una expansión en longitud. Después de la temperatura  $M_f$  la martensita sufre una contracción normal. <sup>[1]</sup>

Al considerar el efecto combinado del gradiente de temperatura y del cambio de fase para dos posibilidades: a) acero endurecido en toda su extensión, y b) acero con poca profundidad de endurecimiento. [1]

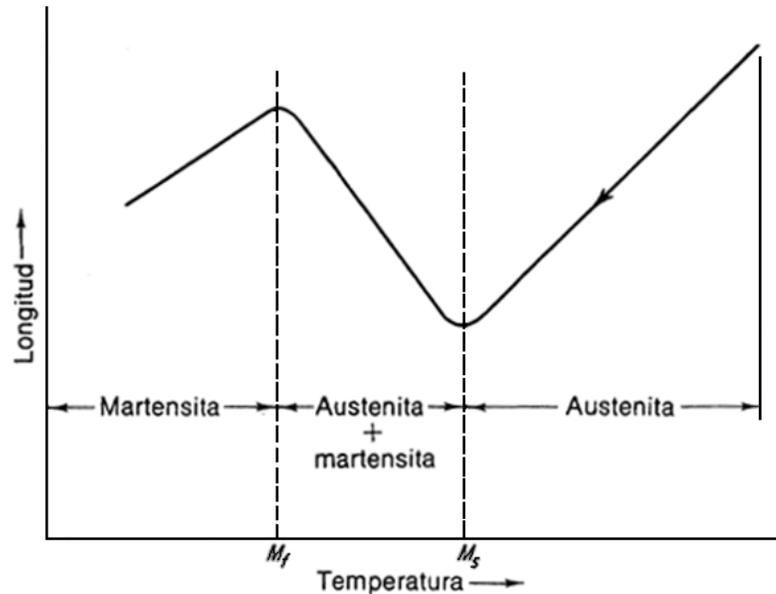


Fig. 1.14 Curva esquemática de dilatación o expansión para la transformación martensítica [1].

La Fig. 1.15 presenta las curvas de enfriamiento de la superficie y del centro, sobrepuesta en el diagrama T-t para el acero totalmente endurecido. Como la rapidez del enfriamiento del centro excede la rapidez crítica de enfriamiento, la pieza será totalmente martensítica a través de su diámetro. Durante la primera etapa, el tiempo  $t_1$ , los esfuerzos presentes se deben al gradiente de temperatura. La superficie, prevenida de contraerse por el centro tanto como debería, estará a tracción mientras el centro se hallará a compresión. Durante la segunda etapa, entre los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , la superficie, habiendo alcanzado la temperatura  $M_s$ , se transforma a martensita y se expande; sin embargo, el centro sufre contracción normal debido al enfriamiento. La contracción del centro prevendrá a la superficie de expandirse tanto como

debería, y la superficie tendera a estar en compresión, en tanto que el centro tendera a estar en tensión. Después de  $t_2$ , la superficie ha alcanzado la temperatura ambiente y será una estructura dura, frágil y martensítica. Durante la tercera etapa, el centro finalmente alcanza la temperatura  $M_s$  y empieza a expandirse, formado martensita. El centro, conforme se expande, tratará de halar la superficie junto a él, poniéndola en tracción. En seguida se resumen las etapas de la condición de esfuerzo <sup>[1]</sup>. El estado de los esfuerzos de cada una de las etapas descritas esta resumido en la tabla 1.1

Tabla 1.1. Etapa de esfuerzos presentes en el enfriamientos de un cilindro de acero.

Etapa	Condición de Esfuerzo	
	Superficie	Centro
Primera(gradiente de temperatura)	Tensión	Compresión
Segunda(A→M de superficie)	Compresión	Tensión
Tercera (A→M de centro)	Tensión	Compresión

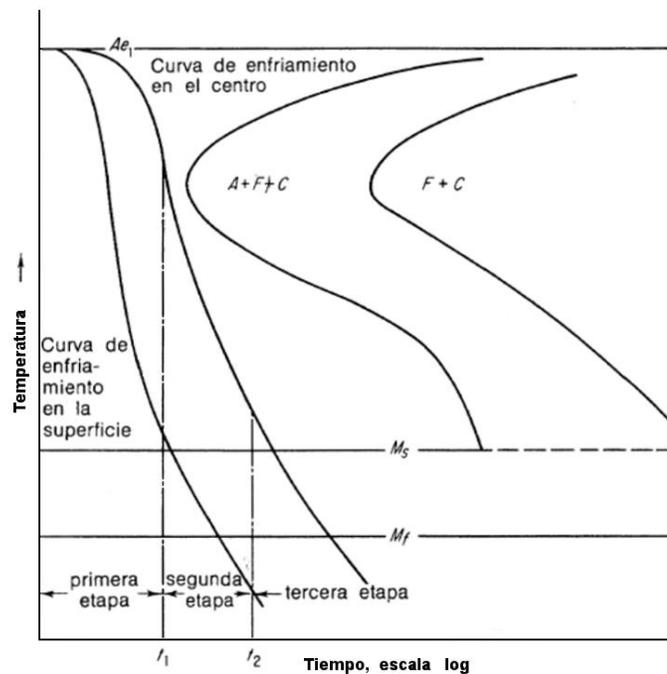


Fig. 1.15. Curvas de enfriamiento en el centro y en la superficie sobrepuestas en el diagrama T-t para ilustrar la condición de endurecimiento continuo. <sup>[2]</sup>

Para iniciar y propagar una fisura es necesario que el esfuerzo tracción esté presente. Al examinar las tres etapas teniendo en cuenta el peligro de que haya fisuras. En la primera etapa, la superficie está en tracción; sin embargo austenítica y si el esfuerzo es suficientemente alto, en vez de fisura, se deformará de manera plástica. En la segunda etapa, el centro está en tracción y es austenítico, de modo que hay tendencia a producir deformación plástica, en vez de fisuras. En la última etapa, la superficie está nuevamente en tracción; sin embargo, ahora la superficie es dura, formada por martensita inelástica. Como el centro se expande, existe poca probabilidad de deformación plástica. Durante esta etapa existe un mayor riesgo de fisura. Dependiendo de la diferencia en tiempo entre la transformación de la superficie y el centro, la fisura se puede presentar pronto después del templado o, en ocasiones, muchas horas después. La Fig. 1.16 presenta esquemáticamente el tipo de falla que puede ocurrir. La fisura tendrá lugar en las capas en tensión y alcanzará su anchura máxima en la superficie. Se reducirá gradualmente cuando alcance las capas de compresión interior. Rara vez la pieza se divide en dos partes, porque no se puede propagar la fisura a través de las capas en compresión. Mediante un estudio microscópico de la fisura en la sección transversal, es posible determinar cuánto de la sección transversal estaba en tracción y cuánto en compresión. Una regla del tratamiento térmico, que minimiza el peligro de fisura es que la pieza debe revenirse inmediatamente después del endurecimiento. El revenido dará a la martensita superficial alguna ductilidad antes de que el centro se transforme. <sup>[1]</sup>

Otro método muy efectivo para minimizar la distorsión y las fisuras es el de endurecimiento, conocido como templado interrumpido o martenzado, como el de la Fig. 1.17. Éste se lleva a cabo calentando a la temperatura de austenización propia, templando rápidamente en un baño líquido de sal mantenido por arriba de la temperatura  $M_s$ . y conservando así durante un tiempo.

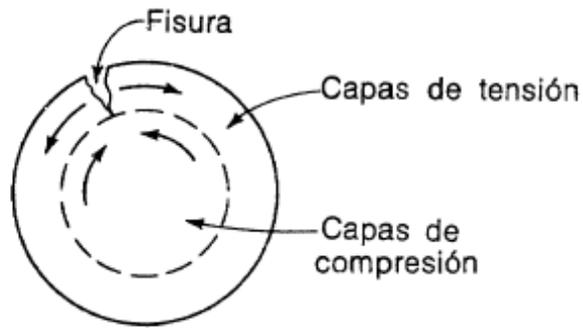


Fig. 1.16. Croquis de una posible fractura en un acero endurecido en forma continua. [1]

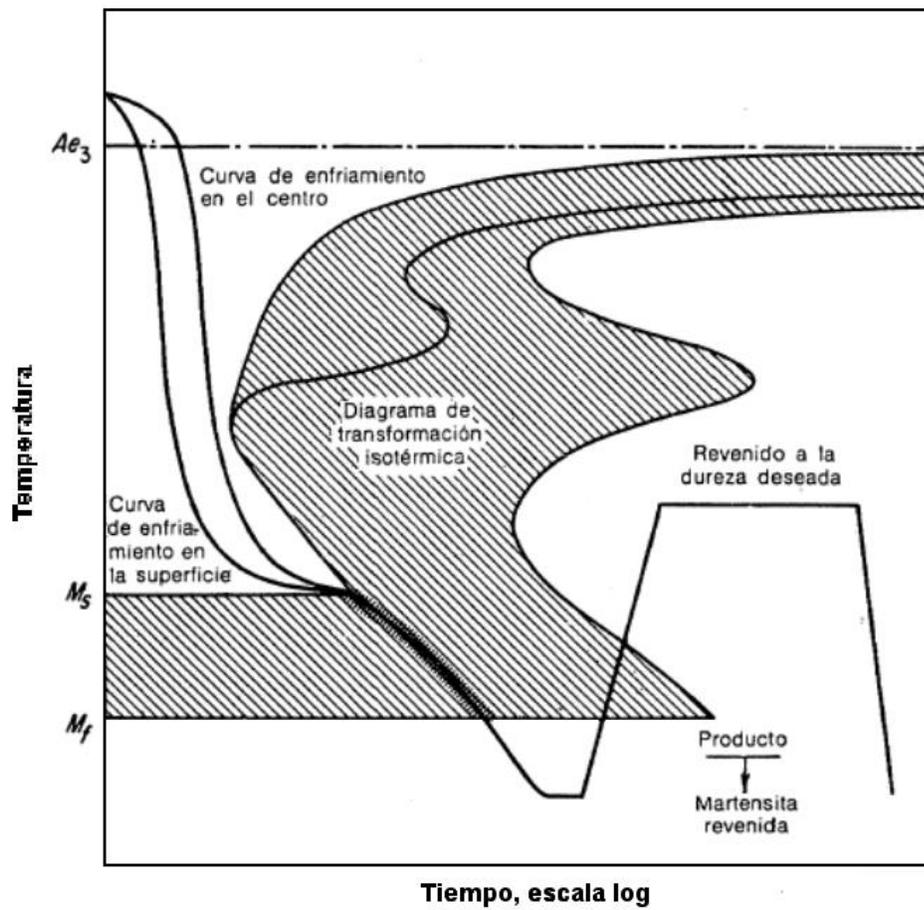


Fig. 1.17. Diagrama esquemático de transformación que presenta el austenizado por templado. [1]

En la Fig. 1.18 se presentan las curvas de enfriamiento de la superficie y del centro sobrepuestas en el diagrama T-I para un acero con poca profundidad de endurecimiento. Durante las primeras etapas, hasta el tiempo  $t_1$ , los esfuerzos presentes se deben sólo el gradiente de temperatura y, como en la condición de endurecimiento total, la superficie estará en tracción en tanto que el centro se hallará en compresión. Durante la segunda etapa, entre los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , la superficie se transformará en martensita, mientras que el centro se transformara en un producto más suave, como perlita. La pieza entera se expande, pero como la expansión resultante de la formación de martensita es mayor que la resultante de la formación de perlita, la superficie tiende a expandirse más que el centro. Esto tiende a poner el centro en tensión, mientras que la superficie esta en compresión. Después de  $t_2$ , el centro se contraerá en el enfriamiento desde la temperatura de transformación hasta la temperatura ambiente. La superficie, como es martensítica y ha alcanzado la temperatura ambiente mucho antes, evitara que el centro se contraiga mucho más de lo que debe, lo cual dará como resultado mayores esfuerzo tensiles en el centro. En la tabla 1.2 se resume la condición de esfuerzos de tracción en el centro. En esta tabla se resume la condición de esfuerzo en las tres etapas: <sup>[1]</sup>.

Tabla 1.2. Etapa de esfuerzos presentes en el enfriamiento de un cilindro de acero.

Etapa	Condición de Esfuerzo	
	Superficie	Centro
Primera(gradiente de temperatura)	Tensión	Compresión
Segunda(A→M de superficie, A →P de centro)	Compresión	Tensión
Tercera (enfriamiento del centro hasta la temperatura ambiente)	Mayor compresión	Mayor Tensión

Examinando las tres etapas respecto al peligro de presentación de fisuras. En la primera, la capa superficial se halla en tracción, pero como es austenítica, si el esfuerzo es suficientemente alto, fluirá y cederá en vez de agrietarse. En la segunda etapa, el centro está en tracción; sin embargo, como la superficie y el centro se expanden, el esfuerzo de tracción será pequeño.

Durante la tercera etapa, la superficie, como una dura y rígida cáscara de martensita, evitará que el centro se contraiga conforme se enfría hasta la temperatura ambiente. Los esfuerzos de tracción en el centro pueden alcanzar un valor alto y, como el centro es perlita de relativamente baja resistencia a la tracción, durante esta etapa existe el máximo peligro de que haya fisuras. La Fig. 1.19 presenta el tipo de falla que se puede presentar en un acero de poca profundidad de endurecido. La fisura debida a los esfuerzos de tracción es interna y no puede salir a la superficie, debido al esfuerzo compresivo en las capas superficiales. Como las fisuras son internas, es difícil detectarlas. Se pueden detectar con pruebas de rayos X. <sup>[1]</sup>

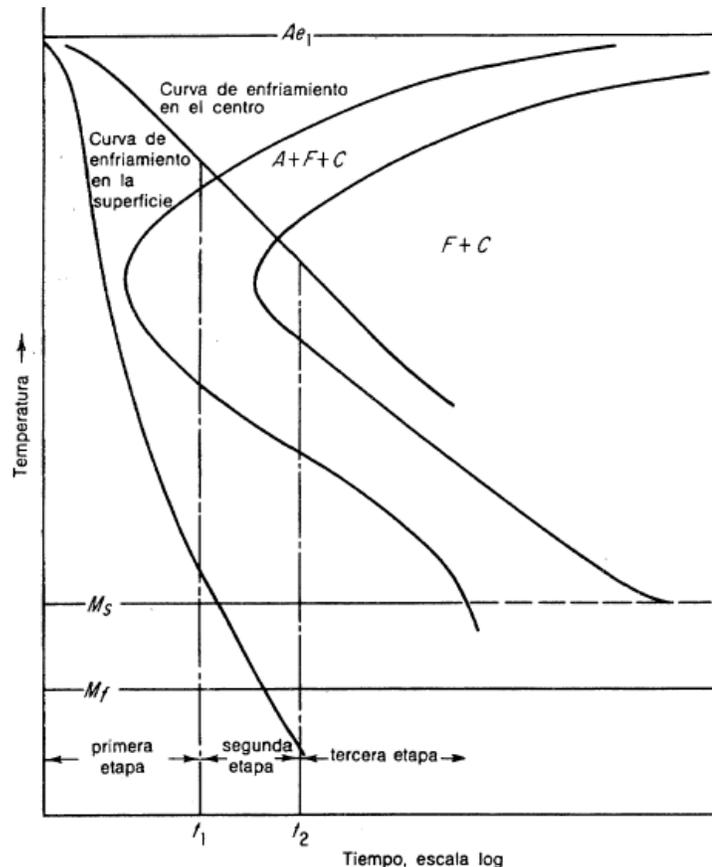


Fig. 1.18 Curvas de enfriamiento en el centro y en la superficie superpuestas en el diagrama T-t para ilustrar la condición de endurecido superficial <sup>[2]</sup>.

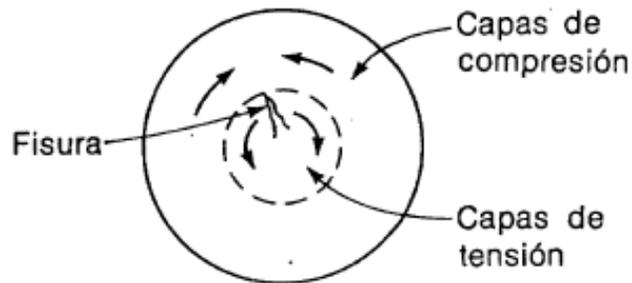


Fig. 1.19 Croquis de una posible fractura en un acero endurecido en forma superficial. <sup>[2]</sup>

En muchas aplicaciones, el esfuerzo tracción desarrollado por la fuerza externa es máximo en la superficie o cerca de ella. Para estas aplicaciones, se prefieren las piezas con endurecido poco profundo o con endurecimiento superficial, los esfuerzos superficiales suelen ser compresivos. A fin de que la superficie esté en tensión, los esfuerzos residuales compresivos deben de llegar primero a cero. Esto aumenta efectivamente la resistencia de la superficie. <sup>[1]</sup>

## 1.5. GENERALIDADES SOBRE SIMULACIÓN

Con el advenimiento de la computadora, una de las más importantes herramientas para analizar el diseño y operación de sistemas o procesos complejos es la simulación.

Aunque la construcción de modelos arranca desde el renacimiento el uso moderno de la palabra simulación data de 1940, cuando los científicos Von Neuman y Ulan <sup>[3]</sup> que trabajaban en el proyecto Monte Carlo, durante la Segunda Guerra Mundial, resolvieron problemas de reacciones nucleares cuya solución experimental sería muy cara y el análisis matemático demasiado complicado.

### 1.5.1 DEFINICIÓN DE SIMULACIÓN

Thomas H. Naylor<sup>[3]</sup> la define la Simulación como “una técnica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos de mundo real a través de largos periodos de tiempo.

La definición tiene un significado muy amplio, ya que puede incluir desde una maqueta, hasta un sofisticado programa de computadora. H. Maisel y G. Gnugnoli <sup>[3]</sup> definen la simulación como “una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos períodos de tiempo.

Otro estudioso del tema como Robert E. Shannon <sup>[3]</sup> definen la simulación como “el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

### 1.5.2. ETAPAS PARA REALIZAR UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Los pasos necesarios para llevar a cabo un experimento de simulación son los siguientes <sup>[3]</sup>:

- **Definición del sistema.** Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan

dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio.

- **Formulación del modelo.** Una vez que están definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa al modelo.
- **Colección de datos.** Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se defina con claridad y exactitud o datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Normalmente, la información requerida por un modelo va a requerir para producir los resultados deseados.
- **Implementación del modelo en la computadora.** Con el modelo definido, el siguiente paso es decidir se utiliza algún lenguaje como FORTRAN, BASIC, ALGOL, etc., o se utiliza algún lenguaje como GPSS, simula, simscrept, etc., para procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.
- **Validación.** Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta etapa es posible detallar las deficiencias en la formulación del modelo o de los datos alimentados al modelo. Las formas más comunes de validar un modelo son:
  1. La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
  2. La exactitud con que se predicen datos históricos.
  3. La exactitud en la predicción del futuro.
  4. La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.

5. La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.
- **Experimentación.** La experimentación con el modelo se realiza después de que éste ha sido validado. La experimentación consiste en generar datos deseados y en realizar análisis sensibles de los índices requeridos.
  - **Interpretación.** En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y en base a esto se toma una decisión.
  - **Documentación.** Dos tipos de documentación son requeridos para hacer mejor uso del modelo de simulación. La primera se refiere a la documentación del tipo técnico, es decir a la documentación que el departamento de procesamiento de Datos debe tener del modelo. La segunda se refiere al manual del usuario, con el cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado, a través de una terminal de computadora.

### 1.5.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL USO DE SIMULACIÓN

Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software que actualmente existe en el mercado, han hecho que esta técnica sea una de las herramientas más ampliamente utilizadas en el análisis de sistemas. Además, de las razones antes descritas, Thomas H. Naylor ha sugerido que un estudio de simulación es muy recomendable por que presenta las siguientes ventajas <sup>[3]</sup>:

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.

- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento de sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren las operaciones y eficiencia del mismo.
- La técnica de simulación puede ser utilizada como un instrumento pedagógico para enseñar a estudiantes habilidades básicas como en análisis estadístico, análisis teórico, etc.
- La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan con el sistema y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables.
- La técnica de simulación puede ser usada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales se tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.
- La técnica de simulación se puede utilizar también para entrenamiento personal. En algunas ocasiones se puede tener una buena representación de un sistema, y entonces a través de él es posible entrenar y dar experiencia a cierto tipo de personal.

A diferencia de las ventajas mencionadas, la técnica de simulación presenta el problema de requerir equipo computacional y recursos humanos costosos. Además, generalmente requiere bastante tiempo para que un modelo de simulación sea desarrollado y perfeccionado. Finalmente, es posible que la alta administración de una organización no entienda esta técnica y esto crea dificultades al vender la idea.

## 1.6. DECLARACIÓN COMPLETA DEL PROBLEMA

En orden de calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones durante el temple de un componente tratado térmicamente es necesario saber [5].

- i. La completa relación entre esfuerzo y deformación, incluyendo ambos componentes elástico y plástico.
- ii. La ecuación de equilibrio.
- iii. Las ecuaciones de compatibilidad y la relación de deformación-desplazamiento.
- iv. Las condiciones de frontera.
- v. EL criterio de esfuerzos.

En orden de llevar a cabo estos cálculos es además necesario poseer un conjunto de relaciones entre la temperatura y la posición a varios tiempos durante el proceso de enfriado así como las relaciones entre temperatura y propiedades del material, ejemplo, el módulo de Young, el límite de esfuerzo de cedencia, el coeficiente de endurecimiento por trabajo mecánico y el coeficiente de expansión. Mucho del desarrollo de este análisis específico al tratamiento térmico debe involucrar la introducción de éstas cualidades como funciones del tiempo y temperatura, más que constantes. Conocimiento de tales relaciones funcionales también implica conocimiento de la estabilidad estructural del material y la cinemática de cualquier fase de transformación que pueda ocurrir [5].

El problema general de la generación de esfuerzos térmicos es una cuestión de gran dificultad que no es posible dar solución por los métodos tradicionales de análisis. Por lo tanto, comparativamente hasta hace poco, el interés ha estado confinado al análisis de formas simples, que permiten el uso de simplificaciones. En los últimos 15 años la introducción de computadoras digitales de alta velocidad ha conducido al uso de técnicas numéricas, en particular la técnica de elementos finitos. Este método es, en principio, capaz de resolver cualquier problema que concierne con la generación de esfuerzos

térmicos. Su uso hasta ahora ha estado confinado a las mismas relativamente geometrías sencillas. Solo recientemente el método ha sido aplicado, por ejemplo a secciones radiales a través de dientes de engranes, o placas circulares finitas <sup>[5]</sup>.

## **1.7. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Aunque el ser humano es capaz de llevar a cabo operaciones lógicas y procesos intelectuales con mucha precisión, así como lograr entender los fenómenos y fuerzas que rigen el “funcionamiento” del mundo en que habita, tiene problemas para entender el comportamiento real de muchos fenómenos, debido a que en muchos casos son fenómenos son continuos es decir no existe ningún tipo de segmentación aparente, para lograr explicar estos fenómenos los matemáticos han creado herramientas y métodos que nos permiten con nuestra capacidad limitada entender y predecir fenómenos que de otra forma no se pueden abordar.

El mundo en que vivimos es un mundo continuo, que matemáticamente puede ser descrito por medio de diferenciales, entre dos cantidades diferentes sabemos que hay un número infinito de diferenciales, pero para poder resolver este tipo de incógnitas requerimos discretizar los sistemas.

Debido al constante esfuerzo de muchos matemáticos y físicos se han creado métodos cada vez más acertados para convertir cuerpos continuos en entidades discretas cuasi equivalentes que permiten la resolución de modelos con la exactitud requerida para extraer información realista de estos, entre muchos métodos el que ha cobrado gran popularidad es el método de los elementos finitos, que puede ser usado para infinidad de problemas y planteamientos, desde sólidos, líquidos e incluso corrientes eléctricas y magnéticas.

El método de los elementos finitos es una herramienta matemática muy poderosa y compleja y su estudio requiere muchas horas de dedicación, sin embargo a continuación se presenta un breve introducción al método.

### **1.7.1. GENERALIDADES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Los casos en los que se obtiene un modelo adecuado con un número finitos de componentes bien definidos son denominados “discretos”. Otros problemas pueden ser subdivididos indefinidamente y el problema puede definirse usando la ficción matemática del infinitésimo; estos problemas se pueden llamar “continuos” [2].

Con la llegada de las computadoras digitales, los problemas discretos pueden resolverse generalmente sin dificultad, aun cuando el número de elementos sea muy elevado. Como la capacidad de las computadoras es finita; y los problemas continuos sólo se pueden resolver de forma exacta mediante manipulaciones matemáticas.

Para vencer la dificultad que presenta la solución de problemas continuos reales, los ingenieros y matemáticos han ido proponiendo a través de los años diversos métodos de discretización. La aplicación de estos métodos hace necesario efectuar alguna aproximación de tal manera que quepa esperar que la misma se acerque a la solución continua verdadera.

El método de elementos finitos es el “procedimiento general de discretización de los problemas continuos planteados por expresiones definidas matemáticamente” [2].

Con el transcurso de los años se han ido desarrollando métodos generales para analizar problemas de naturaleza discreta. Todos los análisis siguen un patrón general que puede adaptarse universalmente a todos los sistemas discretos. Es por lo tanto posible definir un sistema discreto tipo.

La existencia de una manera única para abordar los problemas discretos tipo lleva a la primera definición de los elementos finitos como procedimiento de aproximación a problemas continuos, de tal forma que <sup>[2]</sup>:

- a) El continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros, y
- b) La solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos sigue precisamente las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos tipo.

### **1.7.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO**

Por ejemplo, en una figura plana formada por distintos elementos enlazados entre sí en los nudos (Fig. 1.20), numerados del 1 al  $n$ . de tal forma que son enlaces que no transmiten momento. Además, se supone que ya se conocen todas las propiedades de cada uno de los elementos. Así pues se examina un (1) miembro representativo asociado con los nudos 1, 2 y 3, las fuerzas que actúan en los nudos están inequívocamente definidas por los desplazamientos de tales nudos, la carga distribuida ( $P$ ) actúa sobre el elemento, y su deformación inicial. Las fuerzas y los desplazamientos se definen mediante las componentes apropiadas ( $U$ ,  $V$  y  $u$ ,  $v$ ) en un sistema de coordenadas cartesianas <sup>[2]</sup>.

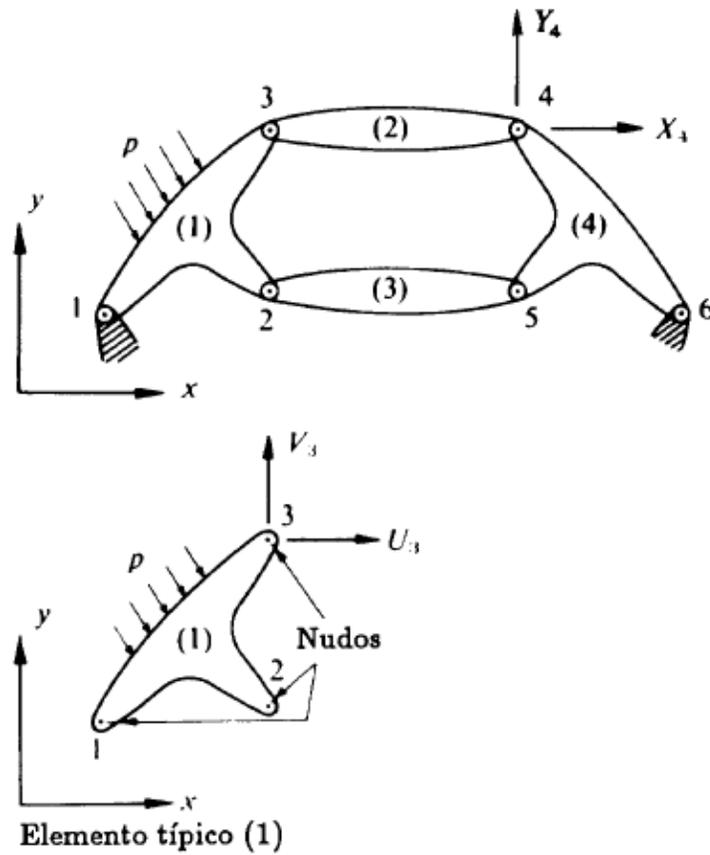


Fig. 1.20. Estructura típica formada por elementos interconectados <sup>[2]</sup>.

Expresando en forma matricial las fuerzas que actúan en todos los nudos (3 en este caso) del elemento (1), se tiene <sup>[2]</sup>

$$q^1 = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ q_3^1 \end{Bmatrix} \quad q_1^1 = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{Bmatrix}, \quad \text{etc.} \quad (1.3)$$

y para los desplazamientos nodales

$$a^1 = \begin{Bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ a_3^1 \end{Bmatrix} \quad a_1^1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{Bmatrix}, \quad \text{etc.} \quad (1.4)$$

Suponiendo que el elemento presenta un comportamiento elástico lineal, la relación característica será siempre de la forma

$$q^1 = K^1 a^1 + f_p^1 + f_{\varepsilon_0}^1 \quad (1.5)$$

En donde  $f_p^1$  representa las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier carga distribuida que actúe sobre el elemento y  $f_{\varepsilon_0}^1$  las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier deformación inicial, como la que puede ocasionar un cambio de temperatura si los nudos tienen impedido todo el desplazamiento de los nudos.

Similarmente, mediante un análisis o experimento preliminar se pueden definir unívocamente las tensiones o reacciones internas en cualquier punto o puntos especificados del elemento, en función de los desplazamientos de los nudos. Definiendo esas tensiones mediante la matriz  $\sigma$  se obtiene una relación de la forma

$$\sigma^1 = S^1 a^1 + \sigma_p^1 + \sigma_{\varepsilon_0}^1 \quad (1.6)$$

Donde los dos últimos términos son simplemente tensiones originadas por las cargas distribuidas que actúan sobre el elemento o por tensiones iniciales cuando se restringe el desplazamiento en los nudos [2].

La matriz  $K^e$  se conoce como matriz de rigidez del elemento y la matriz  $S^e$  como matriz de esfuerzos del elemento (e).

Estos argumentos y definiciones se pueden aplicar con carácter general. Aumentado el número de componentes o grados de libertad según aumenten el número de relaciones como es en el caso de estructuras tridimensionales.

Las matrices de rigidez de los elementos serán por lo tanto, siempre cuadradas y de la forma<sup>[2]</sup>.

$$K^e = \begin{bmatrix} K_{ii}^e & K_{ij}^e & \dots & K_{im}^e \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ K_{mi}^e & \dots & \dots & K_{mm}^e \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Donde  $K_{ii}^e$  , etc., son sub matrices también cuadradas de dimensiones  $l \times l$  siendo  $l$  el número de componentes de fuerza a considerar en los nudos. [2]

Como un ejemplo se puede considerar una barra articulada plana de sección uniforme  $A$  y módulo de elasticidad  $E$  que se presenta en la Fig. 1.21. La barra está sometida a una carga lateral uniforme  $P$  y a una deformación uniforme debida a la temperatura. [2]

$$\varepsilon_0 = \alpha T \quad (1.8)$$

Si los extremos de la barra están definidos por las coordenadas  $x_i, y_i, x_n, y_n$  su longitud puede calcularse mediante la ecuación 1.9.

$$L = \sqrt{[(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2]} \quad (1.9)$$

Y su ángulo de inclinación respecto a la horizontal por la ecuación (1-10)

$$\beta = \tan^{-1} \frac{y_n - y_i}{x_n - x_i} \quad (1.10)$$

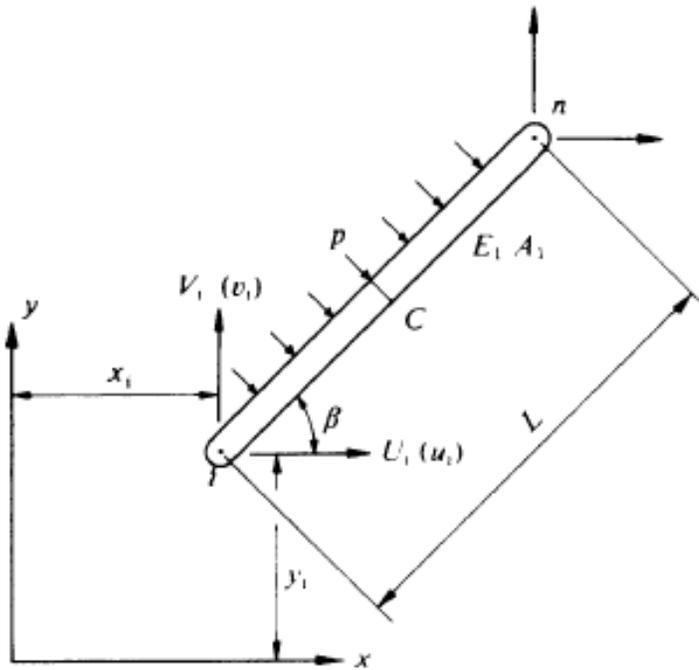


Fig. 1.21. Barra articulada en los extremos.

Solamente se deben de considerar dos componentes de fuerzas y de desplazamientos en cada nudo.

Las fuerzas nodales debidas a la carga lateral son, evidentemente

$$f_p^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_n \\ V_n \end{Bmatrix}_p = - \begin{Bmatrix} -\text{sen}\beta \\ \text{cos}\beta \\ -\text{sen}\beta \\ \text{cos}\beta \end{Bmatrix} \frac{pL}{2} \quad (1.11)$$

y representan las componentes adecuadas de las reacciones de una viga simplemente apoyada,  $pL/2$ . Similarmente, para impedir la expansión térmica  $\varepsilon_0$  se necesita una fuerza axial ( $E\alpha TA$ ), lo que da unas componentes.

$$f_p^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_n \\ V_n \end{Bmatrix}_p = - \begin{Bmatrix} -\text{sen}\beta \\ \text{cos}\beta \\ -\text{sen}\beta \\ \text{cos}\beta \end{Bmatrix} \frac{pL}{2} \quad (1.12)$$

Finalmente los desplazamientos del elemento

$$a^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v \\ u_n \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (1.13)$$

Originaran un alargamiento  $(u_n - u_i)\cos\beta + (v_n - v_i)\sen\beta$  | multiplicar éste por  $EA/L$  se obtiene la fuerza axial cuya componentes pueden calcularse. Tras ordenar las ecuaciones obtenemos la expresión general. [2]

$$K^e a^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_n \\ V_n \end{Bmatrix}_\delta = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2\beta & \sen\beta\cos\beta & \cdot & -\cos^2\beta & -\sen\beta\cos\beta \\ \sen\beta\cos\beta & \sen^2\beta & \cdot & -\sen\beta\cos\beta & -\sen^2\beta \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ -\cos^2\beta & -\sen\beta\cos\beta & \cdot & \cos^2\beta & \sen\beta\cos\beta \\ -\sen\beta\cos\beta & -\sen^2\beta & \cdot & \sen\beta\cos\beta & \sen^2\beta \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Así pues, se ha obtenido una ecuación general para el caso elemental estudiado de la ecuación (1.5) general. Es así mismo muy sencillo establecer los esfuerzos en cualquier lugar del elemento en la forma establecida por la Ec. (1.6).

Para elementos más complicados se requieren procedimientos de análisis más elaborados, pero los resultados tienen la misma forma. Cabe recalcar que la matriz de rigidez obtenida para el elemento aislado ha resultado ser simétrica. Se supuesto que las propiedades del elemento cumplen relaciones lineales sencillas [2].

### 1.7.3. ENSAMBLAJE Y ANÁLISIS DE UNA ESTRUCTURA

Al considerar de nuevo la estructura hipotética de la Fig. 1.1. Para obtener una solución completa se han de satisfacer en toda ella las dos condiciones de [2]:

- a) Compatibilidad de los desplazamientos y
- b) Equilibrio.

Todos los sistemas de desplazamientos nodales a:

$$a = \begin{Bmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{Bmatrix} \quad (1.15)$$

Representando ahora a la totalidad de la estructura y donde participan todos los elementos de la misma, satisfacen automáticamente la primera condición.

Como las condiciones generales de equilibrio ya son satisfechas dentro de cada elemento solo hace falta establecer las condiciones de equilibrio en los nudos de la estructura. Las fuerzas internas, o tensiones que actúan dentro de cada elemento pueden hallarse fácilmente utilizando las características establecidas a priori para cada elemento de la Ec. (1.4). [2]

Consideremos la estructura sometida a una fuerza externa “r”

Aplicadas en los nudos:

$$r = \begin{Bmatrix} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_n \end{Bmatrix} \quad (1.16)$$

Además, de las cargas distribuidas aplicadas a cada elemento individual. Como antes, cada una de las fuerzas  $r_i$  deberá tener el mismo número de componentes que las reacciones consideradas en cada elemento.

$$r_i = \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \end{Bmatrix} \quad (1.17)$$

En este ejemplo se supone que el número de componentes es arbitrario ya que se ha supuesto que las uniones son articulaciones. Si se establece el equilibrio en un nudo cualquiera,  $i$ , cada componente  $r_i$  tiene que ser igual, a su vez, a la suma de las componentes de las fuerzas que aportan los elementos que se reúnen en dicho nudo. Así considerando todas esas componentes

$$r_i = \sum_{e=1}^m q_i^e = q_i^1 + q_i^2 + \dots \quad (1.18)$$

En donde  $q_i^1$  es la fuerza que el elemento 1 aporta al nudo  $i$ ,  $q_i^2$ , la fuerza que aporta el elemento 2, etc. Claramente, los elementos que contengan al punto  $i$  contribuirán con las fuerzas no nulas, pero para mayor claridad se han incluido todos los elementos en la sumatorio.

Al sustituir las fuerzas aportadas al nudo  $i$ , por sus expresiones dadas por la Ec. (1.3), resulta que las variables nodales  $a_i$  son comunes. [2].

$$r_i = \left( \sum_{e=1}^m K_{i1}^e \right) a_1 + \left( \sum_{e=1}^m K_{i2}^e \right) a_2 + \dots + \sum_{e=1}^m f_i^e \quad (1.19)$$

Donde

$$f^e = f_p^e + f_{\varepsilon_0}^e \quad (1.20)$$

Como antes el sumatorio sólo afecta a los elementos que contienen al nudo  $i$ . Reuniendo todas las ecuaciones se obtiene simplemente:

$$Ka = r - f \quad (1.21)$$

En la ecuación 1.21 las submatrices son

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^m K_{ij}^e$$
$$f_i = \sum_{e=1}^m f_i^e$$

Los sumatorios que comprenden a todos los elementos. Esta regla tan sencilla para ensamblar los elementos es muy útil, pues tan pronto como se conozca un coeficiente para un elemento particular se puede almacenar inmediatamente en la “posición” adecuada del computador. Este proceso general de ensamblaje constituye la característica fundamental y común a todos los cálculos por elementos finitos [2].

Si se utilizan diferentes tipos de elementos estructurales y éstos han de acoplarse, se ha de recordar que la regla para la suma de matrices sólo permite ésta si las matrices son de idénticas dimensiones. Por consiguiente las submatrices que hayan de ensamblarse deben formarse con el mismo número de componentes de fuerzas o desplazamientos. Así, por ejemplo, si un miembro es capaz de transmitir momentos a un nudo tiene que unirse a en ese nudo a otro miembro que esté articulado es necesario completar la matriz de rigidez de este último insertando convenientemente ceros en las posiciones correspondientes a las rotaciones y en las de los momentos [2].

#### 1.7.4. CONDICIONES DE CONTORNO

El sistema de ecuaciones que resulta de la Ec. (1.14) puede resolverse una vez sustituidos los desplazamientos impuestos en los apoyos. En el ejemplo de la Fig. 1.20, donde son nulas ambas componentes de los desplazamientos de los nudos 1 y 6, habría que sustituir

$$a_1 = a_6 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1.22)$$

Lo que equivale a reducir el número de ecuaciones de equilibrio (en este caso doce) anulando las dos primeras y las dos últimas, y reduciéndose así el número total de incógnitas a ocho. Es conveniente, sin embargo, ensamblar las ecuaciones de la forma expresada en la Ec. (1.14) para incluir todos los nudos [2].

Es obvio que para sustituir un número mínimo de desplazamientos, obligados para impedir que la estructura se mueva como un sólido rígido, será imposible resolver el sistema pues los desplazamientos no pueden quedar unívocamente determinados por las fuerzas y habría infinitas soluciones para un sistema de fuerzas dado. Este hecho, físicamente evidente, debe interpretarse matemáticamente en razón de que la matriz K, al ser singular, carece de inversa. Estableciendo los desplazamientos adecuados tras la fase del ensamblaje, podrá obtenerse una solución única prescindiendo de las filas y las columnas adecuadas de las distintas matrices.

La forma del sistema de ecuaciones una vez ensambladas, es como sigue [2].

$$\begin{aligned} K_{11}a_1 + K_{12}a_2 + \dots &= r_1 - f_1 \\ K_{21}a_1 + K_{22}a_2 + \dots &= r_2 - f_2 \\ &\vdots \\ &\text{Etc.} \end{aligned}$$

Se apreciará que si imponemos un desplazamiento cualquiera, tal como  $a_1 = \bar{a}_1$ , la “fuerza” exterior  $r_1$  no puede ser impuesta y permanecerá como incógnita. Se puede prescindir de la primera ecuación y sustituir  $a_1$  por un valor conocido en las restantes ecuaciones. Este procedimiento implica un proceso de cálculo engorroso, pudiéndose alcanzar el mismo objetivo añadiendo al coeficiente  $K_{11}$  un número grande,  $\alpha I$ , y reemplazando el segundo miembro de la ecuación,  $r_1 - f_1$ , por  $\bar{a}_1 \alpha$ . Si  $\alpha$  es mucho mayor que cualquier otro

coeficiente de rigidez, esta alteración siempre equivale a reemplazar la primera ecuación por <sup>[2]</sup>.

$$\alpha a_1 = \alpha \bar{a}_1 \quad (1.23)$$

Es decir, la condición necesaria impuesta, pero se conserva la simetría del sistema y sólo se necesitan unos cambios mínimos en el orden del sistema y sólo se necesitan unos cambios mínimos en el orden de cálculo. De haber más desplazamientos impuestos se debe seguir el mismo procedimiento [2].

Una vez introducidas todas las condiciones de contorno se puede resolver el sistema de ecuaciones y obtener los desplazamientos incógnita junto con los esfuerzos internos de cada elemento. <sup>[2]</sup>.

## 1.8. SIMULACIÓN USANDO ABAQUS CAE

El software que se pretende utilizar para la simulación es Abaqus CAE, el cual es una herramienta poderosa en los análisis por computadora de elementos finitos; Abaqus está formado en diferentes niveles los cuales realizan operaciones específicas en cada paso del proceso de resolución de problemas, como se ilustra la estructura en el manual de análisis de Abaqus.

El sistema de elementos finitos Abaqus incluye [7]:

- Abaqus / Standard, un programa de uso general de elementos finitos
- Abaqus / Explicit, un explícito programa de elementos finitos dinámica
- Abaqus / CFD, un propósito general dinámica de fluidos computacional programa
- Abaqus / CAE, un entorno interactivo para crear modelos de elementos finitos, presentar análisis Abaqus, monitorear y diagnosticar los puestos de trabajo, y evaluar los resultados

- Abaqus / Viewer, un subconjunto de Abaqus / CAE que contenga sólo las capacidades de post-procesamiento del módulo de visualización [9].
- La forma de interactuar con cada uno de estos niveles es por medio de Abaqus / CAE (Fig. 1.22), este es la interfaz gráfica, que permite al usuario crear partes y establecer los parámetros requeridos para el análisis de un problema determinado, en este como se describe luego, se puede definir la geometría, materiales, propiedades físicas, interacciones entre los elementos analizados, además de crear las mallas requeridas en el análisis de elementos finitos y finalmente obtener los resultados con simulaciones del comportamiento desde el estado inicial hasta el último estado analizado durante la simulación.

Además, es capaz de realizar análisis estándar o lineales, así como aquellos donde haya comportamientos físicos no lineales o que varían con el tiempo, estos análisis son llevados a cabo durante la etapa de procesamiento, esta es la etapa donde Abaqus se encarga de realizar los cálculos de la simulación que se ha preparado. También, Abaqus posee librerías (librerías programadas en lenguaje de programación Python, que Abaqus usa para resolver los análisis) que son capaces de realizar sin ningún problema para resolver la mayor parte de los análisis con un buen grado de exactitud, además de esto Abaqus permite la creación de subrutinas que se pueden escribir en lenguaje de programación Fortran <sup>[6]</sup>.

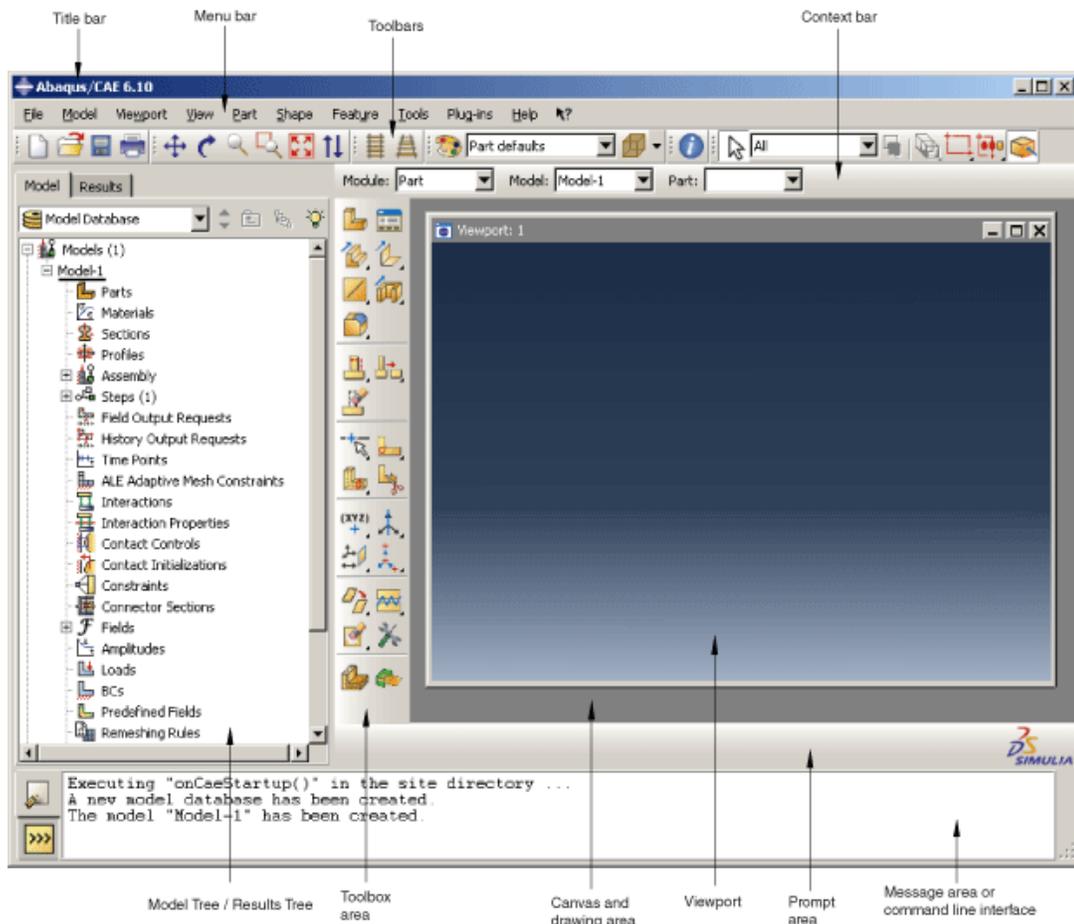


Fig. 1.22. Interfaz gráfica de Abaqus CAE. Abaqus CAE User's manual [7].

La capacidad de usar subrutinas permite a los usuarios crear análisis específicos definiendo las propiedades y los comportamientos que necesita analizar mediante el análisis de elementos finitos, siendo más específicos, permite usar un modelo matemático mucho más exacto basado en propiedades y características físicas que el usuario requiera.

## **CAPITULO 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA LA SIMULACIÓN**

En este capítulo se han retomado las etapas definidas previamente, en las cuales se describen un proceso de simulación con el objetivo de plantear de forma sistemática y ordenada la solución del problema, facilitando el desarrollo del modelo, por lo que se deben definir e investigar tanto las herramientas matemáticas que se requieren como también las propiedades físicas necesarias para la implementación de la resolución del problema utilizando análisis de elementos finitos.

Sin embargo, en este capítulo no se abarca el análisis del modelo, eso se dejará para un capítulo siguiente en donde se comparará la información obtenida mediante la simulación contra la información obtenida al realizar las pruebas de temple y determinar aproximadamente el contenido de martensita en éstas, esto servirá para comprobar que tan cercana a la realidad son las curvas de temperatura obtenidas mediante la simulación utilizando los diagramas TTT.

Se iniciará con el planteamiento básico sobre el modelo, así se definirá la forma en que se abordará el problema, desde el calentamiento, mantenimiento y seguido de la subsecuente inmersión, proceso en el cual se producen las transformaciones y como resultado los esfuerzos residuales en el material. Así, se debe simular la transferencia de calor del acero al líquido de temple, así como la expansión, contracción y por lo tanto los cambios de dimensiones del material en el caso de deformación plástica, se obtendrán las curvas de enfriamiento a diferentes espesores de las barras.

## 2.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Luego de investigar las variables que intervienen durante el temple del acero y sus efectos en el mismo es necesario definir cuál es el sistema que se desea simular, esto es muy importante ya que el objetivo de la definición es aproximarse a la profundidad de temple real con el fin de fijar lo más real la simulación; por otro lado definir algo demasiado complejo que sobrepase las capacidades del programa o el equipo disponible para este trabajo sería irrealizable y alargaría el trabajo, posiblemente haría imposible su terminación.

Primero se debe definir que es un sistema, según el libro de termodinámica de Cengel: (sistema) es una porción de materia o una región en el espacio elegida para el análisis <sup>[13]</sup>.

Al definir los límites del sistema surgen una pregunta importante, ¿se debe de incluir en el sistema el volumen del fluido de temple o simplemente tomar la muestra de acero como el sistema? Para contestar esta interrogante se consideran diferentes variables; cuando se simula se debe tener en cuenta el efecto y los mecanismos que son intrínsecos del fenómeno que se quiere resolver, en este caso introducir el metal caliente en un fluido, donde ocurren diferentes etapas que se definen por los cambios de fase durante el temple, resulta inviable agregar un volumen de fluido al elemento de estudio durante la simulación, debido a las limitaciones técnicas; por lo tanto, resulta más práctico definir las interacciones con medios externos (un fluido en este caso) por medio de las propiedades físicas de interés del fenómeno de estudio, por lo tanto como se explicará más tarde se usará información experimental que define la magnitud de la tasa de transferencia de calor según la temperatura, con lo que se podrán escoger condiciones válidas de frontera.

Por lo tanto, se define el modelo como: el volumen de las muestras de acero cada una con diferentes diámetros y de longitudes iguales a 20 cm. La aleación que se usará para el estudio será acero AISI 1045 cuyas curvas TTT se presentan en los libros de texto conocidos. Las propiedades térmicas,

mecánicas y otras relaciones que sean necesarias se definirán con más detalle en las secciones siguientes.

Entre que se tomarán en cuenta durante la simulación se tienen: Aleación del acero, líquido de enfriamiento, geometría del objeto a temple, comportamiento del acero al ser templado, profundidad de las capas templadas, valor de endurecimiento superficial, entre otras.

La relación de esfuerzo y deformación que se usarán son las definidas por la mecánica de los sólidos; es decir, la ley de Hooke, las relaciones de esfuerzo y deformación más el agregado de la relación de desplazamiento utilizada en la resolución de problemas mediante el uso de la técnica de elementos finitos. Estas relaciones han sido desarrolladas y se calcularán mediante el uso de software.

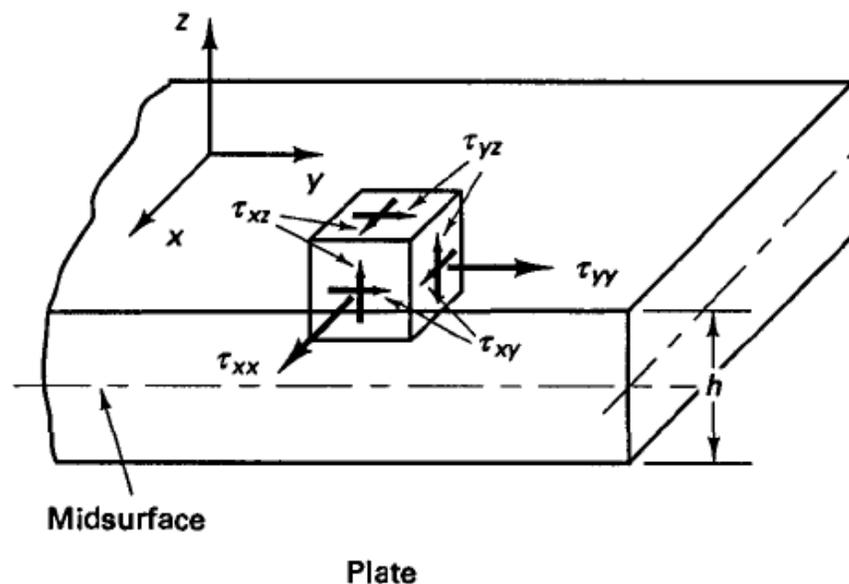


Fig. 2.1. Direcciones y planos en que actúan los esfuerzos.<sup>[2]</sup>

Al definir el sistema a simular se debe a su vez determinar las variables que interactuarán en el proceso, sus funciones y relaciones. Muchas ya han sido mencionadas en el marco teórico de esta investigación, ahora es el momento de elegir los valores y magnitudes de las mismas presentando en

forma estructurada el proceso lógico que se seguirá durante el proceso de planeación y ejecución de la simulación.

## **2.2. ENUNCIADO DEL PROCESO A SIMULAR**

El sistema a analizar son cilindros de acero SAE 1045, de 0.5, 1 y 2 pulg de diámetro y de 20 cm de largo, los cuales serán calentados hasta 850 °C y luego templados utilizando agua de grifo a la temperatura ambiente de ~23 °C.

El primer suceso observable es que la energía que el acero ha adsorbido mientras se encuentra en el horno, es transferida al fluido de temple.

La rapidez de enfriamiento dentro del elemento varía con el espesor, es decir si imaginamos una barra de acero siendo enfriada en forma brusca y la dividimos en capas usando como criterio el promedio de la rapidez de enfriamiento en el interior de la misma, se sabe que la superficie y las capas más cercanas se enfriarían a una mayor tasa que las más interiores, por lo que mientras esta se enfría existirá un gradiente de temperatura y bajo la influencia del coeficiente de dilatación se observará una contracción no uniforme de elemento, provocando la aparición de esfuerzos de tracción y compresión entre las mismas debido al diverso grado de contracción dependiendo de la temperatura del material y la rapidez de enfriamiento; los esfuerzos provocados por este enfriamiento pueden ser medidos si se considera que el enfriamiento es instantáneo utilizando la ecuación presentada en el capítulo 1 de este trabajo.

El proceso de temple puede ser resumido de la siguiente manera:

- 1) Acero a temperatura de temple,
- 2) Del horno al líquido de enfriamiento,
- 3) Tránsito de calor, y
- 4) Cambio de temperatura hasta temperatura ambiente.

En el modelo se desprecia la transferencia de calor que sucede mientras se lleva la muestra del horno al líquido de temple, si bien existe transferencia de calor debido a la interacción del aire con la pieza, la caída de temperatura no es tan brusca como la que sucede con otros fluidos como agua a temperatura ambiente o aceite de temple. Por lo tanto, al depreciar esta transferencia de calor será una convención donde se asume que la temperatura inicial de la muestra es siempre igual a la que tenía durante el instante de ser sacada del horno; es decir, la temperatura que se ha definido para el temple.

La transformación de la austenita a martensita produce un aumento en el volumen de la pieza, contrario a la contracción natural debido a la disminución de temperatura, esto produce esfuerzos residuales, por lo que estos esfuerzos al final son una combinación de los esfuerzos tanto por gradiente térmicos como también por los cambios de fases.

Combinando estos efectos se puede construir un diagrama de las variables que interactúan y en qué momento lo hacen, cabe mencionar que muchas de las variables físicas no son constantes, éstas cambian con la temperatura, en su debido momento se analizarán cuales son conveniente usar como constantes o variables.

El esquema es una representación sencilla del proceso y transformaciones que ocurren de manera simultánea. Así, para asegurar su comprensión se ha dividido en etapas.

Debido a que se tienen dos tipos de interacciones térmicas y mecánicas presentes, en lugar de tratar de establecer una simulación termo-mecánica directa, es posible correr primero una simulación para modelar los cambios de temperatura sobre el perfil de la pieza a modelar, y luego tomar el archivo de resultados para introducirlo en una simulación mecánica.

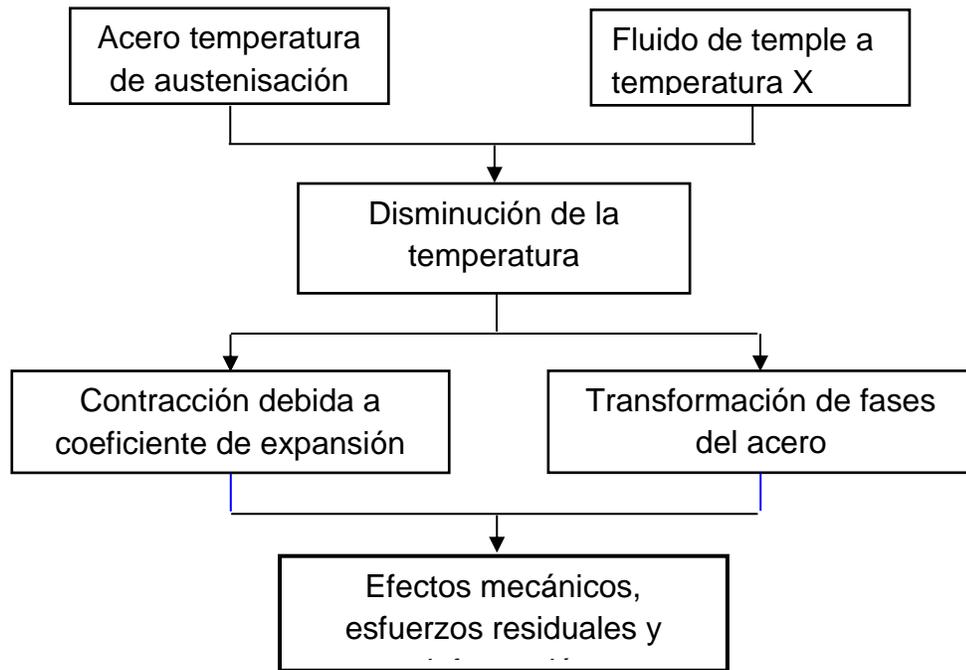


Fig. 2.2. Diagrama ejemplificando las fases del temple, relaciones y resultados.

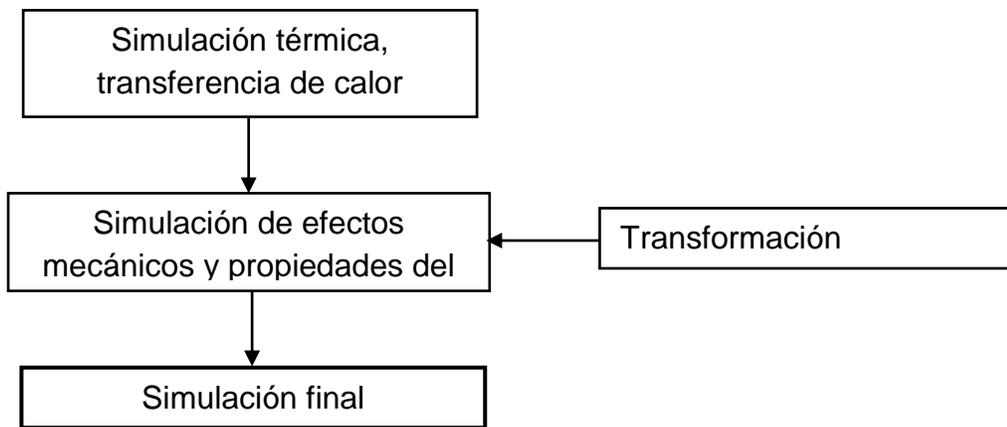


Fig. 2.3. Etapas de un proceso de simulación.

Este método ha sido utilizado en el manual de pruebas de Abaqus para resolver un problema ejemplo similar, el problema en cuestión encontrado ahí es el análisis de esfuerzos residuales en una placa infinita, realizado por Landau, Weiner, y Zwicky <sup>[15]</sup>. Además este método es sugerido en otros trabajos consultados como por ejemplo una tesis doctoral de la Universidad de Worchester, realizado por Xiao<sup>[16]</sup> este procedimiento es conveniente ya que la

versión gratuita de Abaqus no permite el uso de subrutinas que son utilizadas generalmente para la resolución de problemas de forma directa y utilizando información experimental que asegura la certeza de los modelos, generando programas en Fortran que poseen las propiedades mecánicas, térmicas u otras de los materiales que no son constantes, si no que varían con respecto a la temperatura o el tiempo, para que Abaqus resuelva los modelos de forma más detallada.

El planteamiento de la simulación secuencial se puede visualizar de la siguiente forma:

### **2.3 DEFINICIÓN DE PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE LOS SOLIDOS.**

Ahora el objetivo principal gira sobre como optimizar las herramientas que se poseen, las cuales debido a su naturaleza gratuita presentan limitaciones impuestas por sus desarrolladores, ahora bien resulta beneficiosos la elección de un modelo más sencillo ya que con esto se lograría ahorrar recursos computacionales valiosos, para garantizar que las limitaciones de los equipos no interfieran en el desarrollo o resolución de la simulación.

Por lo tanto, el resultado que se espera es una simulación formada por dos simulaciones, una de las propiedades térmicas y una de las propiedades mecánicas dependiente de los resultados obtenidos y guardados en un archivo con extensión .obd (archivo de base de datos), de la primera.

La primera de las simulaciones será la simulación de transferencia de calor para obtener la tasa de transferencia de calor en cada punto de la pieza, así como las curvas de temperatura dentro de la muestra, luego con ese perfil se procederá a simular, utilizando las propiedades mecánicas del material y el perfil de esfuerzos resultantes.

Lo que se espera obtener al final es un modelo del estado final de esfuerzos residuales, la deformación y por último el porcentaje de martensita

transformada. Así como su distribución y profundidad de penetración será evaluado por medio de una comparación de las curvas de enfriamiento y las curvas TTT para la aleación usada y serán comparadas con muestras reales de aceros templados y así definir qué tan acertado es el modelo.

### **2.3.1 FORMULACIÓN DEL MODELO**

Se deben de plantear varios modelos matemáticos a utilizar, los principales son las relaciones elasto-plástica de esfuerzos y deformación en los metales. Además, como las condiciones de compatibilidad y alguna información referente a las condiciones de frontera, ya que es necesario para la resolución de problemas de elementos finitos, si bien el software ya posee o resuelve dichos modelos es necesario definirlos para tener un entendimiento adecuado de los fenómenos y mecanismos involucrados en el sistema.

Otra parte importante es definir el modelo para el cálculo de la distribución de temperatura en el objeto a simular y también cualquier otra propiedad que necesite ser agregada. Esto servirá para crear un análisis desacoplado para poder simular los esfuerzos por gradiente térmico dentro de la muestra, también se definirá si es posible simular las fases que se producen durante su enfriamiento para utilizar los resultados con el fin de obtener la distribución de temperaturas y también calcular el porcentaje de transformación de fases presentes en el modelo.

#### **2.3.1.1. LA RELACIÓN ELASTO-PLÁSTICA ENTRE EL ESFUERZO Y LA DEFORMACIÓN**

Se puede asumir que la deformación total estará definida por la suma de la deformación elástica y la deformación plástica como se expresa en la ecuación 3.1 <sup>[5]</sup>:

$$e_{ij}^T = e_{ij}^e + e_{ij}^P \quad (3.1)$$

Y cuando estas se expresan en términos de las componentes del esfuerzo normal y el esfuerzo cortante todas las relaciones pueden ser expresadas por un total de 6 ecuaciones <sup>[5]</sup>:

$$e_y^T = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha T + e_y^P \quad (3.2)$$

$$e_z^T = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T + e_z^P \quad (3.3)$$

$$e_{xy}^T = \left( \frac{1 + \nu}{E} \right) e_{xy} + e_{xy}^P \quad (3.4)$$

$$e_{xz}^T = \left( \frac{1 + \nu}{E} \right) e_{xz} + e_{xz}^P \quad (3.5)$$

$$e_{yz}^T = \left( \frac{1 + \nu}{E} \right) e_{yz} + e_{yz}^P \quad (3.6)$$

La generación de esfuerzos residuales por gradientes térmicos es un fenómeno complejo en el que se debe de hacer uso de técnicas de análisis numérico para ser resuelto. Así, el método de elementos finitos se ha vuelto la técnica de resolución universal para este tipo de problemas.

### 2.3.1.2 CONDICIONES DE EQUILIBRIO

Es necesario para resolver problemas mediante el método de elementos finitos definir el equilibrio externo e interno de fuerzas en el cuerpo, por lo tanto según la mecánica clásica la suma de cualquier fuerza externa actuando en el

cuerpo ha de ser cero, esto mismo debe de cumplirse para las fuerzas internas. A menos que exista endurecimiento o algún tipo de restricción ejercida al cuerpo durante el temple.

### 2.3.1.3. ECUACIÓN DE COMPATIBILIDAD

En este caso el modelo que se quiere crear es tridimensional por lo que posee coordenadas tridimensionales, los desplazamientos debido a acciones de fuerzas en un cuerpo pueden causar deformaciones en las direcciones  $u$ ,  $v$  y  $w$ , así denominados los vectores unitarios de desplazamiento como se presentan en la Fig. 3.4. [5]

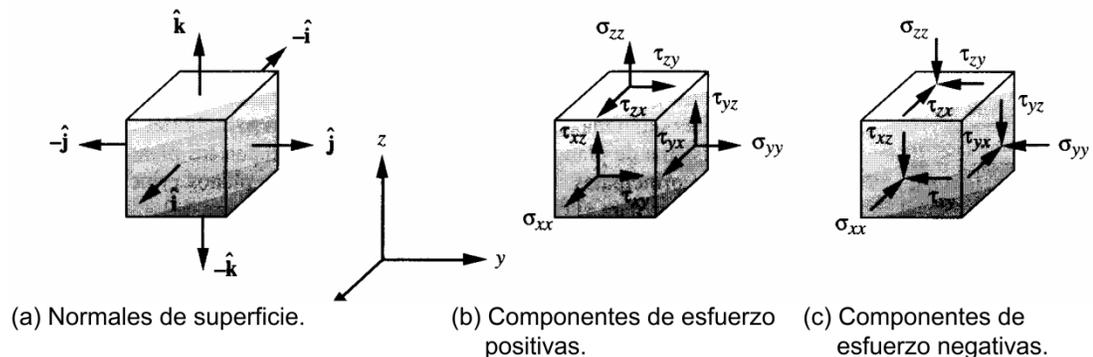


Fig.2.4. Estados de esfuerzos: (a) Vectores unitarios representados en un plano tridimensional. (b) componentes positivas de los esfuerzos (c) componentes negativas de los vectores de esfuerzos. [2]

Este modelo debe de estar sujeto a las condiciones de compatibilidad que han sido definidas en la mecánica de los sólidos, para un cuerpo tridimensional como el que se analizará, y del cual se tienen las ecuaciones 3.7-11 de deformación - desplazamiento. [5]

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.7)$$

$$e_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.8)$$

$$e_z = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.9)$$

$$e_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

$$e_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.10)$$

$$e_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

Para que todos los elementos individuales que se encajan juntos como un cuerpo continuo luego que la deformación ha ocurrido, es también necesario que la deformación satisfaga las ecuaciones 3.12-17 de compatibilidad<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 e_y}{\partial x^2} = 2 \left( \frac{\partial^2 e_{yy}}{\partial y \partial z} \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 e_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} = 2 \left( \frac{\partial^2 e_{xy}}{\partial x \partial z} \right) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 e_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e_z}{\partial z^2} = 2 \left( \frac{\partial^2 e_{zx}}{\partial z \partial x} \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\partial e_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial e_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial e_{xy}}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 e_x}{\partial y \partial z} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{\partial e_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial e_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial e_{yz}}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 e_y}{\partial z \partial x} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{\partial e_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial e_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial e_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 e_z}{\partial x \partial y} \quad (3.17)$$

#### 2.3.1.4. CONDICIONES DE FRONTERA

Es necesario conocer si existe algún estado de carga en las fronteras del cuerpo en estudio. Los componentes que están sometidos a tratamientos térmicos están usualmente libres; es decir, no estas restringidos de ninguna manera a ninguna superficie y todos los puntos externos están libres de cargas externas, estas condiciones se representan de las ecuaciones 3.18-20, de la forma siguiente <sup>[5]</sup>.

$$\sigma_{xx}n_x + \sigma_{xy}n_y + \sigma_{xz}n_z = 0 \quad (3.18)$$

$$\sigma_{yx}n_x + \sigma_{yy}n_y + \sigma_{yz}n_z = 0 \quad (3.19)$$

$$\sigma_{zx}n_x + \sigma_{zy}n_y + \sigma_{zz}n_z = 0 \quad (3.20)$$

Estas ecuaciones que se usan para definir que el modelo cumple los principios de la mecánica de los sólidos. Así, a continuación se definirán las variables que interactúan en el procesos de temple, las cuales serán definidas y los valores a utilizar en el proceso se fijarán posteriormente.

## **2.4. FLUIDO DE TEMPLE.**

A continuación se definirán las propiedades o los datos necesarios para llevar a cabo los análisis, se deben definir las propiedades térmicas del fluido de enfriamiento, las propiedades mecánicas del acero y otros parámetros que ayuden a implementar un modelo lo más exacto posible tratando de superar las dificultades de obtener información experimental confiable.

Por lo tanto, se debe de buscar información experimental de datos que se necesitan, funciones o formas de producir la información necesaria. Por ejemplo utilizando la información del perfil térmico de Abaqus se puede resolver o simular la transferencia de calor para obtener la distribución de temperatura de la pieza que se está templando, de esta forma se obtiene un conjunto de datos que definen el perfil térmico de la pieza.

A continuación se presentan las propiedades que se necesitan para definir este proceso:

### **2.4.1. PROPIEDADES DEL FLUIDO**

Las propiedades del fluido de temple ideal ya han sido definidas en el marco teórico, solo se deben de tomar en consideración que el enfriamiento y la transferencia de calor se da en tres etapas donde actúan diferentes mecanismos, por lo tanto para simular la curva de enfriamiento de un acero se debe de simular este proceso e incluir cada una de las etapas.

Las etapas de transferencia de calor que se observan durante el enfriamiento son:

- Una etapa de capa de vapor,
- Nucleación de evaporación, y
- Etapa de convección.

Cada una de estas etapas tiene una tasa de transferencia de calor diferente y esto es lo que vuelve muy complejo el proceso del enfriamiento, existen diversas formas con la que se puede obtener la información sobre los coeficientes de transferencia de calor, las cuales se presentaran más adelante.

Al investigar sobre como simular el enfriamiento utilizando un fluido se presenta un problema adicional, que proviene de las diferentes etapas de enfriamiento que se dan en el líquido, como se mencionó anteriormente el resultado total de la transferencia de calor está dado por tres mecanismos diferentes que se dan en cada una de las etapas; es decir, existe transferencia de calor por radiación, conducción y convección, por medio de la investigación realizada se encontró que no es viable tratar de simular los tres tipos de transferencia, y que posiblemente se deberá de realizar un estudio aparte debido a la complejidad del mismo, ya que se producen cambios de fase en el fluido de enfriamiento que van más allá del alcance de este trabajo.

La técnica que es utilizada por diferentes manuales y analistas de elementos finitos que se han consultado para simular la interacción de un fluido con algún elemento a enfriar es la utilización directa de un coeficiente de convección en la superficie que representa el contacto de los objetos con un fluido en movimiento y que representa el potencial de transferencia de calor; sin embargo, con el objetivo de lograr mejores resultados a continuación se presentan diferentes tipos de planteamientos o formas de abordar el problema. Con lo que se espera justificar las razones por las que se seleccionará el método que mejor encaje con las limitaciones y alcance de la investigación.

#### **2.4.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Los procesos de transferencia de calor se hacen presentes cuando existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos o más cuerpos. Así, se pueden considerarse como una transferencia de energía por diferentes

mecanismos y pueden ser percibidos por cambios de temperatura de los mismos hasta que alcancen la condición de equilibrio térmico. Los tres mecanismos de transferencia de calor se presentan en la Fig. 3.5.

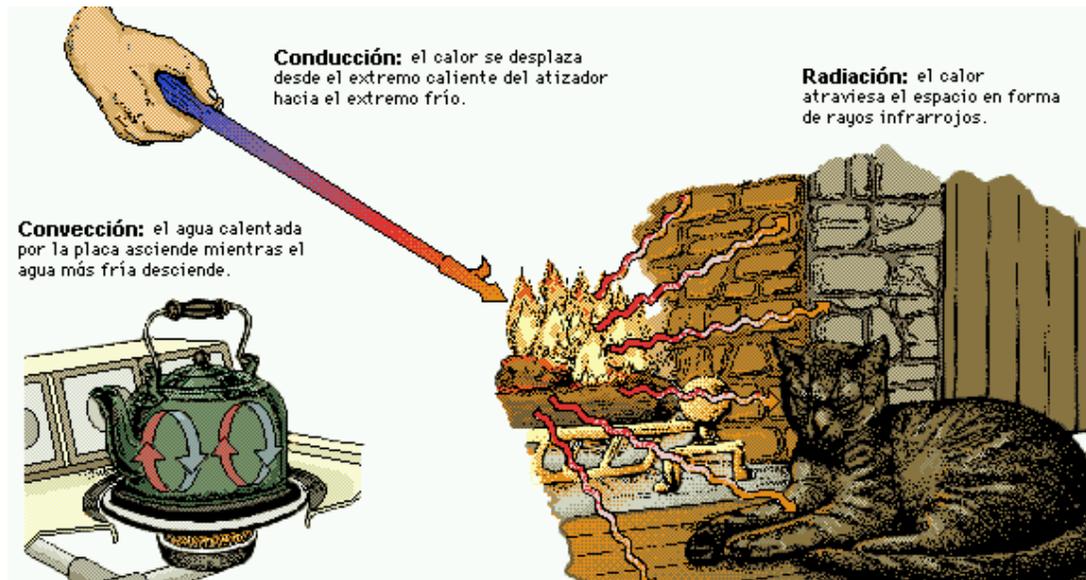


Fig. 3.5. Diferentes mecanismos de transferencia de calor.

Durante el temple se presentan los tres tipos de transferencia de calor, es decir conducción, convección y radiación, cada uno de estos posee sus propios mecanismos que determinan la cantidad de energía que se puede transferir desde un elemento que está siendo templado hacia el medio de enfriamiento, produciendo generalmente transformaciones de fases en la estructura del acero. Por lo que la transferencia de calor total está dada por la suma de dichas interacciones.

Los esfuerzos residuales resultantes así como la distorsión dependen en gran medida de la tasa de enfriamiento que experimenta el material en una región determinada, por lo que el simular correctamente el flujo de calor en un objeto determinado es de vital importancia, para esto según se ha investigado y consultado diferentes fuentes bibliográficas, se requiere la utilización de información experimental que pueda ser usada para que un computador se

encargue de realizar las iteración convenientes y resuelva el modelo en estudio, obteniendo un perfil de transferencia de calor así como curvas de temperatura.

Sin embargo, la obtención de estos perfiles de temperatura representa un desafío considerable debido que la información generalmente no está disponible en libros o manuales, sino que debe ser obtenida por medio de experimentación, que no es un trabajo sencillo, las interacciones con el medio de enfriamiento incluyendo cada una de las etapas y cambios de fase que ocurren; según Xiao<sup>[16]</sup>, estas interacciones general datos de perfiles de transferencia de calor bastante complicados. Siguiendo las conclusiones del mismo autor se sabe que las ecuaciones empíricas de transferencia de calor no son adecuadas para cualquier parte de una pieza, debido a la diferencias de geometrías de las mismas. Paquetes de simulación de líquidos (CFD) tiene problemas al simular los procesos de temple con líquidos y con su distribución de transferencia de calor.

Por lo tanto, se deben de desarrollar métodos para medir la transferencia de calor en una parte específica para el proceso de temple, por su importancia y las dificultades que se encuentran en el momento.

Xiao<sup>[16]</sup> en su documento de tesis doctoral explica de forma muy detallada y con ejemplos los diferentes métodos de obtención del perfil de transferencia de calor y por lo tanto perfil de temperatura. El método que se planea usar para este trabajo es por medio de la simulación del fluido por medio de un coeficiente de transferencia de calor obtenido experimentalmente que represente las diferentes etapas durante el proceso y que será usado para obtener el perfil de la distribución de temperatura. Ésta es la mejor forma que se tiene disponible para llevar a cabo la simulación propuesta.

Sobre el valor del coeficiente de transferencia de calor, se ha encontrado antecedentes de un estudio similar realizado por Fujio<sup>[5]</sup> en el cual para realizar sus cálculos experimentales uso un coeficiente de transferencia de calor promedio de  $5700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  mientras Inoue y Tanaka<sup>[5]</sup> utilizaron marcadas diferencias en la tasa de transferencia de calor; es decir, un coeficiente variable según la temperatura pero los resultados obtenido por medio de sus

investigaciones a pesar de sus diferencias fundamentales fueron bastante similares. Esto tiene importancia práctica, porque puede interpretarse que estas variaciones en datos no son significativas cuando los esfuerzos residuales por gradientes térmicos son calculados durante el temple del material <sup>[5]</sup>.

Descritas las dificultades de obtener un perfil de transferencia de calor se deben revisar algunos resultados experimentales sobre la obtención de coeficientes de transferencia de calor, Hildenwall <sup>[5]</sup> estudió el enfriamiento de cilindros de acero inoxidable de 20 mm de diámetro desde los 820 °C, con una termocupla a una profundidad de 1 mm bajo la superficie.

Estos datos se podrían ser usados como referencia al momento de definir cuál es el coeficiente de transferencia de calor durante el proceso de temple. Se debe tener claro que se desconoce las condiciones en que las pruebas fueron realizadas por estos investigadores, ya que la información esta descrita en sus las publicaciones por los cuales hay que pagar para obtener.

En resumen, se tratará de abordar el problema de la transferencia de calor obteniendo los valores del coeficiente de transferencia de calor durante el enfriamiento, medido en pruebas realizadas por otros investigadores, teniendo en cuenta que el uso de esta información es limitados ya que es imposible repetir las condiciones en las que dichas experiencias fueron llevadas a cabo, pero permitirá obtener valores de coeficientes mientras varían con la temperatura (este valor incluye la influencia de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor) hasta la temperatura ambiente. Esta información será usada en el modelo estableciendo un coeficiente de convección que describa dicho comportamiento y se obtendrá un perfil de temperatura y curvas de enfriamiento que coincidan con lo encontrado en los libros o investigaciones referentes a este tema. En el caso de que la información recolectada sea de utilidad se optará por utilizar un coeficiente constante.

#### **2.4.2.1. HERRAMIENTAS ESPECIALIZADAS PARA LA SIMULACIÓN DE TEMPLE DE ACEROS**

Adicionalmente, se presenta una herramienta usada en la mayoría de los trabajos de simulación de temple que se han consultado, es un software comercial especializado en temple de acero que resuelve los perfiles de temperatura y transferencia de calor de cualquier elemento, sin importar que tan complejo sea, el cual es una muestra de todo el trabajo que se ha puesto en lograr simulaciones realistas pero hay que tener en cuenta el inmenso número de horas de trabajo y recursos invertidos para lograr construir algo así.

Dante<sup>®</sup>, es un software de simulación de procesos de tratamientos térmicos, es obviamente un software comercial, que es capaz de realizar muchas simulaciones complejas de deformación y cambios en el material durante el temple, es un software de última generación que promueve mejoras en los componentes y en los procesos para tratamientos térmicos.

Según como está definido en el sitio web de la compañía, DANTE es un simulador de análisis térmico acoplado, difusión de carbono, mecánica de los sólidos basado en elementos finitos para simular el tratamiento térmico de piezas de acero. Los Ingenieros pueden usar DANTE para predecir los esfuerzos residuales de un estado de esfuerzos en una parte dada, luego de un tratamiento térmico, la evolución y el volumen final de fracciones de fases metalúrgicas, dureza y distorsiones en la parte. La herramienta de análisis de DANTE acopla un modelo de material constitutivo multifase directamente con modelos cinemáticos de difusión y transformación martensítica. Para ser usado por metalurgistas, ingenieros de proceso, tratadores térmicos y diseñadores las capacidades de simulación de DANTE.

#### 2.4.2.2. FORMAS DE OBTENER SIMULACIONES MÁS REALISTAS

El método que según las investigaciones es el más usado y el más acertado que ha sido desarrollado para simular la transferencia de calor así como los esfuerzos residuales, cambios y transformaciones de fases, etc. por diferentes instituciones como el Laboratorio de Mecánica Computacional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, diferentes artículos pero explicado en mucho más detalle por Xiao<sup>[16]</sup> en su tesis doctoral.

Los argentinos Lauro y Sarmiento<sup>[17]</sup>, utilizan una herramienta computacional para modelar los perfiles de temperatura llamado INC-PHATRAN (INverse Conduction coupled with PHAse TRANSformation) que puede ser empleado para simular los tratamientos térmicos. Puede determinar los coeficientes de transferencia térmica si se dispone de mediciones de temperatura en uno o varios puntos. El sistema fue desarrollado inicialmente en el Laboratorio de Mecánica Computacional de la Facultad de Ingeniería (UBA). El modelo está basado en un algoritmo de optimización numérica cuyo núcleo es un módulo de cálculo de la distribución espacial y temporal de la temperatura acoplada con la evolución de la transformación microestructural en todo punto del material. La transformación de austenita a las fases ferrita y perlita está gobernada por los diagramas de transformación isotérmica (Diagramas TTT) y por la aproximación temporal de Avrami para un dado material. El cálculo de la distribución de la temperatura está basado en el método de elementos finitos para la discretización de un dominio bidimensional con simetría de revolución, y un método implícito de diferencias finitas tipo Crank-Nicholson para la variable temporal. La medición con termocuplas de la evolución temporal de la temperatura en lugares arbitrarios dentro del material son los datos de entrada al programa. Los coeficientes de transferencia térmica dependientes del tiempo obtenido, la distribución espacial y temporal de la temperatura y las variaciones de las fracciones de ferrita, perlita y martensita en el tiempo y el espacio en toda la extensión de la probeta, son los resultados del programa. <sup>[17]</sup>

Este es un programa complejo que genera información que luego es agregada al procesador de ABAQUS para que sea incluida en los análisis mecánicos posteriores de una análisis termo-mecánico acoplado, además debido a que al tener esta nueva información es necesario utilizar otras herramientas para permitir que sea manipulada por ABAQUS para obtener algún resultado, en este momento es que entran las subrutinas, que son funciones de códigos escritos en lenguaje FORTRAN 90 que permiten realizar análisis más complejos y detallados a voluntad del analista. El proceso de la simulación está realmente bien descrito por Cengel <sup>[17]</sup>.

En la Fig. 2.6 se presenta un diagrama del proceso de simulación seguido por Lauro y Sarmiento <sup>[17]</sup>:

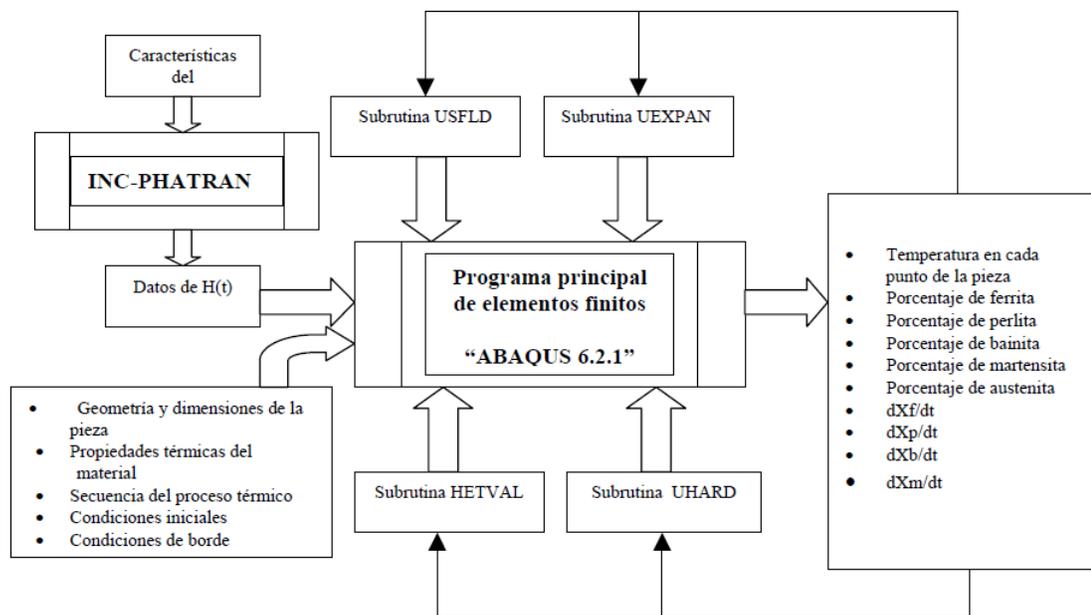


Fig. 2.6. Proceso de simulación temple en acero, usada por Lauro y Sarmiento <sup>[17]</sup>.

Xiao <sup>[16]</sup> utiliza DANTE, cuya funcionalidad fue descrita anteriormente de forma breve, como herramienta para modelar las propiedades constitutivas del acero así como su comportamiento evolutivo, por lo tanto DANTE fue usado en conjunto con ABAQUS para la simulación completa. Como fue descrito antes, ambas la difusión y la transformación martensítica están incluidas en los

modelos de transformación metalúrgica en DANTE. Según este autor, los procesos de transformación de fases en el enfriamiento del acero han sido desarrollados por investigadores en el Colorado School of Mines en los últimos 20 años<sup>[16]</sup>. Luego la temperatura, tiempo y estados de esfuerzos fueron las entradas del modelo que será pasado a ABAQUS. Así mismo el modelo calcula la evolución del material en términos de transformación de fase, que es transmitida a un modelo térmico y mecánico, todos los aspectos como la química del acero, tamaño de grano, parámetros cinemáticos, diagramas TTT e información de pruebas Jominy son usados para caracterizar las transformaciones.

En la Fig. 2.7 se presenta el esquema de trabajo para la subrutina utilizada en DANTE por Xiao<sup>[16]</sup> en sus investigaciones.

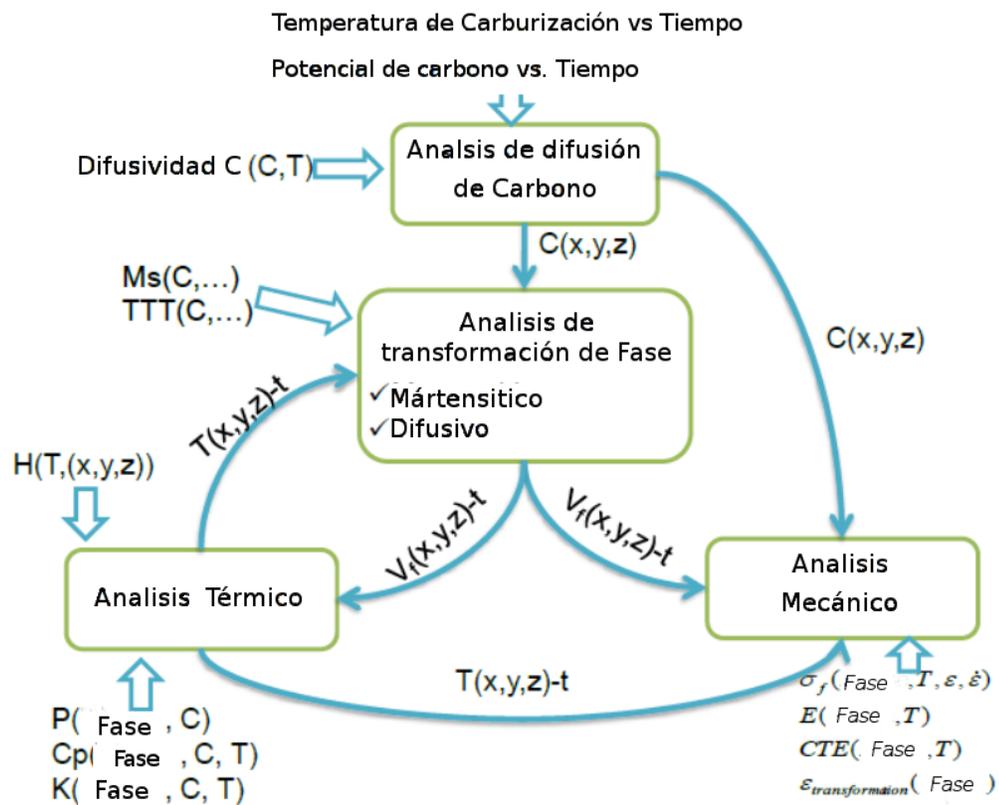


Fig. 3.7. Análisis multifase del acero en Dante<sup>®</sup>.<sup>[16]</sup>

Finalmente, Hasan<sup>[18]</sup> midió el coeficiente de transferencia de calor en su tesis doctoral, en la que tanto la geometría de las muestras usadas durante sus experimentos como también la severidad de temple coinciden con que se espera simular durante ésta investigación en un buen grado. Hasan<sup>[18]</sup>, que toma un enfoque interesante, mucho más experimental que los casos expuestos anteriormente, para calcular los valores y el perfil de transferencia de calor, utiliza muestras de 52 mm de diámetro y de 20 mm de altura con termocuplas para obtener la curva de enfriamiento en el metal, su método consiste básicamente en obtener la tasa de pérdida de temperatura en la muestra para calcular luego la transferencia de calor, así mismo ofrece información sobre el comportamiento utilizando diferentes aleaciones y diferentes medios de enfriamiento a diferentes temperaturas ofreciendo una explicación basada en las diferentes composiciones y estructuras sobre la diferencia del coeficiente de transferencia de calor.

También, ofrece una versión propia de cómo obtener algunas de las propiedades físicas del acero, utilizando información recopilada de muchas fuentes y luego combinándolas utilizando el método matemático de las redes neurales, esto le permitió a Hasan<sup>[18]</sup> encontrar con la exactitud necesaria datos de la conductividad térmica del acero, además determinar datos sobre ésta con respecto a la temperatura, resulta adecuado para esta investigación porque permitirá usar la información experimental que se necesita para la simulación. La conductividad térmica puede ser calculada mediante un software llamado, MAP\_NEURAL\_Thermal, que está disponible por medio de la Universidad de Cambridge para ser descargado y usado, y calcula la conductividad por medio de la composición química esto será retomado luego al definir las propiedades físicas del acero.

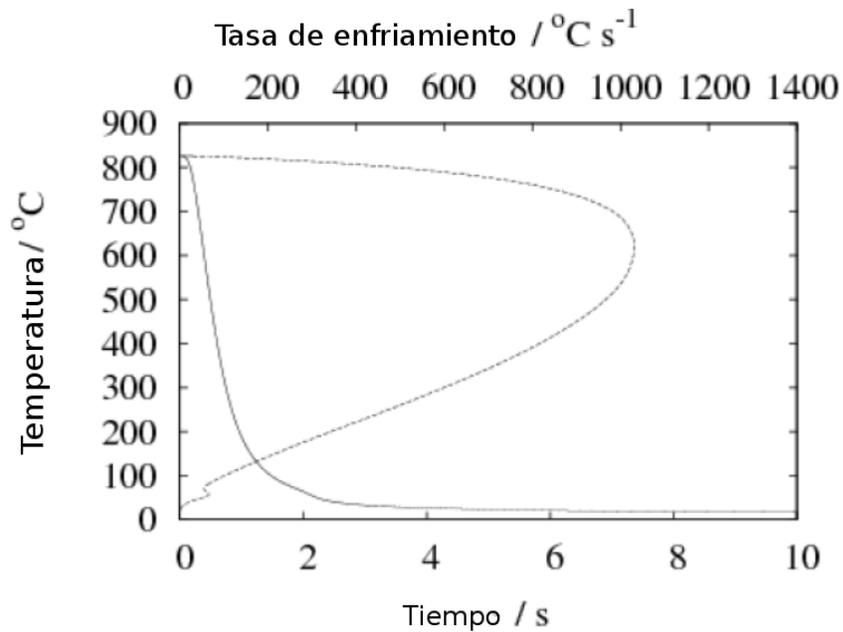


Fig. 2.8. Curva de enfriamiento y la curva de tasa de enfriamiento derivada para un acero templado en agua a 23°C <sup>[18]</sup>

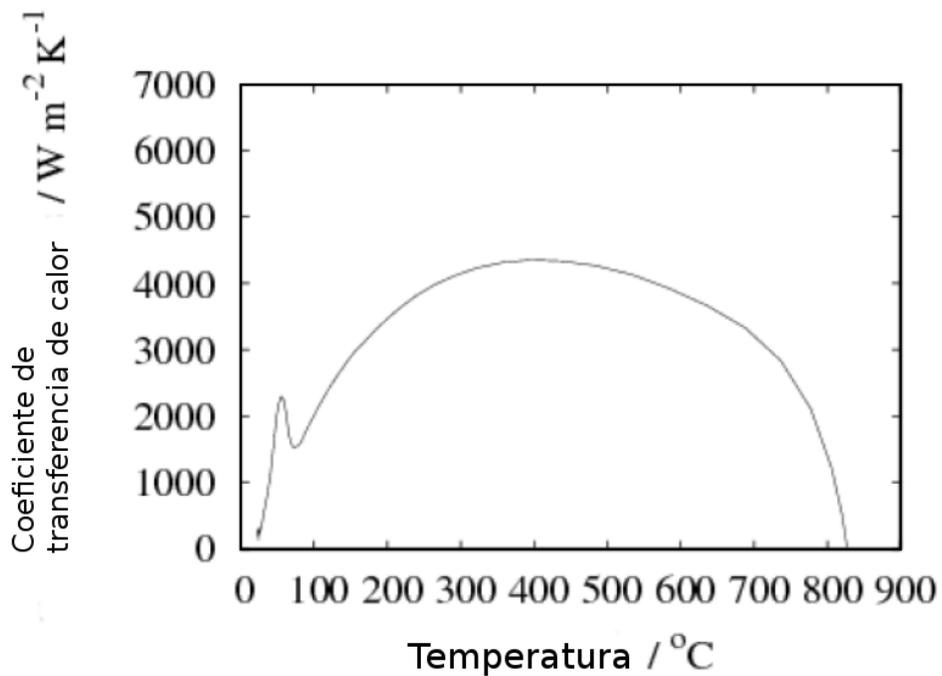


Fig.. 2.9. Coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura de la superficie durante el temple de acero en agua a 23 °C. <sup>[18]</sup>

En la Tabla 2.2 se presenta la información extraída de la Fig. 3.9.

Tabla 2.2. Coeficientes de transferencia de calor obtenidos por Hasam <sup>[18]</sup>

Temperatura, °C	Conductividad, Wm <sup>-2</sup> /K	Temperatura, °C	Conductividad, Wm <sup>-2</sup> /K	Temperatura, °C
850	100	200	3500	850
825	250	180	3250	825
810	500	160	3000	810
805	1000	140	2750	805
800	1250	130	2500	800
795	1650	110	2125	795
790	1800	100	2000	790
775	2000	95	1800	775
760	2250	80	1650	760
750	2500	75	1500	750
740	2750	70	1650	740
700	3250	65	1800	700
660	3500	60	2000	660
625	3750	50	2125	625
560	4000	45	2000	560
550	4062.5	40	1800	550
510	4125	39	1650	510
480	4187.5	38	1500	480
405	4250	35	1250	405
340	4187.5	33	1000	340
300	4125	30	750	300
390	4062.5	28	500	390
370	4000	23	250	370
240	3750			240

### **CAPÍTULO 3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO Y PARAMETROS IMPORTANTES DE ABAQUS.**

Durante el enfriamiento del acero el material se contrae debido su dilatación térmica, éste es uno de los mecanismos de formación de los esfuerzos y del análisis estructural. El software que resolverá por medio del método de los elementos finitos integrará la deformación producto de la carga térmica y puede dar resultados de los esfuerzos, deformación y distorsiones en un tiempo determinado. Como se presenta en la Fig. 3.10<sup>[16]</sup>, en la cual se

presenta el procedimiento seguido durante una simulación termo-mecánica acoplada donde la información de la evolución de las propiedades del material con respecto a la temperatura es introducida por medio de una subrutina. Esta última es un programa para computadora que contiene relaciones matemáticas y que es invocado por el procesador de un software de elementos finitos para agregar variaciones de las propiedades según han sido observadas en experimentos. En la simulación no se usaran subrutinas, debido a que no se cuenta con la información experimental necesaria así como las limitaciones de la versión estudiantil de ABAQUS no permite su implementación, pero estas se presentan en el diagrama con el objetivo de definir un proceso completo.

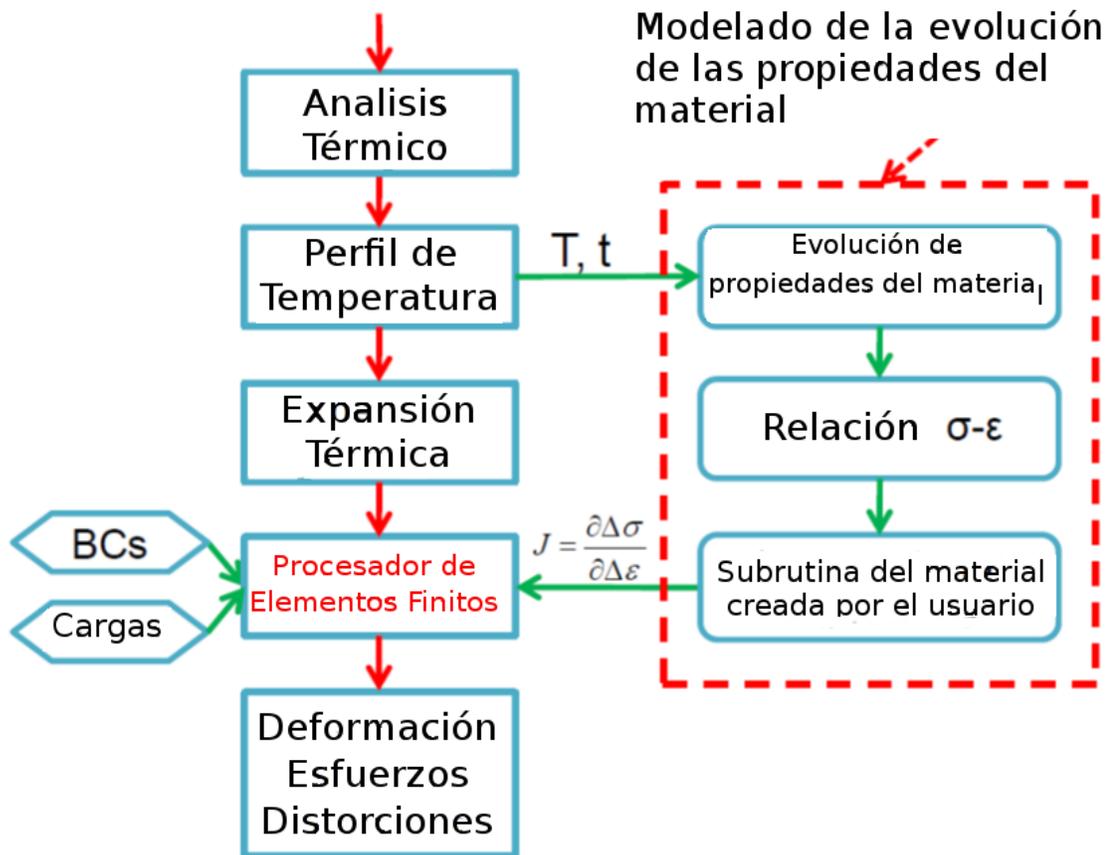


Fig. 2.10. Modelado de la evolución de las propiedades del material. <sup>[16]</sup>

### **3.1. DESAFÍOS DE LA PREDICCIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES**

Las propiedades principales del acero que se tendrá en cuenta son, el coeficiente de dilatación térmica, la conductividad térmica, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la transformación martensítica y los esfuerzos residuales y deformaciones producidas por esta misma transformación. Se presenta información obtenida de diversas fuentes relacionada con estas propiedades, que se usara como referencia para seleccionar los datos que se utilizaran en esta simulación.

#### **3.1.1 PROPIEDADES DEL MECÁNICAS**

Debido a que como los esfuerzos que se producen durante el temple son resultado de la interacción de tanto las propiedades mecánicas como las térmicas de acero éstas se presentaran por separado, como propiedades mecánicas que siguen a continuación y propiedades térmicas que se describirán en el siguiente apartado.

##### **3.1.1.1 ESFUERZO DE CEDENCIA**

Se define como el valor de esfuerzos en el que ocurrirá una deformación plástica en el material, es una propiedad importante para conocer si existen esfuerzos residuales, debido a los bruscos cambios de temperatura. El punto de cedencia de la austenita aumenta a medida que la temperatura disminuye desde la de austenización hasta la temperatura correspondiente a la línea  $M_s$ . Los valores reportados a temperaturas anteriores varían entre 110 y 120 MPa. Los valores que se utilizarán son los expuestos en una prueba de temple del

manual de ABAQUS, donde los valores del esfuerzo de cedencia varían en función de la temperatura <sup>[5]</sup>.

### 3.1.2 COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA

La determinación de los esfuerzos térmicos requiere el conocimiento del coeficiente de dilatación térmica de las fases que están presentes durante el tratamiento térmico. Mucha de la información que está disponible para la fase austenítica entre las temperaturas de autenización y  $M_s$  sugieren que el coeficiente de austenización es constante a unos valores entre  $2.1 \times 10^{-5}$  y  $2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Para la martensita en la literatura se reporta que no se ha llegado a un acuerdo, por lo que diferentes autores han definido muchos valores diversos. El valor que se usará será el sugerido por Giusti<sup>[5]</sup> que lo iguala al de la ferrita ( $1.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )<sup>[5]</sup>.

### 3.1.3 DENSIDAD

En física y química, la densidad ( $\rho$ ) en  $\text{kg/m}^3$ , es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa y esta disminuye con el incremento de temperatura.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.21)$$

En el caso del acero el intervalo de valores es de  $7.82 \text{ g/cm}^3$  a  $27 \text{ } ^\circ\text{C}$  y de  $7.62 \text{ g/cm}^3$  a  $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ . El cambio de fase a austenita causa una mayor reducción de esta propiedad a  $7.56 \text{ g/cm}^3$  a  $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Así, se puede concluir que dada la información no existirán problemas asociados con el uso de esa propiedad para obtener la información sobre la producción de los esfuerzos térmicos en el temple de acero de bajo carbono<sup>[5]</sup>.

Según se ha observado en los problemas de ejemplo que se han resuelto usando ABAQUS, siempre se ha utilizado valores de densidad constante, como fue explicado en el párrafo anterior en el cual los cambios no son significativos y no representan un efecto considerable en la determinación de los esfuerzos residuales. Por lo que se usará un valor constante.

### **3.1.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD O MÓDULO DE YOUNG**

El módulo de Young según Fletcher<sup>[5]</sup> es la propiedad que menos presenta problema en el caso de otras propiedades mecánicas. Existe un consenso general acerca de la relación del módulo de Young de los aceros y la temperatura, parece que se mantiene en un amplio intervalo de composiciones, ya que ni la composición ni la estructura tienen un efecto significativo en las propiedades, excepto en la fase austenítica que posee valores un poco menores que otras estructuras de la misma composición a la misma temperatura. A medida que la temperatura aumente desde la temperatura ambiente hasta los 850 °C la magnitud del mismo se reduce por un factor de un medio.

Se considera que esta propiedad no tiene una gran influencia en la formación de los esfuerzos residuales por gradientes térmicos por lo tanto se usará el valor estándar del mismo, un valor constante que no varíe con cambios de temperatura como ha sido usado en otros problemas que han sido revisados durante esta investigación.

### **3.1.5 RELACIÓN DE POISSON**

El valor de la relación de Poisson ha sido bien documentado con valores cercanos a 0.30 para los aceros. Los cambios estructurales o de fase en los

aceros tienen poco efecto en esta propiedad. Además, las variaciones con respecto a los cambios de temperatura son despreciables, por lo que es otro valor que se utilizará como una variable constante.

## **3.2 PROPIEDADES TÉRMICAS**

A continuación se describen las propiedades térmicas que presentan una mayor influencia durante la dilatación del material y su contracción durante el enfriamiento.

### **3.2.1 CALOR ESPECÍFICO**

Se define como la energía requerida para elevar o disminuir en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. Las unidades del calor específico es  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

Vale la pena recalcar que en realidad esta propiedad varía con respecto a la temperatura y las estructuras: en particular tiende a presentar valores anormalmente grandes cerca de las temperaturas donde ocurren las transformaciones de fase. Para este caso según la literatura de transferencia de calor, este valor se asume como una constante debido a que se puede asumir para los sólidos como sustancias incompresibles sin perder mucha exactitud en los cálculos. En resumen el valor de calor específico que se usará será una constante.

### 3.2.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre partículas. La rapidez o razón de conducción de calor depende de muchos factores.

La conducción de calor depende entre los factores de la geometría y la diferencia de temperatura de una constante de proporcionalidad que es conocida como la conductividad térmica que se define como la medida de la capacidad de un material para conducir calor. La transferencia de calor por conducción está regida por la ley de Fourier<sup>[19]</sup>.

Esta propiedad es importante porque está directamente relacionada a la tasa de transferencia de calor dentro del acero mismo; es decir, a medida que el fluido de temple “remueve” energía de una pieza, la diferencia de temperatura provoca que la energía fluya desde el centro de la pieza hacia el exterior; esta propiedad varía con la temperatura, por lo tanto existe cierta influencia que no puede ser despreciada al tratar de encontrar las curvas de enfriamiento de una pieza determinada.

En esta investigación se hará uso de un software libre creado por investigadores de la Universidad de Cambridge para la predicción de los valores de la conductividad térmica, este se llama MAP\_NEURAL\_Thermal, y es una red neural entrenada usando datos de muchas investigaciones sobre los cambios de esta propiedad y puede ser usado para así cualquier aleación de acero. Este mismo software ya ha sido usado para determinar el coeficiente de transferencia de calor en las investigaciones de Hasan<sup>[18]</sup>.

Los datos resultantes que se usarán se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de conductividad térmica con respecto a la temperatura obtenidos por medio del software MAP\_NEURAL\_Thermal

Temperatura, °C	Conductividad térmica, W/(m·K)
850	28.020170
750	29.483511
650	31.781521
550	34.749062
450	38.092300
350	41.403042
250	44.210545
150	46.161156
75	47.137547
23	47.806175

### 3.2.3 COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA

La dilatación térmica es la tendencia de la materia a cambiar su volumen cuando ocurren cambios de temperatura en la misma. Cuando un cuerpo es calentado las partículas que lo forman vibran mucho más por lo que la distancia promedio de equilibrio entre estas aumenta, el grado de expansión debido al incremento de la temperatura es conocido como el coeficiente de expansión térmica.

Este coeficiente es muy importante dentro de la simulación, los esfuerzos producidos por el gradiente térmico durante del enfriamiento se deben a la contracción desigual entre las capas exteriores e interiores de un determinado objeto, por lo que conocer los cambios y el comportamiento de este coeficiente es muy importante. En el ejemplo realizado en el manual de ABAQUS se ha utilizado un coeficiente de expansión térmica constante.

Según la información encontrada para la fase de austenita a las temperaturas entre la de autenización y la  $M_s$  se sugiere que el coeficiente de dilatación térmica es constante con valores entre los  $2.1 \times 10^{-5}$  y  $2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ <sup>[5]</sup>. Así, Sjöstrom<sup>[5]</sup> ha encontrado que no hay ningún efecto relacionado con el

contenido de carbono, aunque en el caso de la austenita pequeños cambios han sido reportados.

No ha sido posible encontrar información experimental sobre este coeficiente respecto a los cambios de temperatura, se sabe que la propiedad es variante pero al no poseer información detallada del comportamiento del mismo es conviene tratar esta propiedad como constante, lo cual es una aproximación válida y que servirá para los propósitos de esta simulación.

### **3.2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN LA COMPUTADORA**

Luego de definidas las propiedades del material, es momento de planear de cómo realizar la simulación; es decir, transferir los conceptos que han sido expuestos en instrucciones y pasos a seguir por el software que serán necesarios para que un computador lleve a cabo los cálculos requeridos para resolver el modelo. En este caso el software que será usado es ABAQUS, por lo tanto vale la pena que antes de comenzar a plantear números y métodos se planteen algunos detalles, por ejemplo como ABAQUS se encargara en procesar la información y algunos detalles importantes que determinaran los resultados que se obtendrán.

Dentro de la aplicación existen métodos establecidos para procesar información, estas funciones contienen instrucciones y procedimientos desarrollados por los creadores del software usando los principios de los elementos finitos para poder abordar casi cualquier tipo de problema, se debe recalcar que se estará usando una versión estudiantil del software, por su naturaleza esta versión está orientada a introducir a los usuarios a los temas básicos para los usuarios de software FEM, la piratería de software no es una opción, no solo porque resta profesionalidad al estudio si no que se debe dar reconocimiento al trabajo y talento de los autores de ABAQUS; el alcance de los

resultados que se pueden obtener está limitado al poder de las herramientas y la información disponible para caracterizar el modelo.

A partir de este momento se planteará el proceso a seguir para establecer los parámetros necesarios en el software y se dará explicación a detalles que validarán las decisiones tomadas mientras se genera el modelo a analizar.

Como último comentario, una computadora o un programa no hará más de lo que su usuario ordene que haga; es decir, no se debe esperar que el software sepa que se necesita que haga, la razón de este comentario es claro, ya que se mencionó que los resultados dependen mucho de los datos disponibles y del poder de la herramienta que será usada, pero principalmente del usuario; si el usuario no incluye una propiedad, un comando o genera algún tipo de instrucción requerida para lograr ciertos objetivos, no se obtendrán los resultados deseados, un software por muy sofisticado que sea es incapaz de hacer lo que no se le ha ordenado, a continuación se analizarán algunos factores que están relacionados con las decisiones de control y desarrollo del modelo computacional con la esperanza de aclarar todos los puntos necesarios garantizando una simulación exitosa.

### **3.3. CARACTERISTICAS, METODOS Y PARAMETROS DE ABAQUS EN PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

La transferencia de calor es un proceso transitorio que depende de los cambios de temperatura y las propiedades térmicas de los materiales así como los medios de transferencia de calor o variables relacionados. Habiendo dicho esto es claro que la simulación será llevada a cabo en un régimen de transferencia de calor transitorio.

La transferencia de calor además incluye no linealidades que deben de ser resueltas por el software, por lo tanto esto debe de tenerse presente, ABAQUS posee dos procesadores para esto, ABAQUS Standard y ABAQUS

Explicit, ambos con capacidades muy similares, la versión Standard utiliza integración implícita que es el método tradicional, la versión Explicit utiliza integración explícita y es utilizado para problemas especiales y complicados con no linealidades y contacto, para la simulación tomando en cuenta las no linealidades se pueden utilizar cualquiera de los dos procesadores ya que ambos pueden resolver problemas no lineales, por lo que se usará Abaqus Standard.

### **3.3.1 ANÁLISIS EN ABAQUS**

Un análisis en Abaqus es definido usando pasos (steps), el procedimiento de análisis y data opcional del historial.

### **3.3.2 DEFINIENDO PASOS (STEPS)**

Un concepto básico en ABAQUS es la división del problema en pasos. Un paso es cualquier fase conveniente de un historial, por ejemplo un paso térmico en régimen transitorio, uno de esfuerzos dinámico también en régimen transitorio, etc. La descripción de un paso incluye el tipo de análisis que será desempeñado y la data opcional del historial, como cargas, condiciones de frontera y solicitudes de salida.

### **3.3.3. ESPECIFICANDO EL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS**

Para cada paso que se elige un procedimiento de análisis. Esta decisión es la que define el tipo de análisis que será desarrollado durante el paso. Solo

un procedimiento es permitido por cada paso. La definición de paso incluye la data opcional del historial, así como cargas, condiciones de frontera a las que está sometido el modelo y las solicitudes de salidas (información resultante).

### 3.3.4. PROCEDIMIENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ABAQUS

Abaqus puede resolver los siguientes tipos de problemas de transferencia de calor <sup>[9]</sup>:

- **Análisis de transferencia de calor desacoplada:** problemas de transferencia de calor que implican la conducción, convección forzada y radiación límite pueden ser analizados en Abaqus/Standard. En estos análisis el campo de temperatura se calcula sin el conocimiento del estado de esfuerzo-deformación. Problemas de transferencia de calor puros pueden ser en estado estable y lineal o no lineal y transitorios.
- **Análisis térmico de esfuerzos secuencialmente acoplado:** Es cuando el análisis de esfuerzo-desplazamiento depende de un campo de temperatura aunque no existe ninguna dependencia inversa, un análisis de esfuerzos puede realizarse secuencialmente junto a un análisis térmico en Abaqus/Standard. El análisis térmico y esfuerzos secuencialmente acoplados se lleva a cabo mediante la resolución de primera el problema de la transferencia de calor es pura y luego cargar la solución de temperatura en un análisis de esfuerzos como un campo predefinido.
- **Análisis térmico de esfuerzo totalmente acoplado:** Se utiliza para resolver simultáneamente los esfuerzos-desplazamiento y los campos de temperatura. Un análisis acoplado se utiliza cuando las soluciones térmicas y mecánicas afectan fuertemente entre sí. Por ejemplo, en problemas de metalurgia.

- **Análisis adiabático:** Un análisis mecánico adiabático se puede utilizar en los casos en que la deformación mecánica provoca un calentamiento, pero el evento es tan rápida que este calor no tiene tiempo para difundirse a través del material.
- **La radiación de la cavidad:** Los efectos de radiación de la cavidad pueden ser simulados en Abaqus Standard, se pueden incluir (además de la radiación límite prescrito) en problemas de transferencia de calor desacoplados.

Por lo tanto, los procedimientos que se deben adoptar es el de análisis secuencialmente acoplado.

### **3.3.5. FUENTES DE LA NO LINEALIDAD EN UN ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR**

Los problemas de transferencia de calor pueden ser no lineales debido a que las propiedades de los materiales dependen de la temperatura, o porque las condiciones de contorno son no lineales. Por lo general, la no linealidad asociada con las propiedades del metal dependientes de la temperatura es leve debido a sus propiedades. Sin embargo, cuando se incluyen los efectos de calor latente, el análisis puede ser severamente no lineal.

Las condiciones de frontera son muy a menudo no lineales; por ejemplo, coeficientes de película pueden ser funciones de la temperatura superficial. Una vez más, las no linealidades suelen ser leves y causan poca dificultad. Una condición de la película que cambia rápidamente (dentro de un paso o de un paso a otro) puede ser modelada fácilmente usando coeficientes de película que dependen de la temperatura y de campo variable dependiente<sup>[9]</sup>.

### 3.3.6. ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN REGIMEN TRANSITORIOS

El tiempo de integración en problemas transitorios se realiza con el método de Euler en reversa (a veces también se conoce como el operador de Crank-Nicholson modificado) en los elementos de la conducción pura. Este método es incondicionalmente estable para problemas lineales. El tiempo de incremento en un análisis de transferencia de calor transitoria puede ser controlado directamente por el usuario o automáticamente por Abaqus/Standard. El incremento automático del tiempo es generalmente preferido<sup>[9]</sup>:

- **Incremento automático.** Los incrementos de tiempo se pueden seleccionar de forma automática basándose en el cambio nodal máximo de temperatura permisible prescrito por el usuario en un incremento, Abaqus/Standard restringirá los incrementos de tiempo para asegurarse de que este valor no se supere en cualquier nodo (excepto los nodos con condiciones de frontera) durante los análisis.
- **Incremento fijo.** Si se selecciona un incremento directo y no se especifica  $\Delta T$ , los incrementos de tiempo,  $\Delta t$ , serán igual al incremento de tiempo inicial especificado por el usuario, luego estos serán utilizados en todo el análisis.

### 3.3.7. ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR ACOPLADO SECUENCIALMENTE

Se utiliza cuando el campo de esfuerzos - deformación en una estructura depende del campo de temperatura en la misma, aunque el campo de temperatura se puede encontrar sin el conocimiento de la respuesta de esfuerzo - deformación; y por lo general se lleva a cabo para la primera

realización de un análisis de transferencia de calor no acoplado y luego un análisis de esfuerzos – deformación.<sup>[9]</sup>

Para hacer esto temperaturas nodales se almacenan como una función del tiempo como una base de datos de salida (ODB) solicitando variable de salida NT (Nodal Temperatura) como salida de los resultados.

Las temperaturas se usan en el análisis de esfuerzo como un campo predefinido; la temperatura varía con la posición y por lo general depende del tiempo. Tales campos predefinidos siempre se leen en Abaqus/Standard en los nodos. Estos se interpolan los puntos de cálculo dentro de los elementos según sea necesario. La interpolación de la temperatura en los elementos de esfuerzo suele ser aproximado y un orden inferior a la interpolación de desplazamiento para obtener una variación compatible termo-mecánicas.

## **CAPITULO 4. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO Y SIMULACIÓN**

Habiendo definido todas las consideraciones, variables y propiedades ha llegado el tiempo de entrar en la parte práctica de la investigación. Con el objetivo de obtener la información que se necesita para realizar la simulación y validar los resultados obtenidos durante la misma, se llevaran a cabo pruebas de temple, con barras de diferentes diámetros para luego extraer muestras y prepararlas para ser estudiadas bajo el microscopio, además se hará uso de información disponible y cuya certeza ha sido comprobada por medio de trabajo experimental, como por ejemplo curvas y de Lamont las cuales se usan en la prueba de templabilidad Jominy, con esto se podrá hacer una comparación entre lo teóricamente esperado, lo que se encuentra en los análisis metalográficos y lo que se es capaz de obtener por medio de la simulación.

Debido a esto, antes de discutir la implementación del modelo se hará la descripción del proceso experimental para la obtención de las muestras, así como los resultados obtenidos por medio de las curvas de templabilidad, para definir los parámetros finales y necesarios con el fin de implementar la simulación del enfriamiento durante el temple. En el capítulo 5 de esta investigación se dedicará el espacio suficiente para la validación del modelo, así como otros agregados que enriquezcan los resultados y conclusiones de este trabajo.

### **4.1. PRUEBAS DE TEMPLE**

Las pruebas de temple se incluyen en las especificaciones de un acero con una templabilidad adecuada así como las dimensiones propicias para lograr obtener lo más aproximado a una transferencia de calor del 100% radial, a continuación se expondrán los criterios tomados para la realización de dichas pruebas.

#### 4.1.1 SELECCIÓN DE ACERO

El acero que se consideró usar desde un principio es AISI 1045, este es un acero grado ingeniería de aplicación mundial que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Frecuentemente se utiliza para elementos endurecidos por llama o inducción. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro, lamiendo en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite o en agua y, luego, revenido).

Es un acero de baja templabilidad que puede ser endurecido en espesores delgados por temple en agua. En secciones más gruesas se puede obtener un endurecimiento parcial de la sección de la pieza y el incremento de la resistencia será proporcional a la capa o espesor endurecido, al ser deformado en frío presenta un incremento en la dureza y la resistencia mecánica.

La composición química que está disponible en la hoja técnica obtenida de la Cia. General de ACEROS S.A se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Composición del acero 1045.

Composición Química, % en peso	C	Mn	P	S	Si
Valores típicos	0.43 - 0.5	0.6 - 0.9	<0.04	<0.05	0.2 -0.4



Fig. 4.1. Fotografía de las barras de acero de 1 y ½ pulg antes de ser tratadas térmicamente.

#### 4.1.2. SELECCIÓN DE DIMENSIONES DE LAS BARRAS

Se templarán barras cilíndricas de acero AISI 1045, durante el enfriamiento en el fluido de temple existirá flujo de calor no solo en la superficie cilíndrica de la barra sino también en su extremo superior e inferior. Así, la cantidad de energía transferida será mayor en los extremos, por lo tanto las barras deben de ser lo suficientemente largas para que los resultados se vean afectados por la influencia del flujo de calor de los extremos de la misma y permitir aislar un área donde la transferencia de calor sea totalmente radial, de estas áreas se extraerán las muestras que se utilizarán para el análisis metalográfico.

Existe una relación que útil para definir la longitud necesaria para lograr las condiciones adecuadas, la cual es  $\sim 4$  veces el radio de la misma. Así, los diámetros elegidos para las pruebas fueron de ½, 1 y 2 pulg, siendo la de 2 pulg la que al usar la relación expuesta anteriormente dará como resultado una barra más larga, aunque se consideró utilizar la misma longitud para las otras barras. Por lo tanto, este cálculo se presenta en la Ec. 4.1:

$$\text{Longitud media de barra (2pulg)} = 4r \quad (4.1)$$

Así sustituyendo queda:

$$\text{Longitud media de barra (2pulg)} = 4(2.54\text{cm}) = 10.16 \text{ cm.}$$

La longitud obtenida es de 10.16 cm, las barras que se compraron para el experimento median entre 21 y 22 cm de largo por lo que cumplen satisfactoriamente con la condición antes establecida para asegurar que en la zona central de la barra no existirá influencia del flujo de calor por los extremos durante el enfriamiento. Además, de este sencillo análisis se llevó a cabo una simulación del enfriamiento de la barra como confirmación de esta consideración.

La cantidad de barras a temprar para cada uno de los diámetros seleccionados son tres, de cada una se obtendrá una muestra a la que se le realizara la preparación adecuada para obtener fotografías de su microestructura, así como la distribución de la misma en la sección transversal o a través del radio del material, esto con el objetivo de obtener suficiente información para validar el modelo.

#### **4.1.3. SELECCIÓN DE MEDIO DE TEMPLE Y TEMPERATURA DE TEMPLADO**

Se consultaron tablas que contienen las propiedades y los tratamientos térmicos posibles en el acero AISI 1045 para poder determinar las condiciones adecuadas en las que se debe de realizar el temple, a partir de esto la temperatura que las barras deben de alcanzar en el horno debe de ser de 850 °C, el tiempo mínimo de permanencia de cada barra para alcanzar la temperatura en toda su sección transversal fue de media hora por pulgada de radio, algunas especificaciones señalan que solo son necesarios 15 minutos por pulgada, pero con el doble de tiempo se asegura que la pieza tenga una temperatura uniforme.

El medio de temple que se utilizó fue agua de grifo a temperatura ambiente, para alcanzar la severidad de temple adecuada se acordó realizar agitación moderada de las piezas mientras están inmersas en el líquido, para esto se utilizó alambre con el fin de crear una pequeña canasta con el propósito de manipular con mayor seguridad las piezas a temprar y esta permitió a la vez llevar a cabo la agitación. Se utilizó agua de grifo ya que es el medio de temple más severo y permitido.



Fig. 4.2. Fotografía de soporte hecho con alambre galvanizado usado para manipular las barras cuando AISI 1045 sacadas del horno a alta temperatura.

#### **4.1.4. TEMPLADO DE LAS BARRAS**

Se precalentó el horno hasta la temperatura establecida de 850 °C de forma gradual, aumentando la temperatura en intervalos de 100 °C cada hora. Luego se definió que cada una de las barras sería puesta dentro del horno dependiendo de su radio en intervalos de 5 min (ver, Fig. 4.3).



Fig. 4.3. Fotografía tomada mientras se introdujo la última barra de acero de 2 pulg cuando el horno ligeramente por arriba de 850 °C en su intervalo correspondiente, se puede observar que la superficie de la barra que se introdujo primero posee un color idéntico a las paredes del horno, la del medio es un poco más oscura ya que aún no ha alcanzado la misma temperatura y finalmente la que se encuentra más a la derecha apenas comienza su calentamiento.

Luego de que pasará el tiempo correspondiente para cada una de las barras alcanzará la temperatura de temple, se deben de extraer y enfriarse de manera brusca, como se mencionó anteriormente el fluido de temple en que se llevó a cabo fue agua de grifo a la temperatura ambiente, utilizando un recipiente metálico lo suficientemente grande para evitar que las piezas tuvieran algún tipo de contacto directo con el fondo o las paredes del mismo. Luego de ser introducidas las piezas en el fluido se debían agitar moderadamente para producir la adecuada severidad de temple y un enfriamiento más uniforme, al hacer que el fluido estuviese con un ligero y constante movimiento. En las Fig. 4.4 y 4.5 se presentan imágenes que ilustran este proceso.



Fig. 4.4. Momento en que se introduce una barra de acero al agua para ser templada.



Fig. 4.5. Presenta el momento en el que la barra fue extraída del medio de enfriamiento, se puede observar que su color ha cambiado evidenciando el cambio de temperatura en ese momento cercana a la temperatura ambiente.

#### **4.1.5. OBTENCIÓN DE MUESTRAS PARA LAS PRUEBAS.**

Una vez templadas las barras, se deben de cortar para obtener las muestras necesarias para llevar a cabo las observaciones de la condición metalográfica resultantes del temple en las barras. Durante el proceso de corte

la pieza debe refrigerarse constantemente para que el calentamiento debido a la fricción del disco de corte con el material no modifique la microestructura obtenida durante el temple.

Unas piezas fueron cortadas en el laboratorio de metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, mientras que otras fueron cortadas en el taller Figueroa en la localidad de Santa Ana. Las muestras de las barras de 0.5 y 1 pulg son circulares, es decir son solo un corte transversal de las mismas, mientras que la de 2 pulg con el objetivo de ser manipuladas tienen una forma triangular. En la Fig. 4.6 – 4.8 se presentan algunas fotografías que representan este proceso.



Fig. 4.6. Barras cortadas y dos muestras que serán preparadas para realizar observaciones.



Fig. 4.7 Remanentes de las barras de las que ya fueron extraídas las muestras de acero



Fig. 4.8. Muestras extraídas de las barras, el brillo de las mismas se debe a que han sido cubiertas con aceite para evitar que se corroan.

Como se observa en la Fig. 4.8, las muestras triangulares fueron extraídas de las barras de 2 pulg, ya que forma triangular es mucho más conveniente por la cantidad de cortes y observación en el microscopio óptico, la que se encuentra embutida en resina es de 0.5 pulg y las otras circulares son 1 pulg. Estas piezas luego fueron lijadas y pulidas hasta obtener un pulido tipo espejo, luego atacadas químicamente con nital al 2%.

## **4.2. SIMULACIÓN DE CURVAS DE ENFRIAMIENTO CON ABAQUS/CAE**

Es proceso de simulación tomando en cuenta los aspectos que se han planteado en los capítulos anteriores de la investigación, los resultados de la simulación serán comparados con los resultados de las observaciones experimentales que se realizaran en las muestras metalográficas extraídas de las barras de acero que fueron templados.

Antes de entrar de detalle en la simulación se plantea como se han resuelto algunos problemas que se han detectado o se produjeron a medida se han realizado pruebas con el software e investigando diferentes métodos de simular el enfriamiento en diversos materiales. En resumen los problemas a resolver están relacionados con las unidades a usar y el coeficiente de transferencia de calor, como determinar uno que coincida con las condiciones en las que se llevó a cabo el temple y principalmente coincida con los resultados teóricos y experimentales obtenidos.

### **4.2.1. DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES IMPORTANTES PARA LA SIMULACIÓN**

En varias ocasiones a lo largo de este documento se han mencionado las diferentes propiedades del acero que determinan las diferentes interacciones y reacciones que presenta el acero, por ejemplo sus propiedades térmicas y mecánicas; cuando se simula con Abaqus es de vital importancia conservar en todo momento la concordancia de las unidades.

Qué sistema de unidades se usará, SI o sistema Ingles, cuales son las magnitudes y las unidades que deben de corresponder en todo momento con las magnitudes físicas y las propiedades que interactúan durante el fenómeno a estudiar, Abaqus no lleva el control de las unidades por lo que es deber del analista siempre asegurarse que todo sea congruente al sistema que se utiliza.

A través de muchas pruebas se ha detectado que el uso del sistema métrico de unidades produce problemas en la simulación, de forma más precisa en unidades que dependen de la temperatura como la conductividad térmica del material, se presentan en diferentes fuentes en K y °C y por alguna razón ha sido imposible implementar la información de manera satisfactoria, por ejemplo la información obtenida de la investigaciones del coeficiente de transferencia de calor por la investigadora Hasam [18] no ha podido integrarse directamente a este trabajo; no obstante ha servido de referencia y guía para entender el comportamiento de las curvas de enfriamiento, lo cual se expondrá más adelante.

Retomando el punto del coeficiente de transferencia de calor se debe de señalar que la investigación no incluye la medición de este; por lo tanto, se deberá depender de la teoría para determinar uno que sirva para los propósitos de la investigación; es decir, uno que permita obtener una temperatura determinada durante un tiempo estimado dentro del diagrama TTT donde se estima se producirá cierto porcentaje de transformación de fases.

#### **4.2.1.1 PROPIEDADES TÉRMICAS DEL ACERO**

Estas fueron recopiladas de un sitio web [[www.matweb.com](http://www.matweb.com)], este sitio web se encarga de recopilar información de muchísimos materiales, para asegurar que la información es confiable otra fuente que ha utilizado dicho sitio para crear una biblioteca de propiedades de los materiales ha sido la compañía AUTODESK, para su software AUDOTEDESK MULTIPHYSICS. Otro detalle que se debe de mencionar es que las dimensiones del modelo han sido ingresadas en milímetros en lugar de metros, al usar metros en las dimensiones se han encontrado muchas incongruencias de los resultados de la simulación, posiblemente debido a problemas al relacionar unidades y valores de diversas fuentes que podrían ser no compatibles, por lo que trabajas a una menor escala

ha permitido crear un marco de unidades sólido que ha podido ser ingresado directamente en la interfaz de Abaqus.

Las propiedades importantes durante el enfriamiento son la densidad, la conductividad térmica del material y el calor específico. Los valores utilizados se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Propiedades físicas requeridas útil para la simulación del enfriamiento [21].

Propiedades requeridas simulación térmica.	
Densidad	0.00000000785 N · s <sup>2</sup> /mm/mm <sup>3</sup>
Conductividad térmica	0.0498 J/(s · mm · °C)
Calor específico	486000 J/(N · s <sup>2</sup> /mm · °C)

Si bien las unidades de las propiedades que se presentan en la Tabla 4.2 parecen poco convencionales solo se debe al hecho que se están trabajando con dimensiones en milímetros, no se optó por el uso de unidades inglesas debido a que la mayor parte de la información recopilada de documentos e investigaciones científicas está en sistema internacional de unidades, así como algunos diagramas importantes serán expuestos más adelante; el uso de estas unidades resulta congruente con Abaqus y por lo tanto adecuado para el trabajo.

#### 4.2.1.2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Esto resulta ser una de las partes más críticas de esta investigación, debido a las limitaciones de información disponible no se cuentan con cálculos exactos del coeficiente de transferencia de calor, y debido a que esta es una propiedad que no solo depende de la temperatura inicial del objeto y el medio con el que interactúa, si no con otros factores como la geometría del objeto y la velocidad a la que la barra fue agitada mientras se templaba no es posible retomar información que si bien es escasa, fue posible encontrar algunas

investigaciones relacionadas sobre este tema así como gráficos y tablas con los valores encontrados.

Otro aspecto muy importante es que debido a los diferentes mecanismo de transferencia de calor que se presentan durante el temple el valor del coeficiente no es constante, este hecho puede ser superado tomando en cuenta que en otras investigaciones donde dos grupos de diferentes investigadores han obtenido resultados similares usando un grupo un coeficiente constante <sup>[5]</sup>, así como el otro uno variable con respecto a la temperatura <sup>[5]</sup>, por lo que se optó por usar un valor constante; ahora el siguiente reto es determinar cuál es el valor numérico con el que teóricamente será posible obtener cierto porcentaje de transformación que se dan durante el enfriamiento.

Para esto es necesario utilizar el diagrama TTT para el acero 1045, en este se pueden identificar el tiempo y la temperatura para cierto grado de la transformación, el criterio que se ha establecido para que una pieza se considera templada es encontrar un mínimo de 50% de martensita [20], por lo tanto este será el punto de referencia a encontrar durante el enfriamiento. El objetivo es encontrar el coeficiente de transferencia de calor que produzca una curva de enfriamiento en la un punto que coincida aproximadamente en tiempo y temperatura con el mismo donde se espera que se producirá un mínimo de transformación del 50% en un diámetro de la barra acero determinada.

Por lo tanto, se debe de determinar cuál es la distancia desde el centro de la barra donde se encuentra este punto al que se le denomina diámetro crítico, este se define como aquel redondo donde se consigue un porcentaje de transformación martensítica del 50% [20] .

#### **4.2.1.3. DIAMETROS CRÍTICOS DE LAS BARRAS TEMPLADAS**

La forma de obtener los diámetros críticos utilizando los valores de dureza del acero cuando este tiene un porcentaje de martensita del 50% y

luego utilizando las curvas de Lamont obtenidas por medio de los ensayos Jominy y curvas transversales de dureza.

El ensayo Jominy es un método sencillo que permite utilizando una sola probeta, las sucesivas velocidades de enfriamiento. Los gráficos que se obtiene en el ensayo se relacionan con diámetros de redondos equivalentes, permiten obtener información abundante e importante, muy útil para los problemas de selección de acero [20]. Por lo tanto conociendo la dureza aproximada de un acero con el 50% es posible encontrar el diámetro crítico utilizando la relación de la dureza, diámetro, medio de temple y longitud de barra templada provenientes de las tablas de los ensayos Jominy.

En la Fig. 4.9 se presenta la información utilizada para dicho proceso que aclarará el punto expuesto anteriormente.

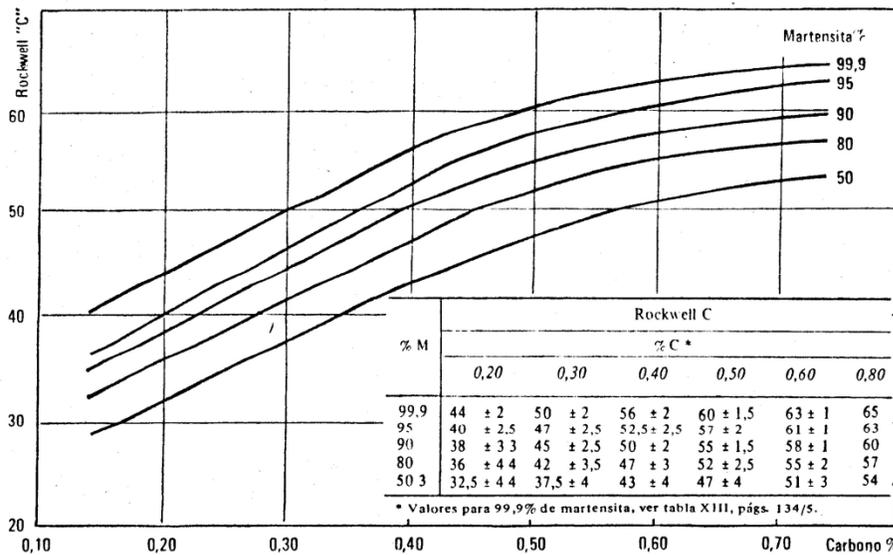


Fig. 16. - Dureza vs. % de carbono y % de martensita (Refs. 16 y 34).

Fig. 4.9. Curvas de dureza según el porcentaje de martensita y el porcentaje de carbono en el acero [20].

El acero usado para las pruebas fue un AISI 1045, este contiene en promedio un 0,45 % de C, utilizando la curva correspondiente al 50% de martensita se obtiene un valor de dureza aproximado de 45 Rockwell C. Este será usado como un valor de referencia para encontrar el diámetro crítico

teórico en las barras usadas para el experimento. El siguiente paso es usar las curvas Jominy para obtener el diámetro deseado. Como ejemplo en la Fig. 4.10 se presenta un diagrama.

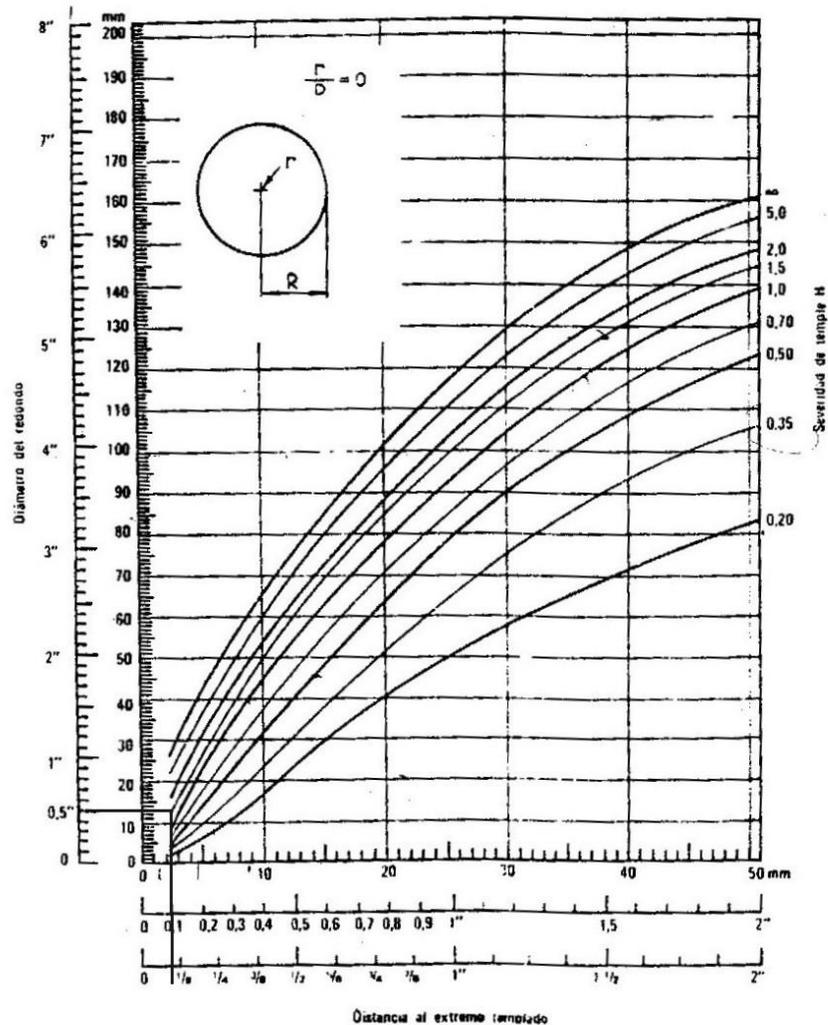


Fig. 4.10. Curvas de Lamont para una relación  $r/R = 0$  [20].

Como se presenta en la Fig. 4.10, los parámetros que se necesitan conocer son la distancia del extremo templando y la severidad de temple, esto permitirá definir cuál es el diámetro donde se encontrará teóricamente una dureza determinada, que en este caso debe de ser la misma que se ha obtenido por medio de la Fig. 4.9 que es igual a 45 HRC; por lo tanto, se debe de hacer uso de un diagrama más que es el que relaciona la distancia del

extremo templado con la dureza, este es un diagrama templabilidad Jominy, el cual se presenta en la Fig. 4.11.

#### Hardenability Diagram

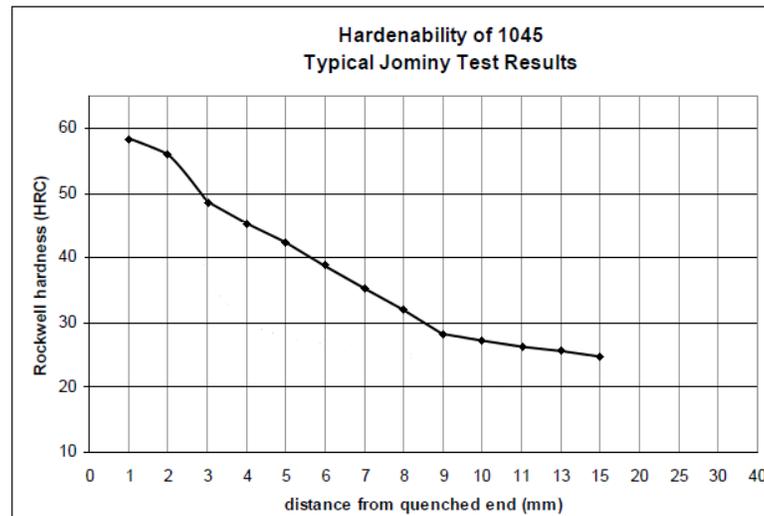


Fig. 4.11. Curva Jominy de dureza promedio para el acero AISI 1045

Esta curva promedio fue obtenido por medio de uno obtenido de una empresa comercializadora de acero, que presentaba una banda de dureza que se puede alcanzar con este acero al ser templado tomando en cuenta la tolerancia en la composición química del acero; por lo tanto, para ser usado de forma efectiva en la investigación se tomó la decisión de crear a partir de las curvas máxima y mínima de dicha banda, una sola curva promedio, que es la que se presenta en la Fig. 4.11. Por lo tanto, los resultados obtenidos de los diámetros críticos, sustentado por la información teórica, son los siguientes.

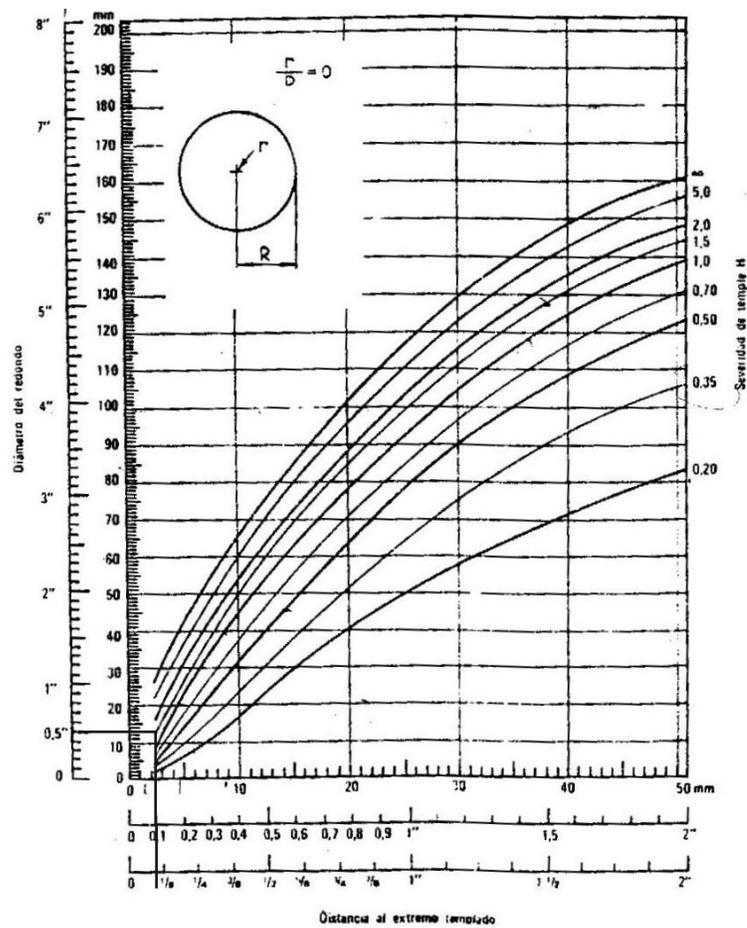


Fig. 4. 13. Curvas de Lamont de relación  $r/R = 0$ , en las que se ha marcado para una barra de diámetro de 0.5 pulg con una severidad de temple de  $H = 1.5$  [20].

El resultado de la distancia al extremo templado se introduce en la curva de templabilidad promedio y se obtiene el valor de dureza para el centro de la barra, el resultado es de alrededor de 55 RC.

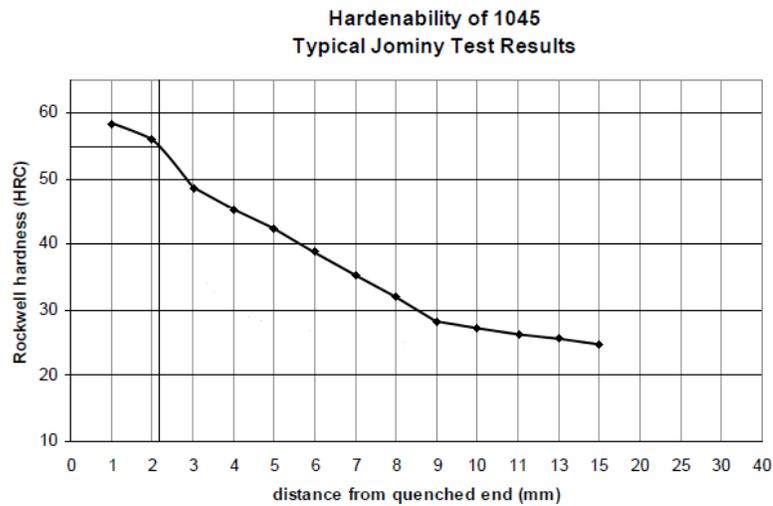


Fig. 4.14 Grafica de templabilidad promedio para acero AISI 1045 se ha marcado la dureza en el centro de una barra de 0.5 pulg de diámetro.

Este resultado indica que en el centro de la barra existe un 95 % de martensita, esto sobrepasa por mucho el criterio del diámetro crítico por lo tanto se puede concluir que la barra de 0.5 pulg de diámetro se ha templado completamente.

Debido a que se espera que la barra de 1 pulg no ha sido templada en su totalidad se comienza buscando la distancia al extremo templado que corresponde a una dureza de 45 RC, esto se presenta a continuación.

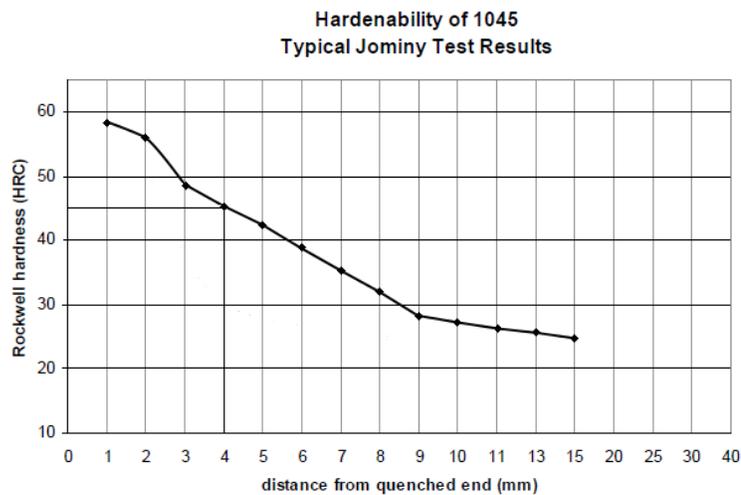


Fig. 4.15. Diagrama de templabilidad donde se ha marcado la dureza de un 50% de martensita como se ha definido teóricamente.

Como se puede ver en la Fig. 4.15 la distancia al extremo templado es de 4 mm, este valor será usado para entrar en las curvas de Lamont para encontrar la relación de radios para una barra de 1 pulg, el conjunto de curvas que coincidan con el valor de dureza requerido será lo que determinará si se ha encontrado el diámetro crítico.

En la Fig. 4.16 se presenta el correspondiente resultado obtenido a partir de la distancia del extremo templado de 4 mm, severidad de temple de 1.5 y un valor de diámetro de 1 pulg, se obtiene el gráfico que corresponde a la curva con una relación de radios de 0.3.

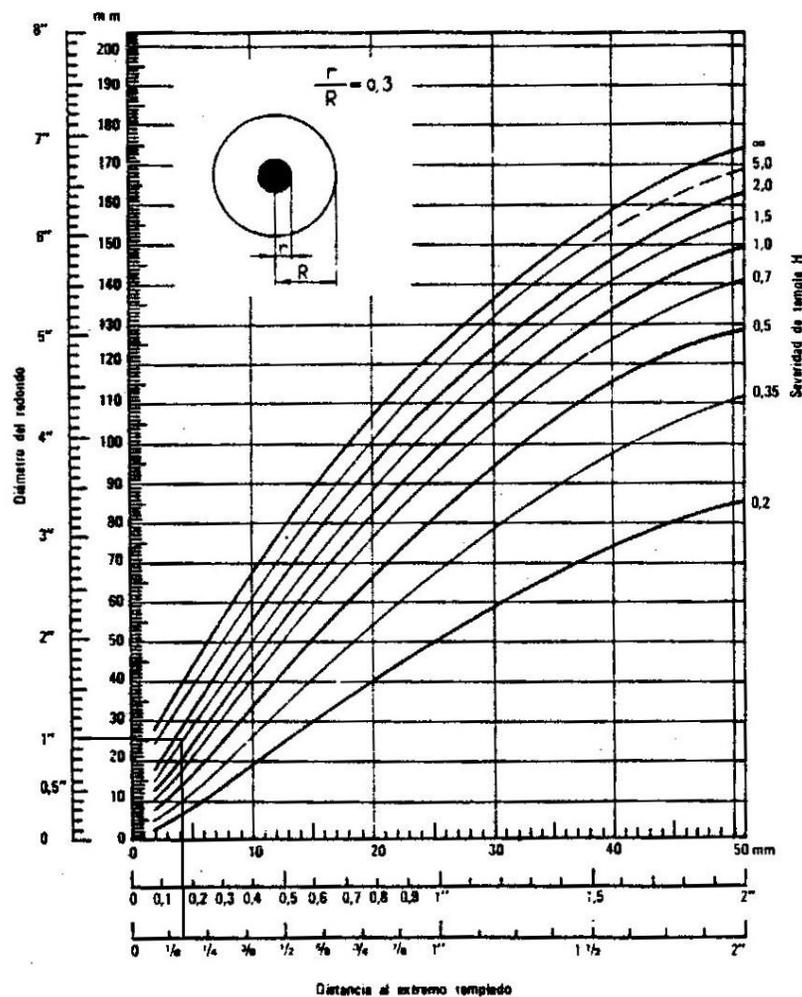


Fig. 4. 16 Curvas de Lamont de relación  $r/R = 0.3$  [20]

Finalmente se repetirá el mismo procedimiento en la barra de 2 pulg utilizando como referencia la dureza de 45 RC, la distancia al extremo templado de 4 mm y entrando en el diagrama de las curvas de Lamont como se ve en la siguiente Fig..

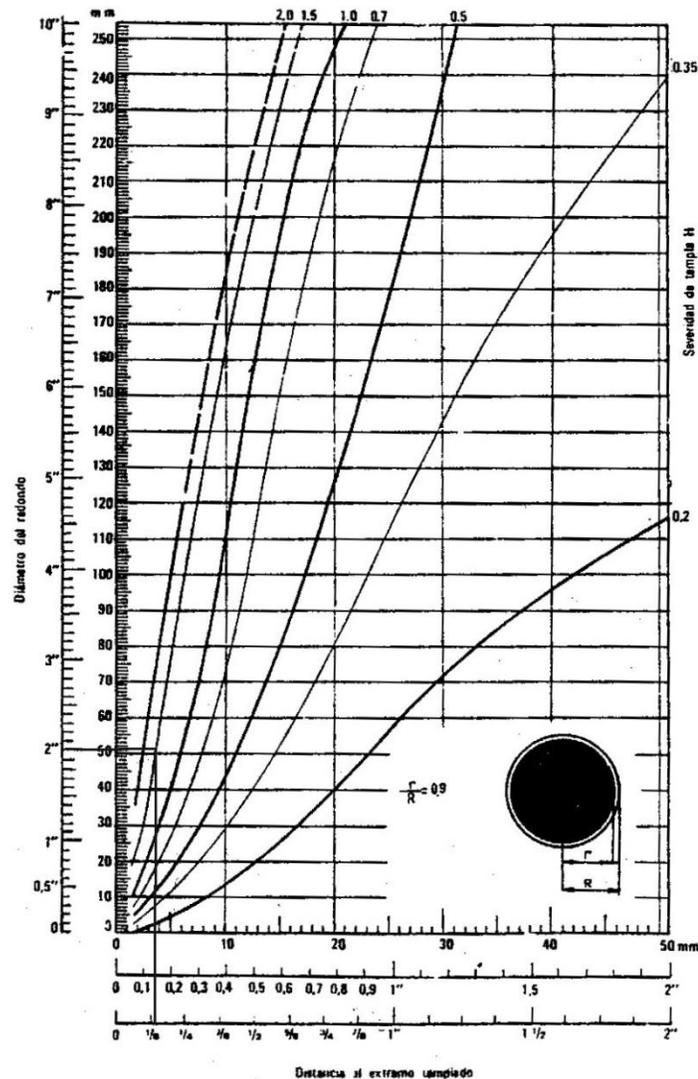


Fig. 4.16. Curvas de Lamont para una relación de radios de  $r/R = 0.9$  [20]

Al observar con cuidado, el resultado de la distancia templada para la barra de 2 pulg y utilizando la relación de radio 0.9, esta distancia no coincide exactamente por lo cual se obtendrá un valor de dureza mayor, por lo que se ha determinado que el diámetro crítico está entre las relaciones entre radios de 0.9

y 0.8. Así, al no poder determinado con exactitud el valor correspondiente, se usará ese intervalo como referencia y esto ofrece el nivel de certeza necesario para ser utilizado durante la simulación.

La información de la posición del radio crítico será usada para determinar un nodo en el modelo que coincida y en donde se graficará la curva de enfriamiento que será superpuesta en el diagrama TTT para comprobar que ésta coincide con la línea que presenta un 50% de transformación.

### **4.3 IMPLIMENTACIÓN DEL MODELO Y OBTENCIÓN DE CURVAS DE ENFRIAMIENTO**

Ya que han sido definidas las propiedades físicas que se usaran en la simulación, el valor de diámetro crítico, así como el tiempo y la temperatura que se deben de alcanzar para obtener un 50% de transformación martensítica se continuará con la siguiente etapa de la investigación que incluye la determinación de un coeficiente de transferencia de calor, con lo que se obtendrán las curvas de enfriamiento y finalmente serán validadas usando el diagrama TTT al asociar el porcentaje de fases de que se espera encontrar a las diferentes longitudes transversales de las barras según se ha determinado teóricamente. Se comenzará con una explicación breve de los pasos y criterios seguidos durante la simulación.

#### **4.3.1. CREACIÓN DEL MODELO 3D**

Esta es una tarea sencilla, las coordenadas que se usarán son las cartesianas, ya que todos los ejemplos que se ha estudiado, incluyendo simulaciones similares en 3D se ha observado que no existen inconvenientes al usar este tipo de coordenadas como referencia. Se ha tenido el cuidado especial en el tipo de sólido que se ha creado, no ha sido extruido como

normalmente se hace, si no que es un sólido de revolución sobre un eje, esto da la posibilidad de obtener un cilindro alineado perfectamente con el eje de coordenadas.

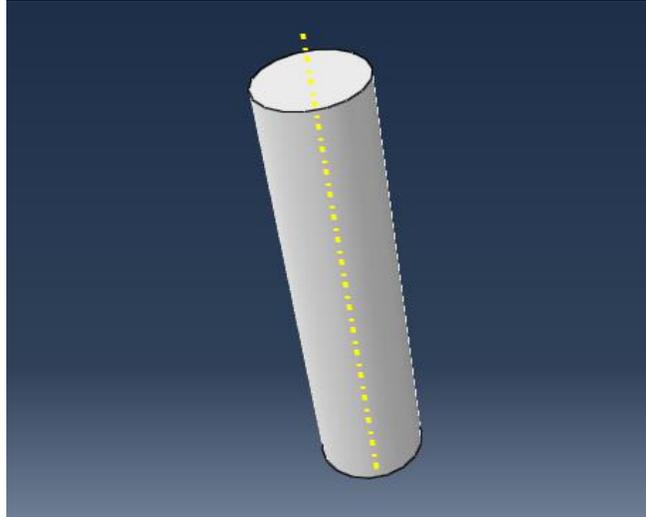


Fig. 4.17. Ejemplo de cilindro creado en la interfaz de Abaqus/ CAE

Luego de haber sido creada la pieza se han de determinar el material de que está compuesta, esto se logra ingresando las propiedades físicas que se usarán, el objetivo no debe de ser detallar la mayor cantidad de propiedades posibles, sino simplemente ingresar el conjunto de propiedades útiles; por ejemplo, si se necesita realizar solamente una simulación térmica solo se debe de introducir propiedades térmicas relacionadas con el fenómeno, como se ha mencionado anteriormente en este capítulo se ingresaran dichas propiedades.

Luego se debe de asignar dichas propiedades, creando una sección del material y debe ser asignada a la barra, antes de crear la malla y los elementos se debe de crear una instancia y especificar que la malla debe de crearse sobre la parte.

### 4.3.2. SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y NÚMERO DE NODOS

Es de vital importancia seleccionar el tipo de elementos o bloques que se utilizara, en ABAQUS existen muchos tipos de elementos o bloques con diferente cantidad de nodos, cada uno de estos ha sido generado para resolver problemas de áreas específicas, ejemplo bloques para esfuerzos, planos o 3D, transferencia de calor, interacciones termo-eléctricas etc., deben de ser seleccionados antes de crear una malla del tamaño adecuado.

Los elementos elegidos son de transferencia de calor para régimen transitorio, cuadráticos, tienen el nombre DC3D20, poseen 20 nodos, el problema se resolverá por medio de Abaqus Estándar.

La versión estudiantil de Abaqus está limitada al uso de 2,000 nodos, por lo que restringe que tan fina puede llegar a ser la malla, por lo tanto se probaron diferentes valores de semillas y se refino por medio de cortes hasta definir una que resulte satisfactoria para el análisis. En la Fig. 4.18 se presenta un elemento desarrollado hasta el punto descrito.

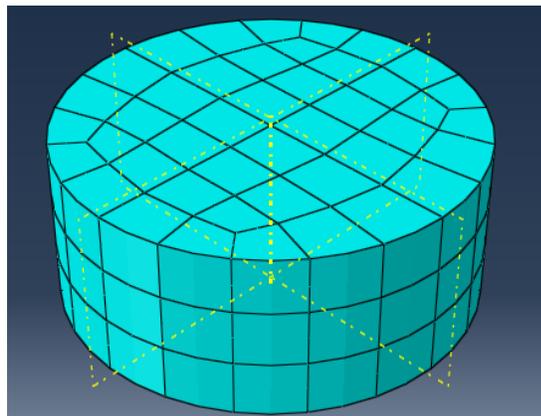


Fig. 4.17. Ejemplo de cilindro creado en la interfaz de Abaqus/ CAE

Por último, uno de los aspectos más importantes en la simulación es que se ha asumido que la transferencia de calor en la sección es completamente radial, por lo tanto no es necesario simular una barra completa de las mismas dimensiones que las usadas para las pruebas experimentales, sino que es

posible solo crear un segmento y establecer la condiciones de película necesaria en la pared cilíndrica del modelo, resulta de mucha ayuda ya que permite usar elementos más pequeños y aumentar la exactitud de la simulación, así como reduce el tiempo en que el software resuelve el problema, la asignación de la transferencia de calor sobre la pared del elemento se ilustra con la Fig. 4.19.

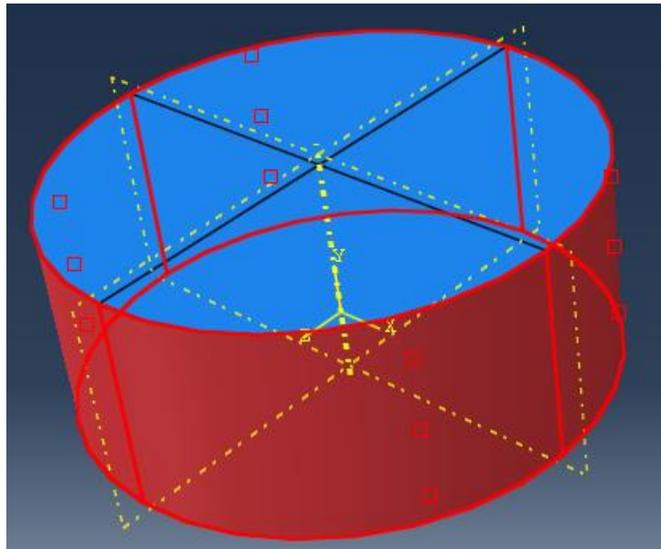


Fig. 4.19. Asignación de superficies para la transferencia de calor en el modelo.

Las áreas rojas en la Fig. 4.19 presentan las únicas superficies en donde se ha definido que habrá transferencia de calor, el software tomará como superficies aisladas la cara superior e inferior, por lo tanto la transferencia de energía por las mismas será igual a cero, esto simula que la barra es lo suficientemente larga para que a la suficiente distancia de sus extremos la influencia de la transferencia de calor que se da por las caras planas de la misma sea despreciable.

Habiendo introducido todos los parámetros para llevar a cabo la simulación solo queda hacer una revisión de la compatibilidad del modelo y unidades y enviar el trabajo para que sea procesado por el software, a continuación se muestran en las Figs. 4.20 – 4.22 que presentan el resultado del proceso de simulación.

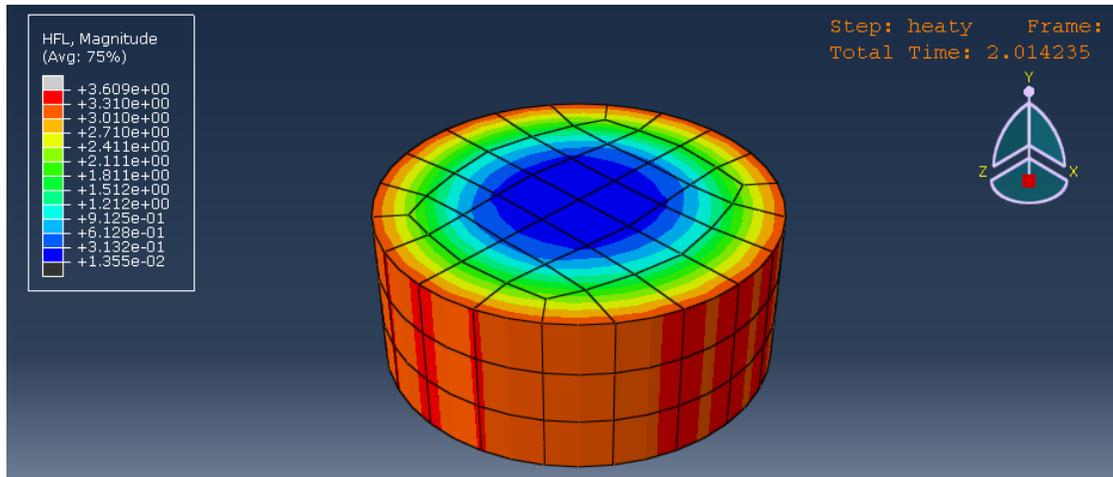


Fig. 4.20. Imagen que presenta la simulación de la transferencia de calor en la simulación del enfriamiento de una barra de 2 pulg de acero AISI 1045.

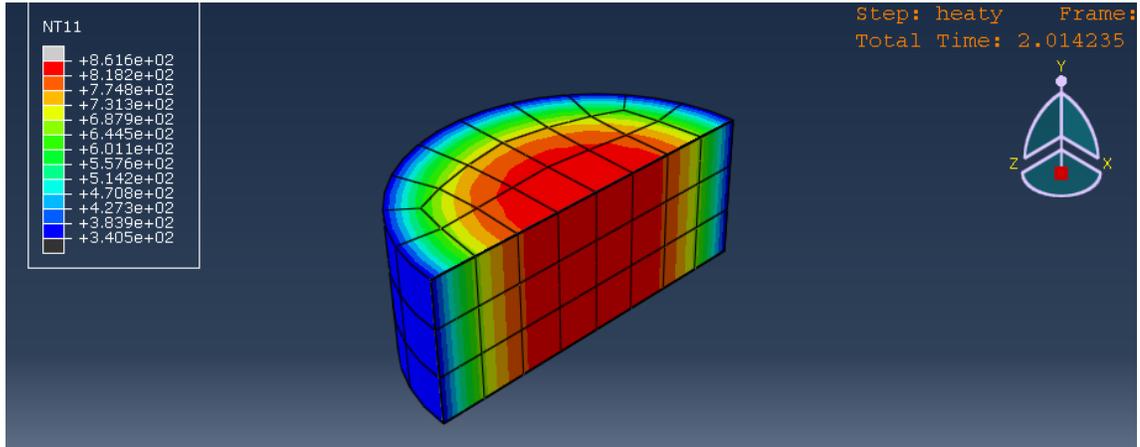


Fig. 4.21. Presenta las diferentes temperaturas durante el enfriamiento de una barra de acero AISI 1045 de 2 pulg de diámetro.

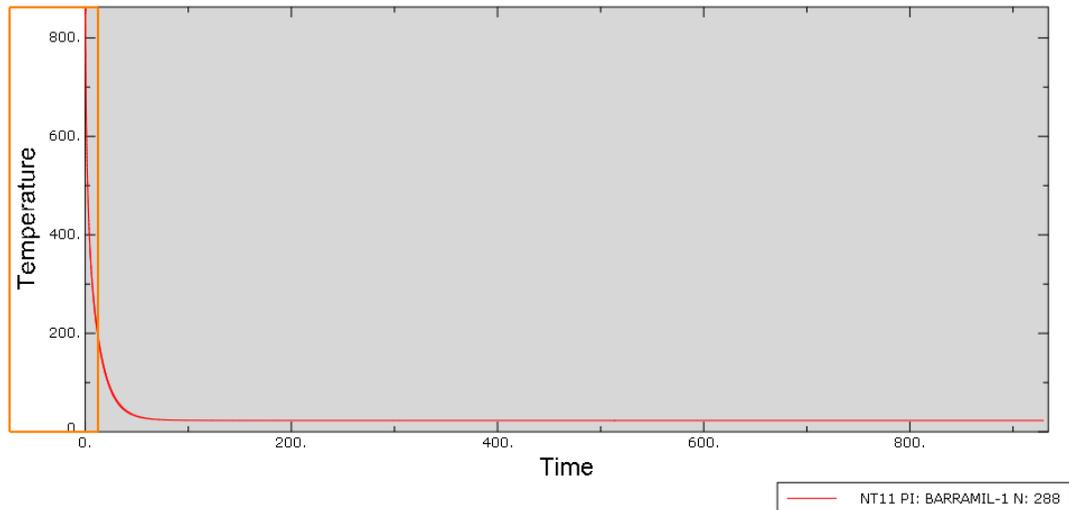


Fig. 4.22. Curva de enfriamiento obtenida del nodo 288 que se estima está a la distancia teórica donde debe de encontrarse el punto crítico.

### 4.3.3 VALIDACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Como se ha explicado anteriormente, se ha calculado un coeficiente de transferencia de calor estimado para este problema en específico, a partir de las relaciones teóricas ente la distancia de radio crítico y las cuervas en los diagramas TTT, de tal forma de sé iteró utilizando múltiples valores para encontrar cuál es el coeficiente que hace que en un nodo determinado a la distancia requerida corte la curva correspondiente del porcentaje de transformación martensítica igual al 50%, dicho de otra forma que en ese nodo en un tiempo definido posee el valor de temperatura adecuados para el proceso, los coeficiente obtenidos utilizando este método se presentan en la Tabla 4.3. Las unidades usadas son las correspondientes a las dimensiones de la barra y fueron obtenidos de una biblioteca de coeficientes de convección en el software AUTODESK MULTIPHYSICS.

Tabla 4.3. Coeficientes de transferencia de calor determinados para cada uno de los diámetros de barras usados en la investigación.

Coeficientes de transferencia de calor	
Barra de media pulgada	0.06 J/(s · °C · mm <sup>2</sup> )
Barra de una pulgada	0.05 J/(s · °C · mm <sup>2</sup> )
Barra dos pulgada	0.01 J/(s · °C · mm <sup>2</sup> )

Con esto se finaliza todo lo relacionado con la realización de esta experiencia, en el capítulo siguiente se expondrán los resultados de los experimentos y conclusiones del trabajo de investigación, ha sido un camino muy largo hasta llegar a este punto y se han sorteado muchos obstáculos y limitaciones, como un pequeño avance del contenido restante por analizar esta la comparación de las curvas de enfriamiento con el diagrama TTT, y la presentación de las fotografías tomadas durante la observación de las muestras metalográficas preparadas.

## CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el este capítulo se presentarán los resultados tanto de la simulación, así como de los resultados de las observaciones experimentales realizadas a las muestras que fueron extraídas de las barras de acero AISI 1045.

Las curvas de enfriamiento han sido obtenidas por medio de la simulación del temple utilizando el software Abaqus/CAE, éstas serán sobrepuestas en el diagrama TTT, en el cual se identificaran las transformación y se tratará de predecir los porcentajes de transformaciones que sucedes y el resultado de las mismas.

## **5.1. CURVAS DE ENFRIAMIENTO**

Éstas han sido seleccionadas en los puntos más importantes para evaluar las transformaciones de fase que se producen en la barra, que son la superficie, la mitad del radio y el centro de la misma, así como en el caso de las barras de 1 o 2 pulg donde no se espera un templado completo, en el punto donde se ha determinado teóricamente el diámetro crítico, siendo está donde se espera encontrar un 50% de transformación, estas curvas luego se superpondrán en el diagrama TTT, donde se tratará de identificar las diferentes fases o mezclas de fases, al final se espera poder estimar las condiciones de esfuerzos finales.

### **5.1.1. CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE BARRA DE MEDIA PULGADA**

Se espera que las barras de 1/2 pulg estén completamente templadas, ya que se enfriaron muy rápidamente y su diámetro es relativamente pequeño, las curvas resultantes de enfriamiento se presentan a continuación.

Inicialmente se mostrarán las curvas completas, el intervalo de tiempo que se usó en Abaqus para poder apreciar el cambio progresivo de temperatura que fue de aproximadamente un mínimo de  $1E-5$  segundos; por lo tanto, la etapa inicial de las curvas da la impresión de una recta debido a que ésta se presentan en un diagrama con escalas semilogarítmicas, tal como se presenta en la Fig. 5.1.

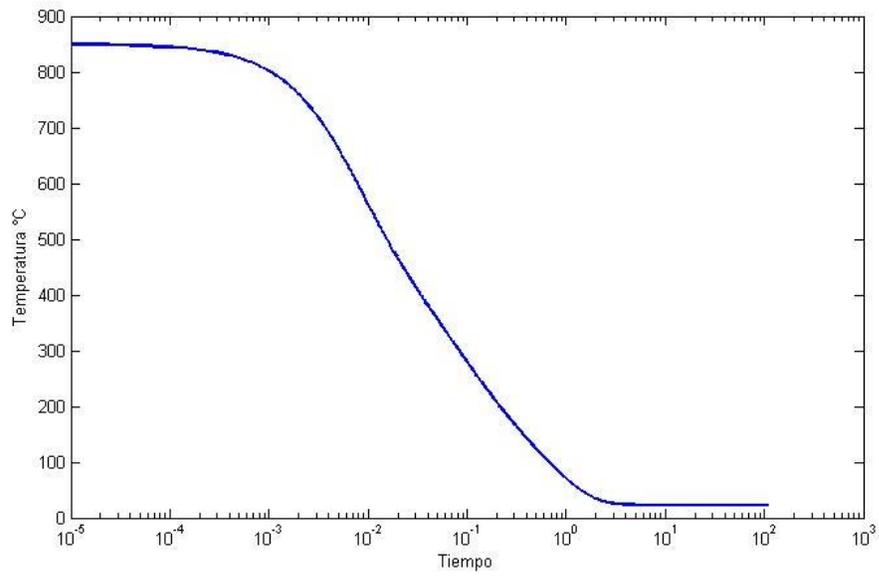


Fig. 5.1 Curva de enfriamiento en la superficie de una barra de 1/2 pulg de diámetro simulada por medio de Abaqus.

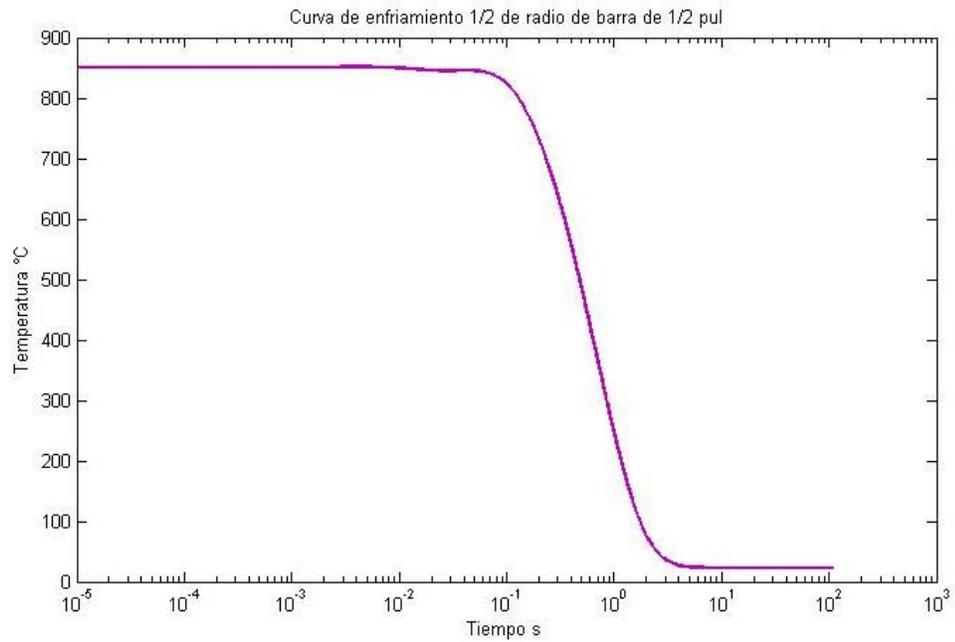


Fig. 5.2. Curva de enfriamiento correspondiente a la mitad del radio de una barra de 1/2 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.

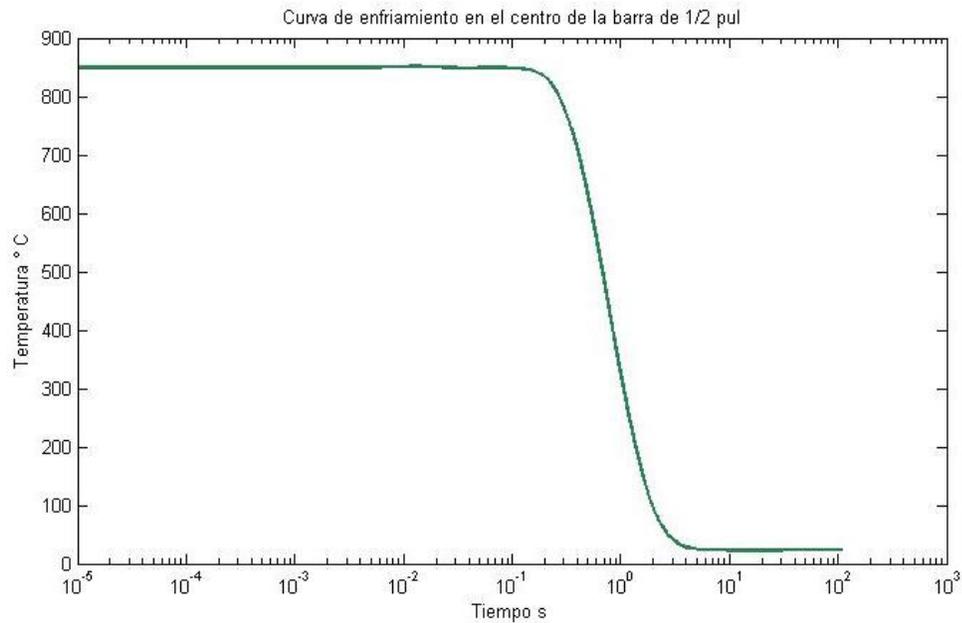


Fig. 5.3 Curva de enfriamiento en la en el centro de una barra de acero AISI 1045 de 1/2 pulg de diámetro, simulada por medio de Abaqus.

La curva de enfriamiento de la superficie es la más drástica mientras que la curva de enfriamiento de la mitad del radio así como la del centro son muy similares, lo cual es el comportamiento que se espera en piezas de metal de bajo espesor o diámetro, pero para corroborar que transformaciones se producen durante el enfriamiento se debe comparar con el diagrama TTT para el acero AISI 1045. En las Figs. 5.4-5.6 se presenta la superposición de cada una de las curvas de enfriamiento en dicho diagrama TTT.

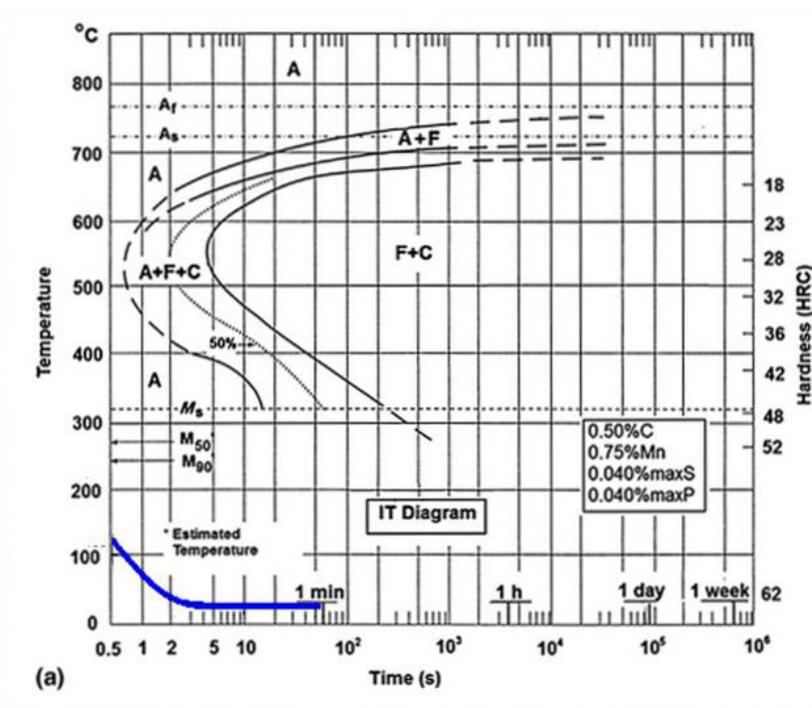


Fig. 5.4. Curva de enfriamiento de la superficie de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.

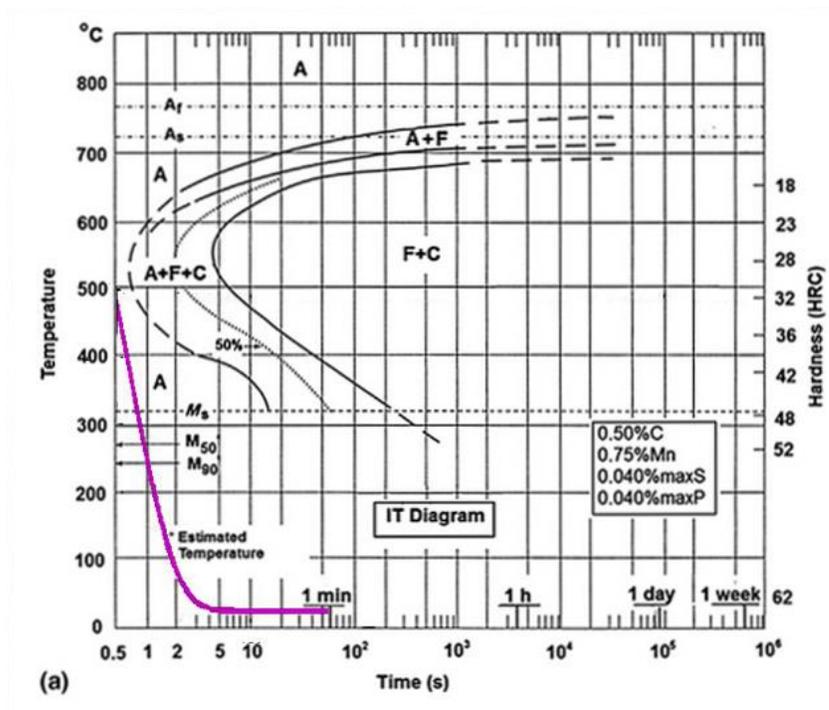


Fig. 5.5. Curva de enfriamiento de la mitad del radio de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.

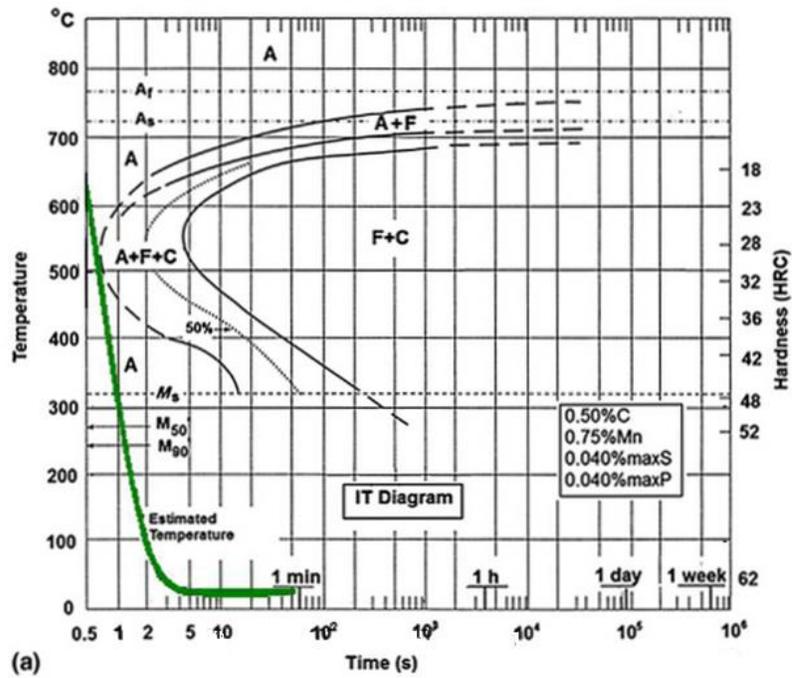


Fig. 5.6. Curva de enfriamiento del centro de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.

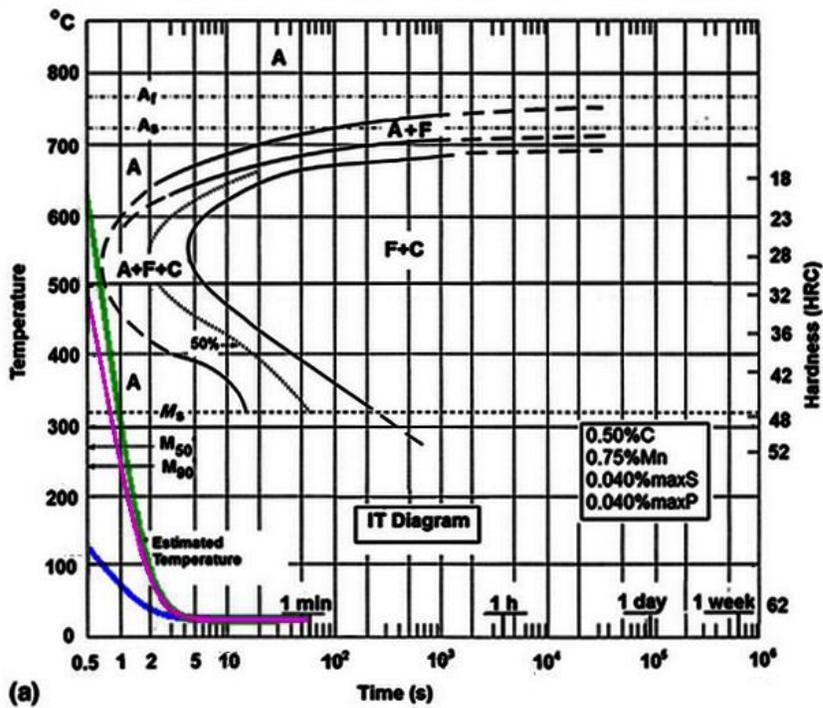


Fig. 5.7. Curva de enfriamiento de la superficie, mitad del radio y centro de una barra de 1/2 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.

En la Fig. 5.7 se puede observar que las curvas de enfriamiento de la superficie y de la mitad del radio de la barra de 1/2 pulg pasan muy a la izquierda de la nariz del diagrama de transformación de fases, y que la curva de enfriamiento del centro solo roza la nariz de la misma curva de transformación, por lo que se puede concluir que la barra está completamente templada y que el porcentaje de martensita es aproximadamente 100%. Con esto se comprueba lo que se ha predicho teóricamente, que esta barra se templaría completamente.

### 5.1.2. CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE BARRA DE UNA PULGADA

Las curvas de enfriamiento que fueron simuladas para la barra de 1 pulg son las siguientes.

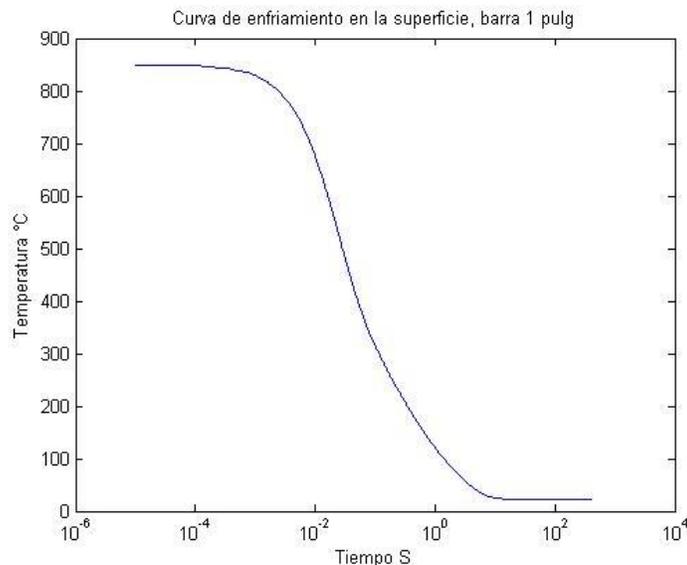


Fig. 5.8. Curva de enfriamiento correspondiente a la superficie de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.

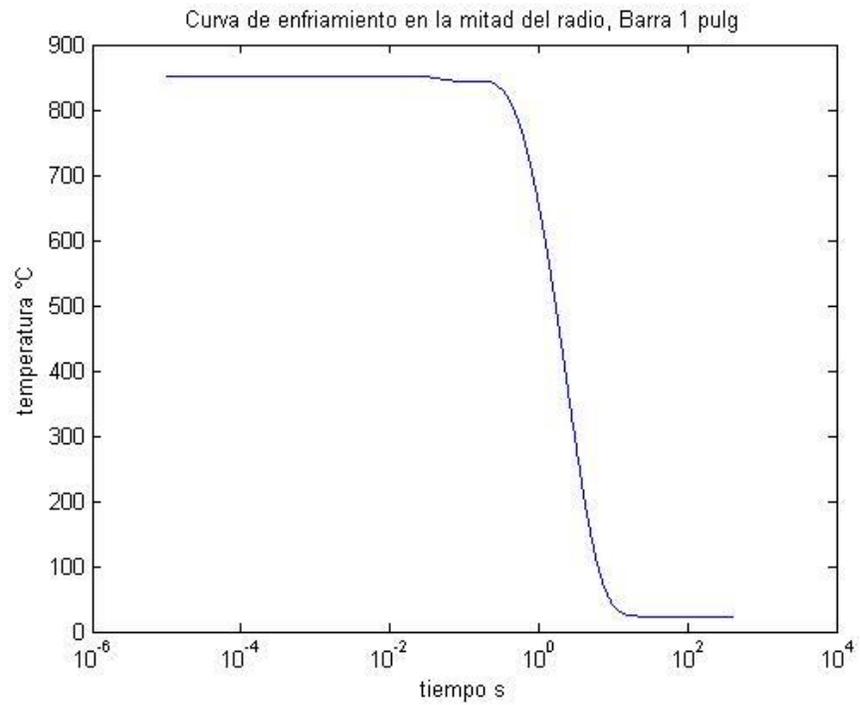


Fig. 5.9. Curva de enfriamiento correspondiente a la mitad del radio de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.

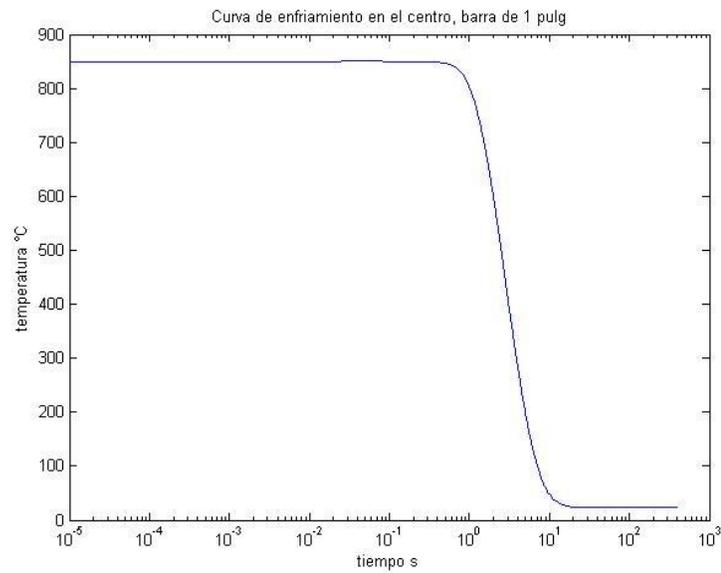
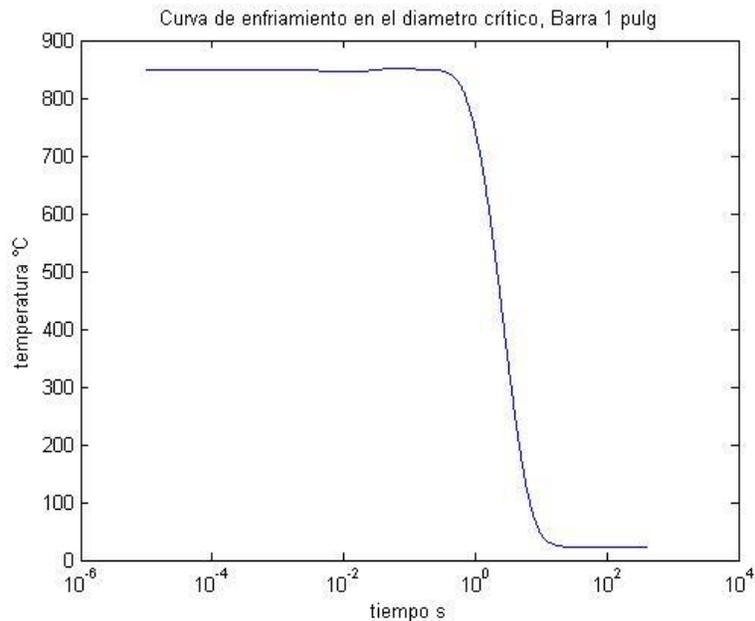


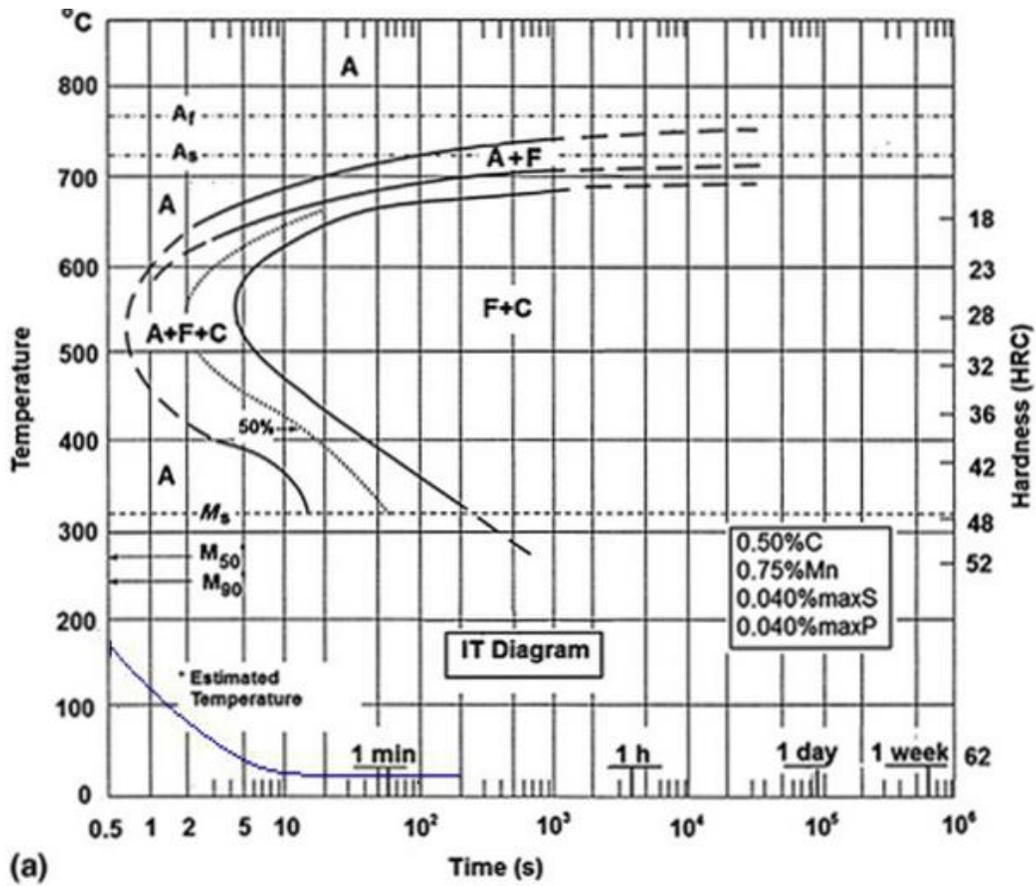
Fig. 5.10. Curva de enfriamiento correspondiente al centro de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulada por medio de Abaqus.



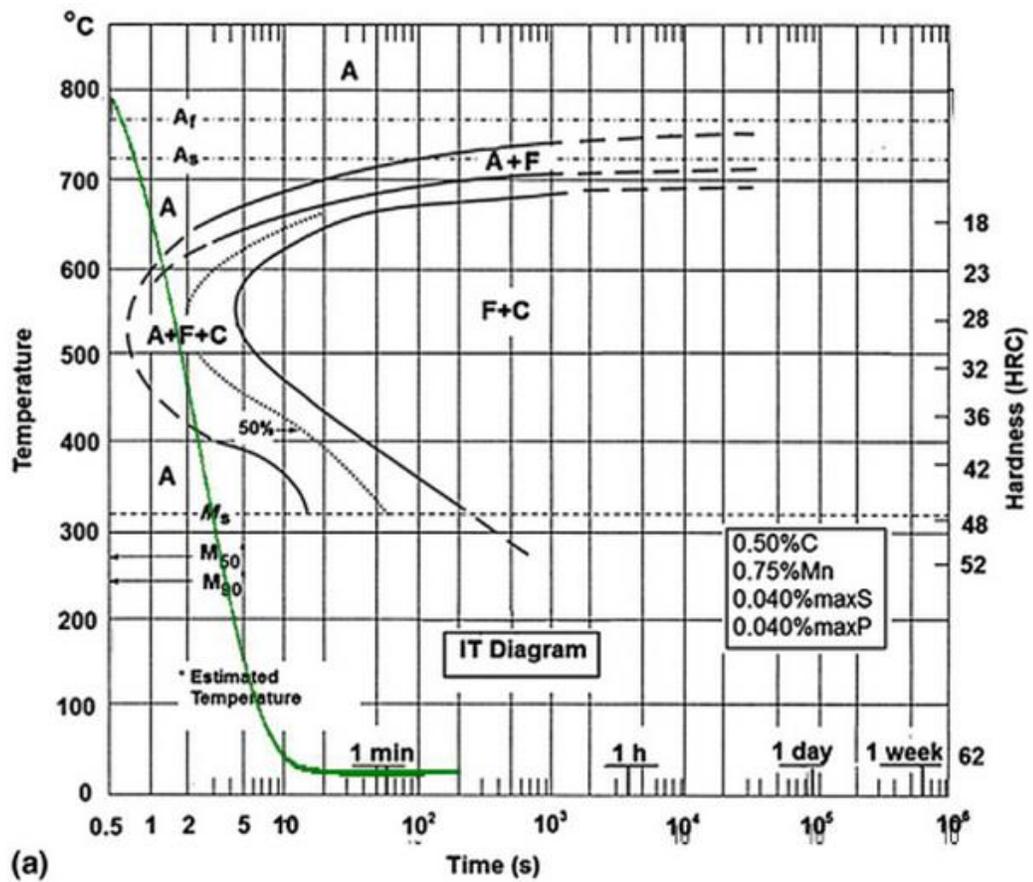
5.11. Curva de enfriamiento a la distancia que se ha calculado teóricamente el radio crítico de una barra de 1 pulg de acero AISI 1045, simulado en Abaqus.

En las Figs. 5.8 a 5.11 se presentan algunas curvas de enfriamiento que exhiben una parte plana inicial antes de descender, mientras el material se enfría, la razón de esto es que mientras aún no existe transferencia de calor en un punto interno de la barra, éste conservara su temperatura, si bien son centésimas de segundo pero al graficarse en escala logarítmica los tiempos muy pequeños son mucho más apreciables permitiendo obtener una idea de cuánto tiempo se requiere para que cierta sección de la barra comenzar su enfriamiento.

Se ha repetido el procedimiento para este calibre de barra, por lo que a continuación se muestran las curvas de enfriamiento superpuestas sobre el diagrama TTT.

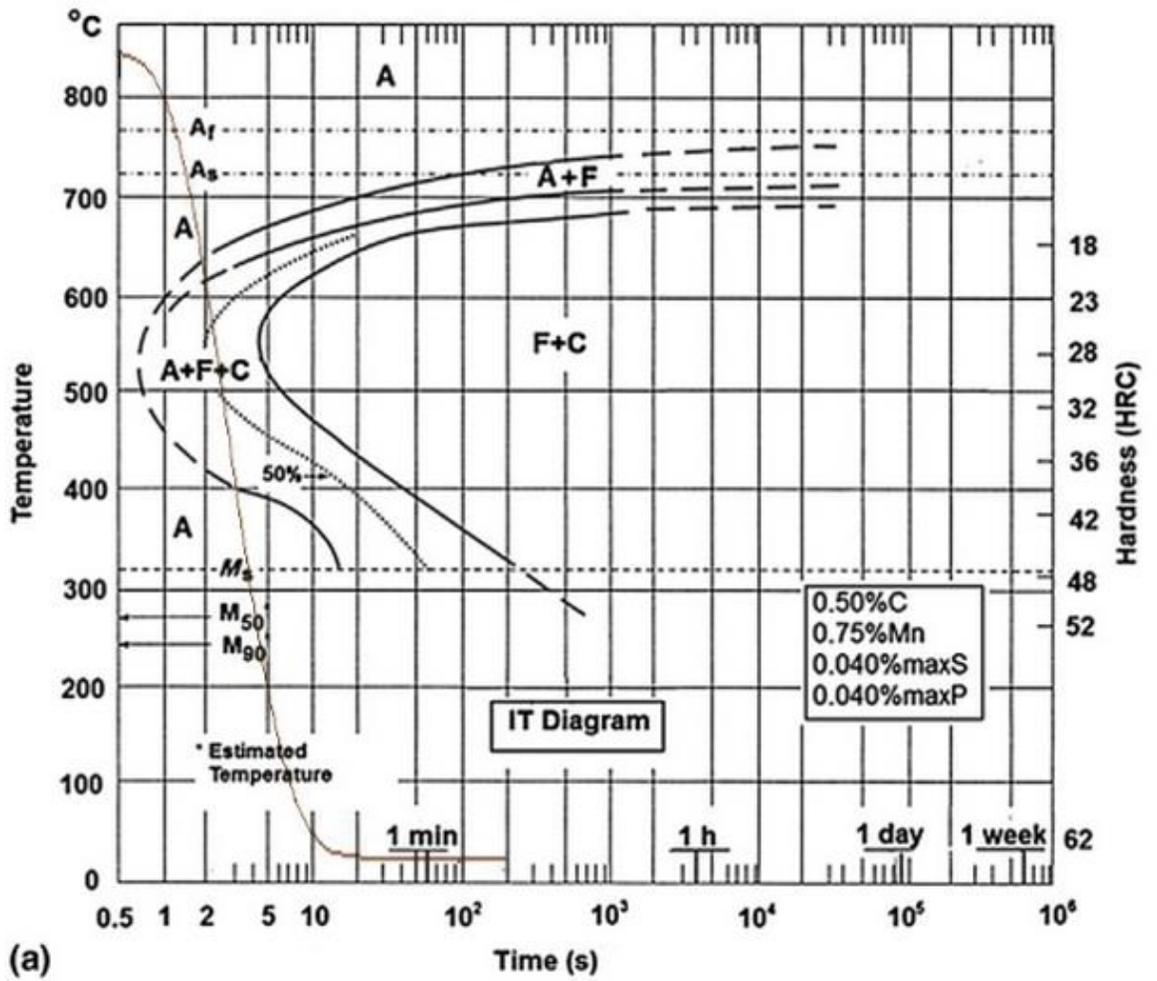


5.12. Curva de enfriamiento simulada de la superficie de una barra de 1 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.



(a)

5.13. Curva de enfriamiento simulada al a la mitad del radio de una barra de 1 pulg de acero 1045, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.



(a)

Fig. 5.14. Curva de enfriamiento simulada del centro de una barra de 1 pulg de acero, superpuesta en un diagrama TTT de un acero AISI 1045.

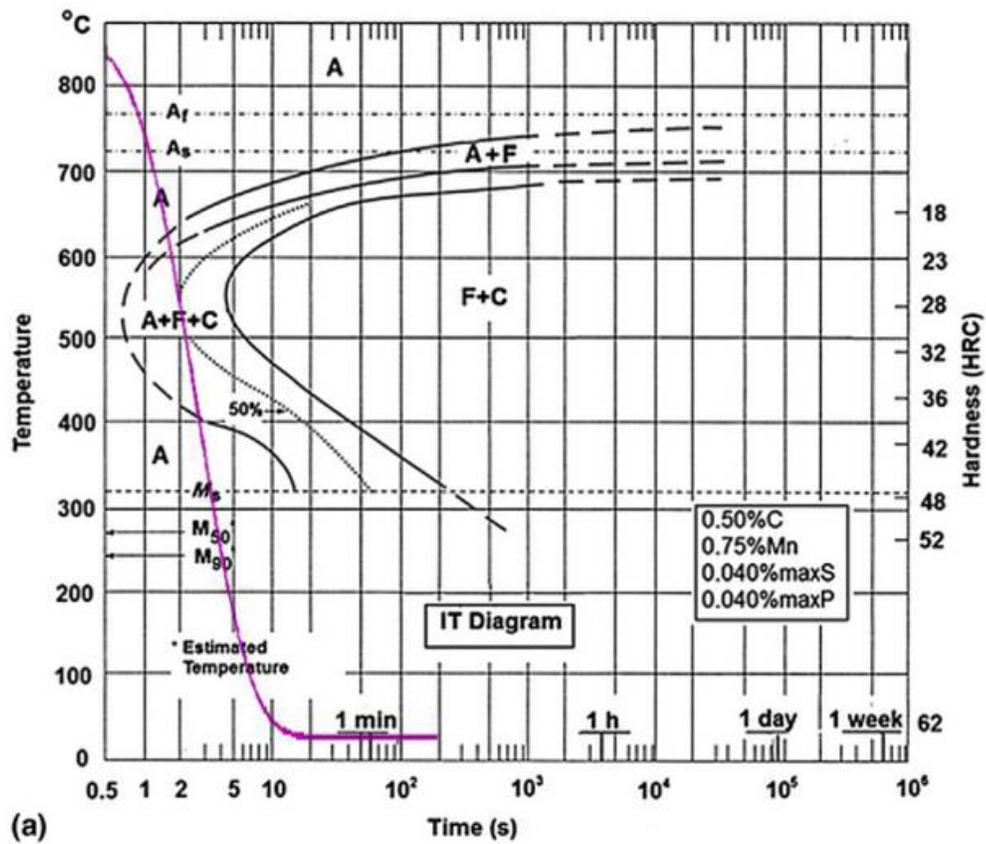


Fig. 5.15. Curva de enfriamiento a la distancia teórica del diámetro crítico, que corta a aproximadamente un 45% de transformación de perlita y se ha formado aproximadamente un 5% de ferita proeutectoide.

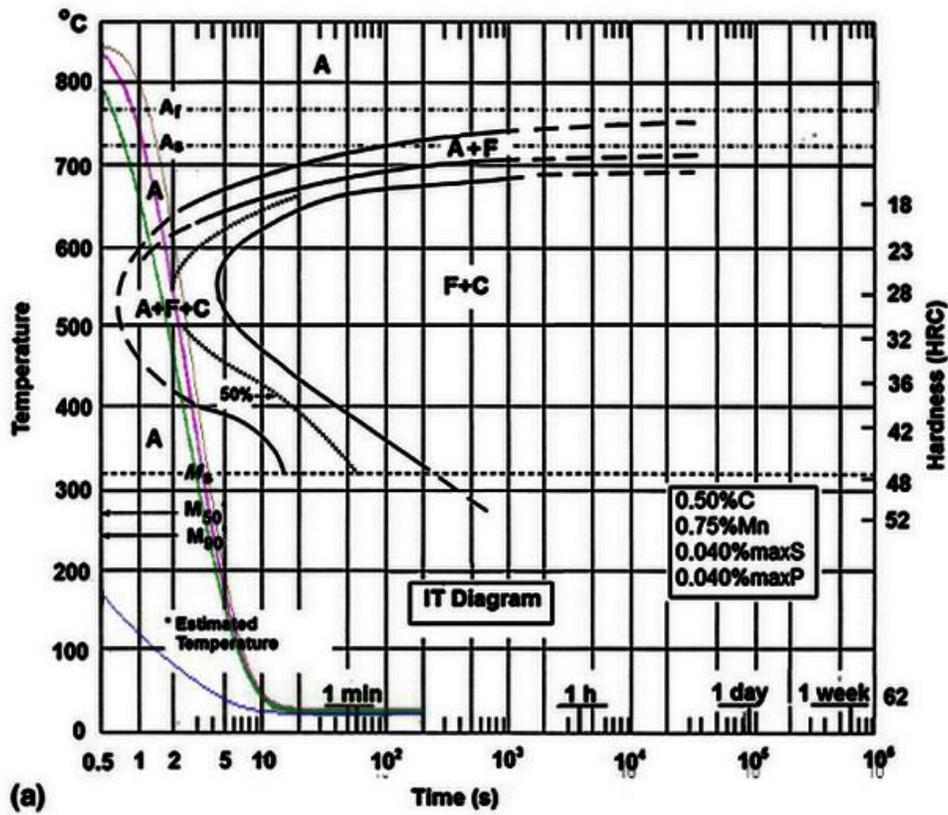


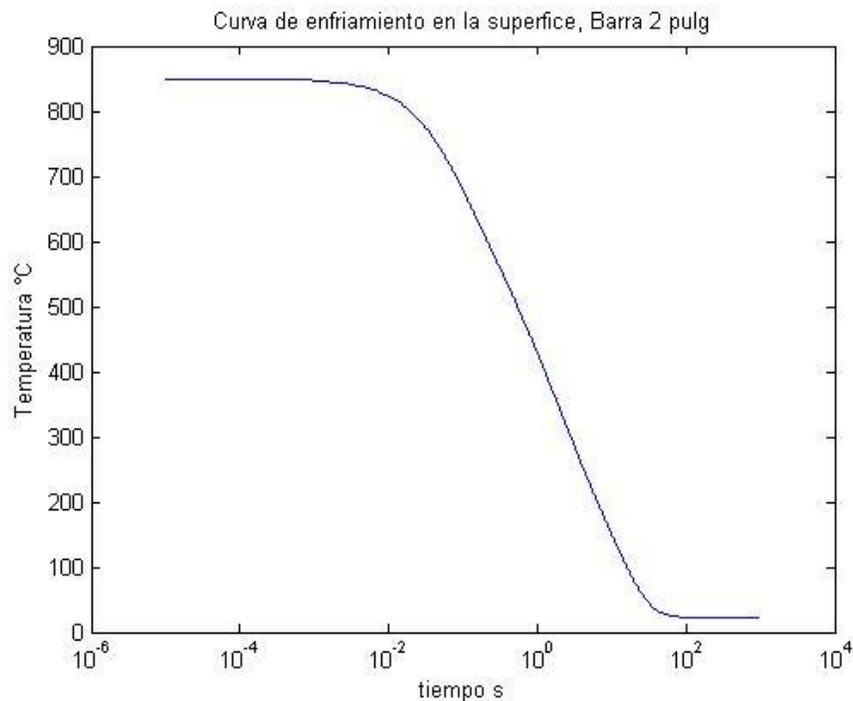
Fig. 5.16. Curvas de enfriamiento sobrepuestas en el diagrama TTT de un acero AISI 1045.

Analizando la Fig. 5.14, se puede observar debido al rápido enfriamiento que la superficie está completamente templada y la curva de la mitad del radio corta aproximadamente 45% de transformación de perlita, pero también intersecta la línea que representa el inicio de la transformación de ferrita proeutectoide, por lo tanto se tiene que tener muy en cuenta que existe una pequeña cantidad de austenita posiblemente alrededor del 5% que se transforme en ferrita. Así, se puede suponer que aproximadamente el 50% restante se transformará en martensita. En el caso la curva purpura corresponde a la curva de enfriamiento a distancia de diámetro crítico, está también corta la zona de transformación de ferrita en un porcentaje muy similar a la curva que se explicó anteriormente, por lo tanto se debe de tener en cuenta que si bien es la zona límite donde se encuentra el porcentaje de martensita requerido para que una

pieza se considera templada también existen fases más blandas por ejemplo ferrita. Por último, la curva del centro de la barra presenta un porcentaje mayor de transformación de ferrita proeutectoide y perlita, pero aún será posible encontrar cierta cantidad de martensita, por lo cual se puede asumir que la dureza del núcleo de la barra es menor debido a la disminución en concentración de martensita y el aumento del contenido de ferrita y perlita.

### 5.1.1.3 BARRA DE DOS PULGADAS

Por último se presentan las curvas obtenidas en la barra de 2 pulg. Debido al aumento de la masa de la barra se espera que el enfriamiento sea más lento disminuyendo considerablemente la profundidad de temple.



5.17 Curva de enfriamiento de la superficie de una barra de 2 pulg simulada en Abaqus

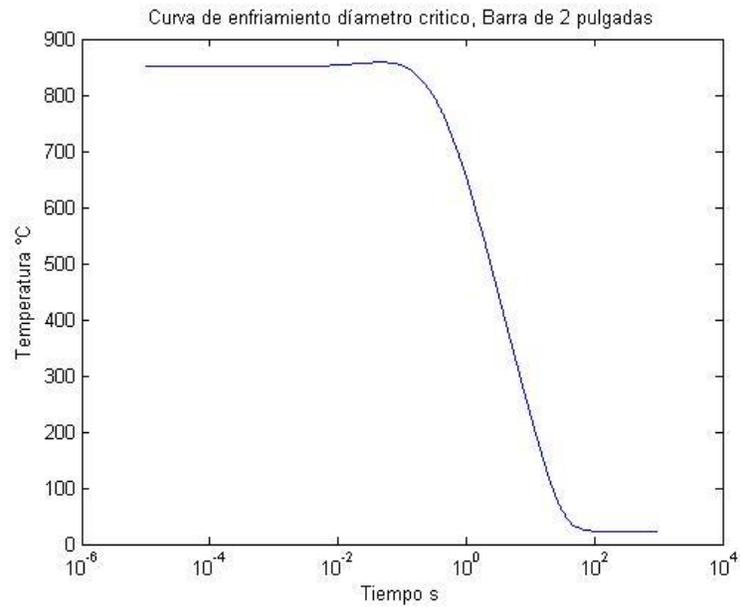


Fig. 5.18 Curva de enfriamiento para el diámetro crítico obtenida por medio de simulación en ABAQUS a una distancia aproximada de 0.85 el radio de la barra.

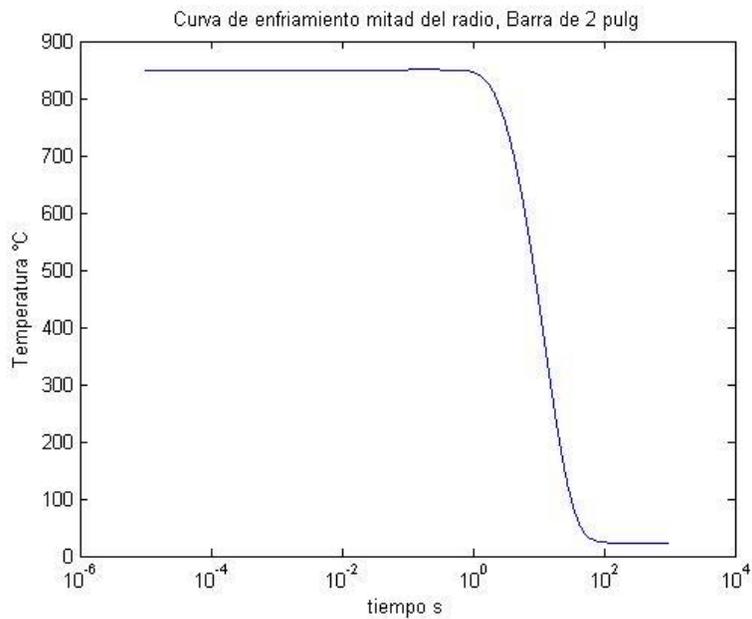


Fig. 5.19. Curva de enfriamiento en la mitad del radio de la barra de 2 pulg de una acero AISI 1045.

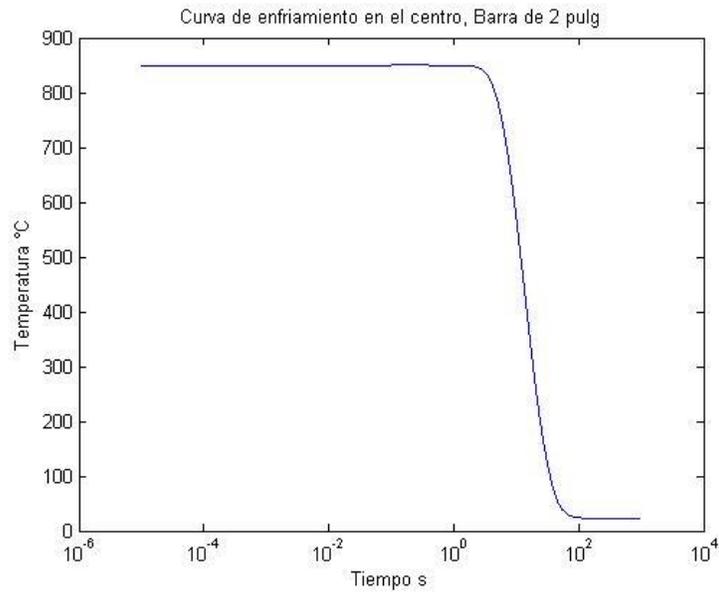
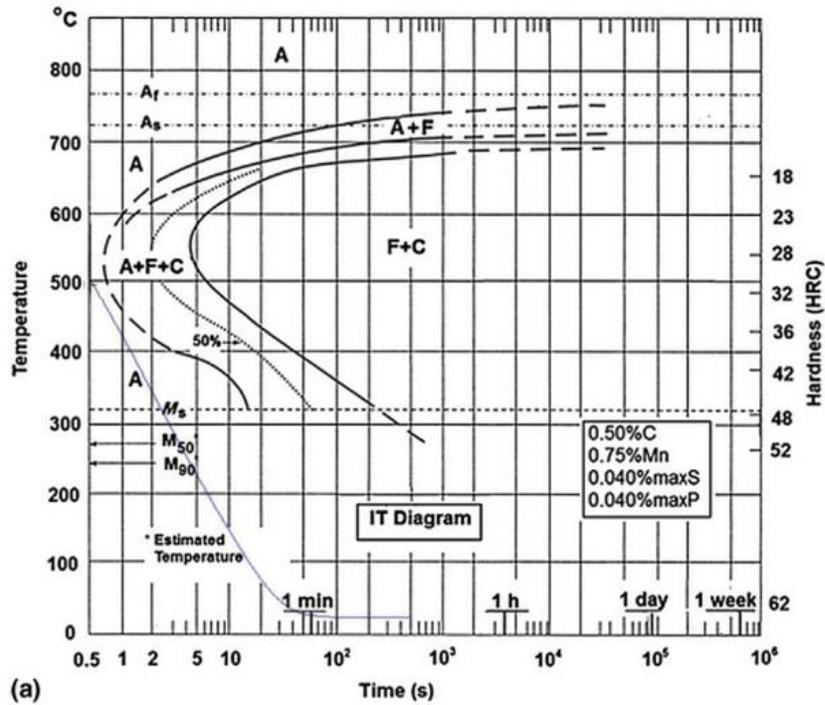
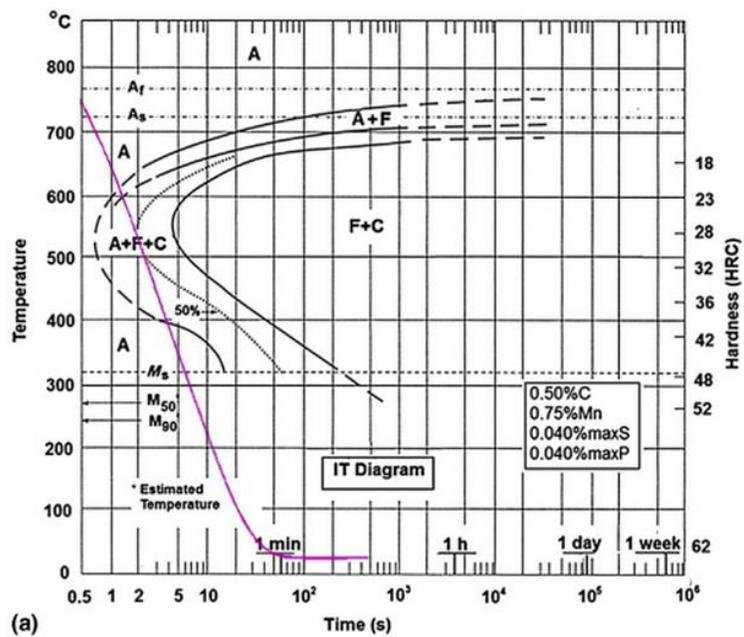


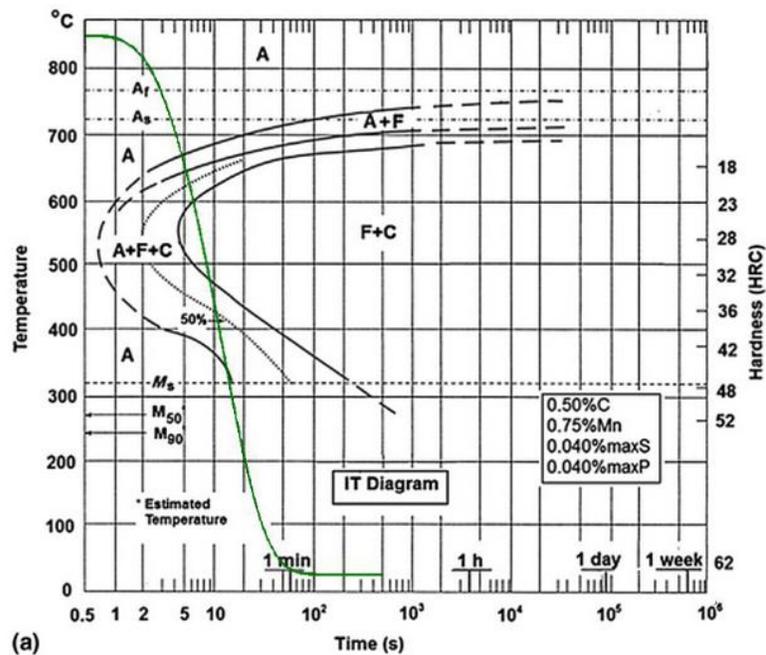
Fig. 5.20. Curva de enfriamiento obtenida por medio de simulación en Abaqus de la curva de enfriamiento al centro de una barra de 2 pulg.



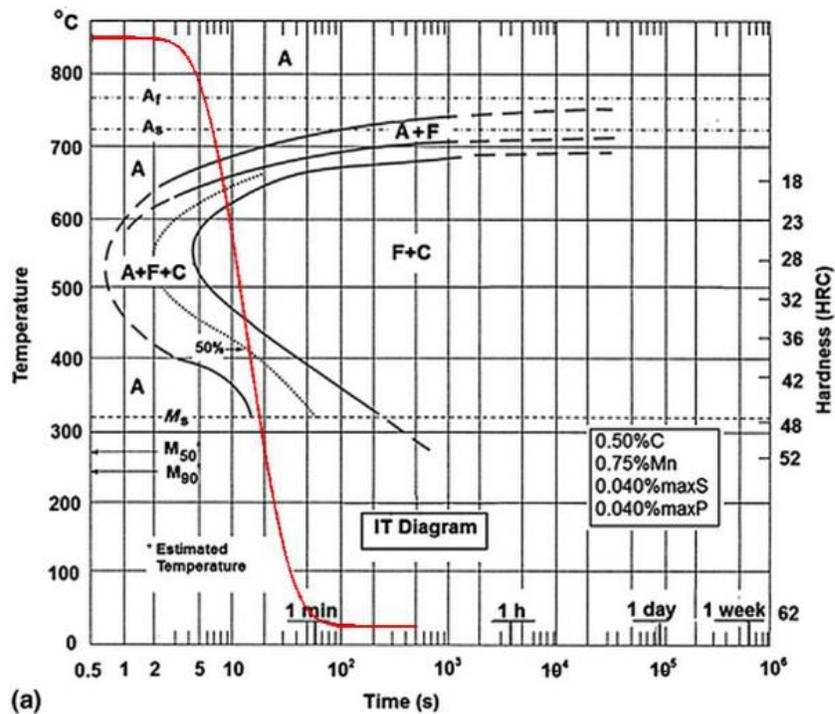
5.21. Curva de enfriamiento de la superficie sobrepuesta en el diagrama TTT



5.22 Curva de enfriamiento de la distancia del diámetro crítico sobrepuesta sobre le diagrama TTT.

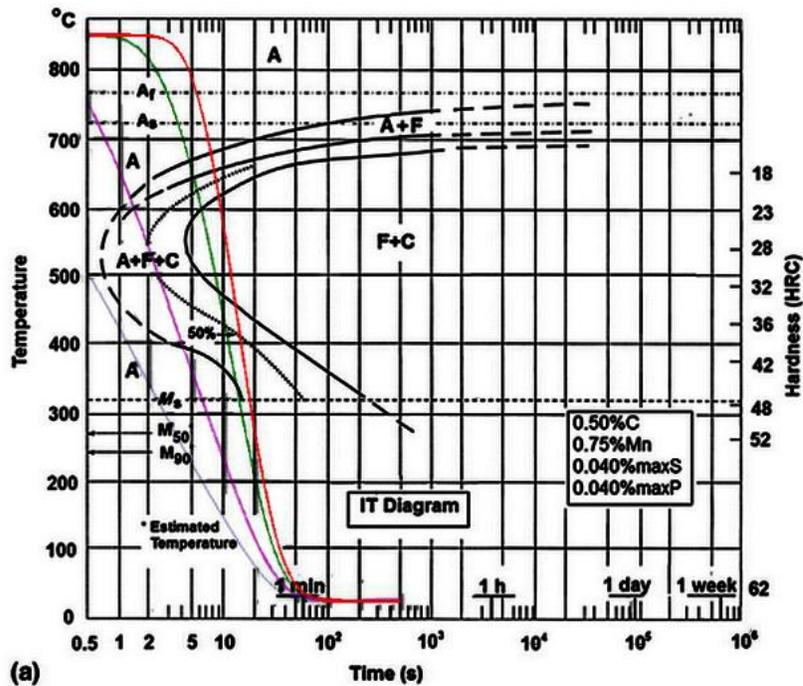


5.23. Curva de enfriamiento de la mitad del tamaño de la barra, al ver la región donde se interseca con el diagrama TTT



5.24. Curva de enfriamiento en el centro de la barra de 2 pulg sobrepuesta sobre el diagrama TTT de un acero AISI 1045.

El enfriamiento de barras de estas dimensiones es considerablemente más lento que en los casos anteriores, lo más remarcado en este caso son las curvas correspondientes al enfriamiento de la mitad de la barra y el centro de la misma, ya que en ambos caso no se produce transformación martensítica, la curva de enfriamiento se ha interceptado muy arriba de la nariz de la curva de transformación, por lo que los únicos productos de transformación que se pueden encontrar en el núcleo de la barra son perlita y ferrita. Las únicas secciones que se han templado según el requisito establecido es la superficie hasta el diámetro crítico, esto se traduce en un aproximado de 4 mm de profundidad de temple. Para ilustrar aún mejor la diferencia entre las curvas de enfriamiento se presenta a continuación el diagrama TTT, con todas las curvas sobrepuestas a la vez.



5.25. Curvas de enfriamiento sobrepuesto sobre el diagrama TTT, la curva azul corresponde a la superficie, la morada al diámetro crítico, la verdad a la mitad del radio de la barra y la roja al centro de la misma.

Se puede observar en la figura 5.25 la diferencia que existe entre la curva de enfriamiento de la superficie con la del diámetro crítico, la diferencia de temperatura es elevada si se tiene en cuenta que la distancia entre los dos puntos medidos es apenas de aproximadamente 4 mm. En la superficie de la barra de 2 pulg se puede encontrar 100% martensita, en el área del diámetro crítico alrededor de 50% martensita, un porcentaje igual de perlita y un pequeño porcentaje de ferrita proeutectoide.

## 5.2. ESTADOS DE ESFUERZOS

Se hará una predicción de los estados finales de esfuerzos según los resultados obtenidos durante la simulación utilizando como criterio los porcentajes de transformación y las estructuras que se encuentran en las secciones del material.

### 5.2.1 BARRA DE MEDIA PULGADA

Las posibilidades de fisuras están en la superficie de la barra. La distancia de la superficie a la capa donde los esfuerzos se vuelven de compresión es a un cuarto del diámetro, tal como se presenta en la Fig. 5.24.

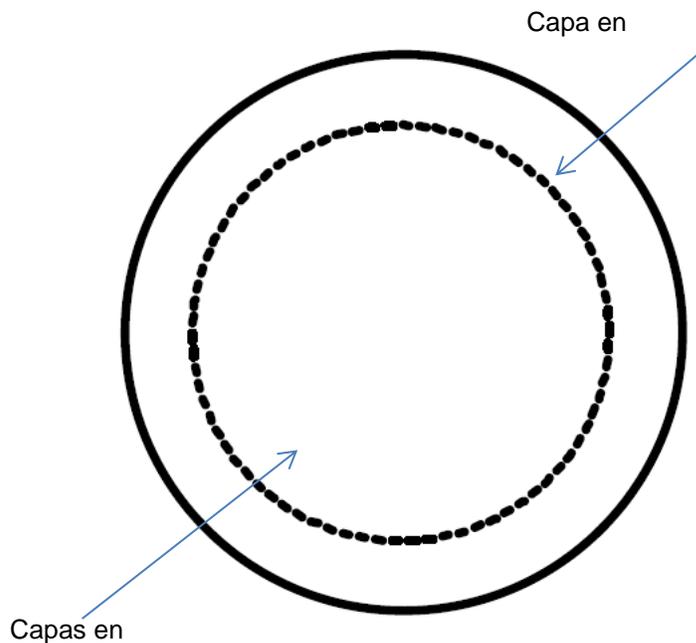


Fig. 5.24. Esquema que representa el estado de esfuerzos en la barra 1/2 pulg de un acero AISI 1045.

### 5.2.2 BARRA DE UNA PULGADA

Debido a la existencia de fases más suaves como ferrita proeutectoide y perlita luego del diámetro crítico se concluye que el estado de esfuerzos residuales que se encuentran en el núcleo de la barra a una distancia de 0.3 veces el radio de la misma; es decir, un radio de 3.5 mm. Así, el riesgo de fractura en la pieza está localizado en el interior de la misma en el límite del radio crítico, tal como se presenta en la Fig. 5.25.

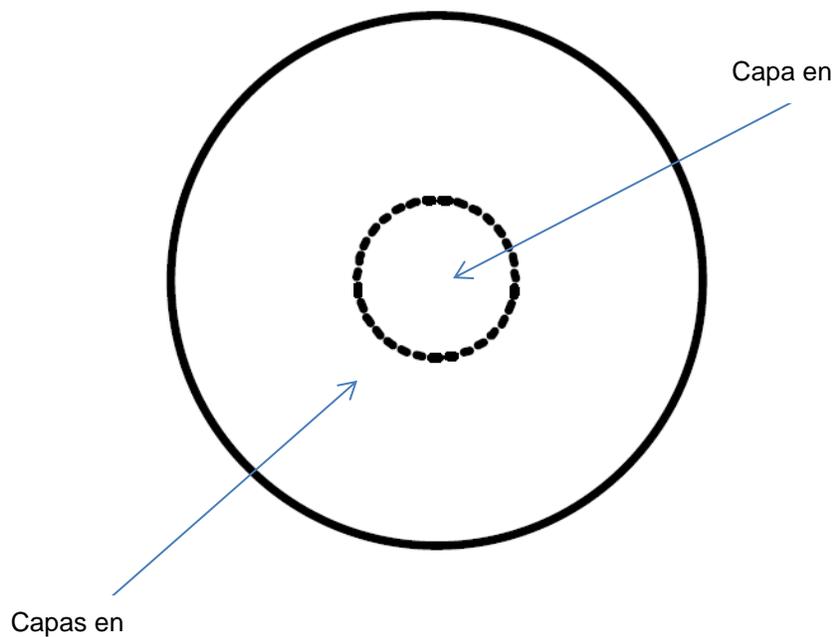


Fig. 5.25. Esquema que representa el estado de esfuerzos en la barra 1 pulg de un acero AISI 1045.

### 5.2.3 BARRA DE DOS PULGADAS

El núcleo blando es mucho más prominente en la barra de 2 pulg donde solo 4 mm desde la superficie están templados eso es equivalente a aproximadamente a 0.85 del radio de la barra. Así, el riesgo de fractura en la

pieza está localizado en el interior de la misma en el límite del radio crítico, tal como se presenta en la Fig. 5.26.

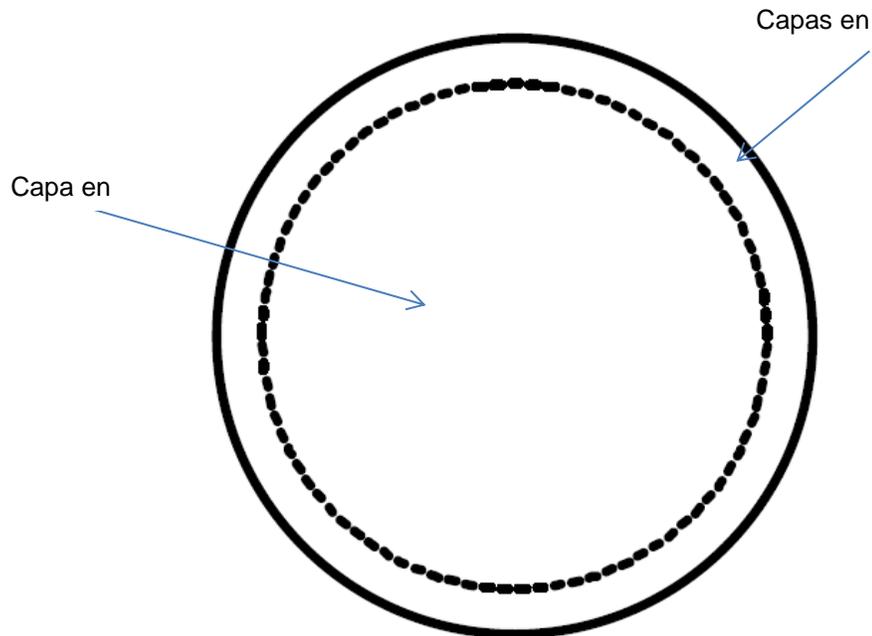


Fig. 5.26. Esquema que representa el estado de esfuerzos en la barra 2 pulg de un acero AISI 1045.

### 5.3 RESULTADO DEL ESTUDIO METALOGRAFICO.

A continuación se presentan las fotografías tomadas durante las observaciones bajo el microscopio óptico, en las muestras de acero AISI 1045. Dichas fotografías se usaran para corroborar los resultados de la simulación. Todas las muestras fueron pulidas hasta lograr un acabado tipo espejo y luego fueron atacadas con Nital. Es importante destacar que las Figs. 5.33 – 5.36 corresponden a una barra de acero AISI 1045 de 1 pulg de diámetro y las Figs. 5.37 – 5.39 corresponden otra barra de acero AISI 1045 de 2 pulg de diámetro.

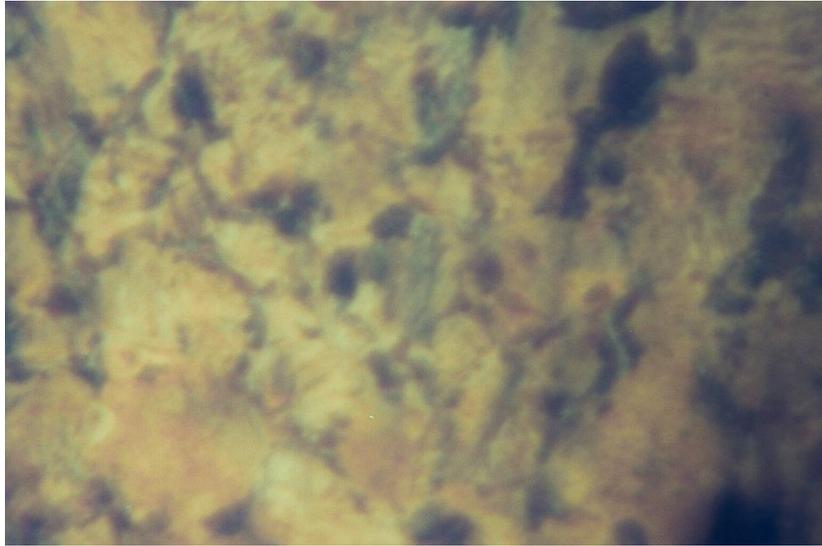


Fig. 5.27. Fotografía del centro de la muestra de la barra de ½ pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.

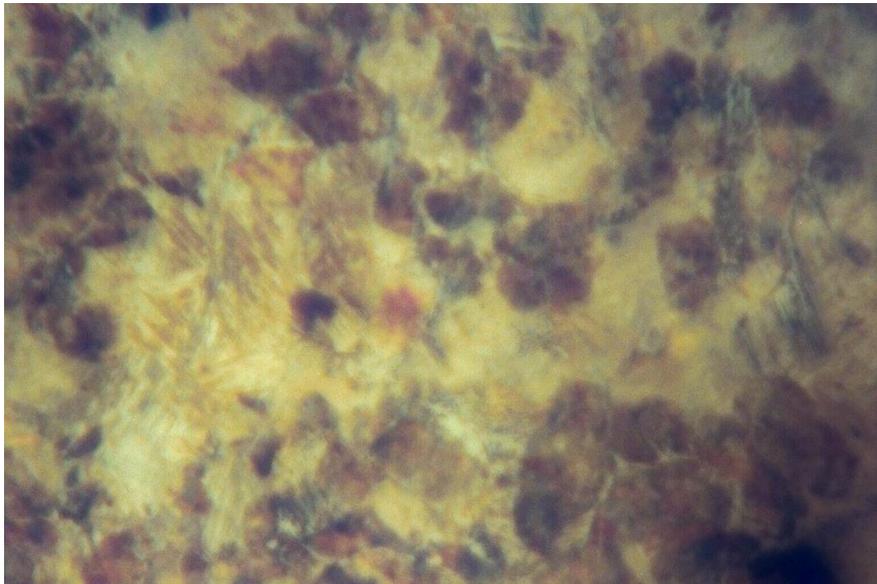


Fig. 5.28. Fotografía del centro de la muestra de la barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.

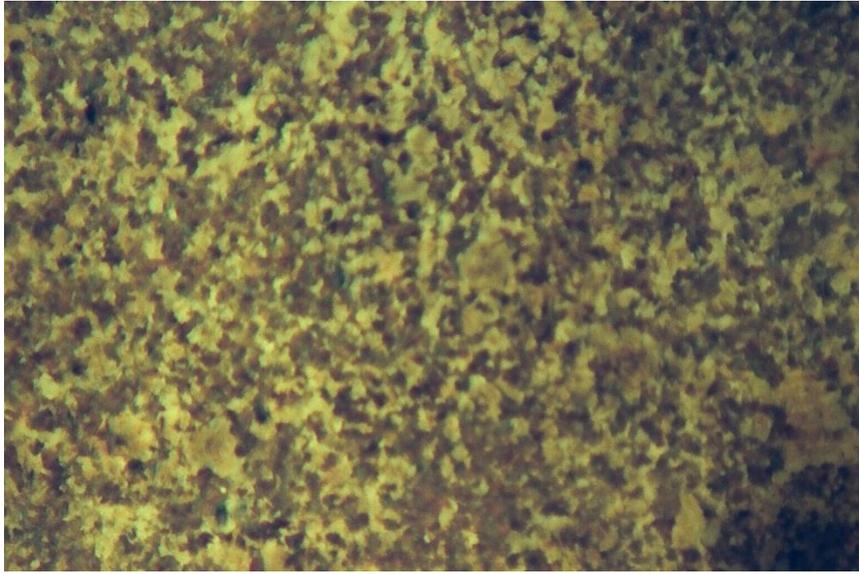


Fig. 5.29. Fotografía de muestra extraída de barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.

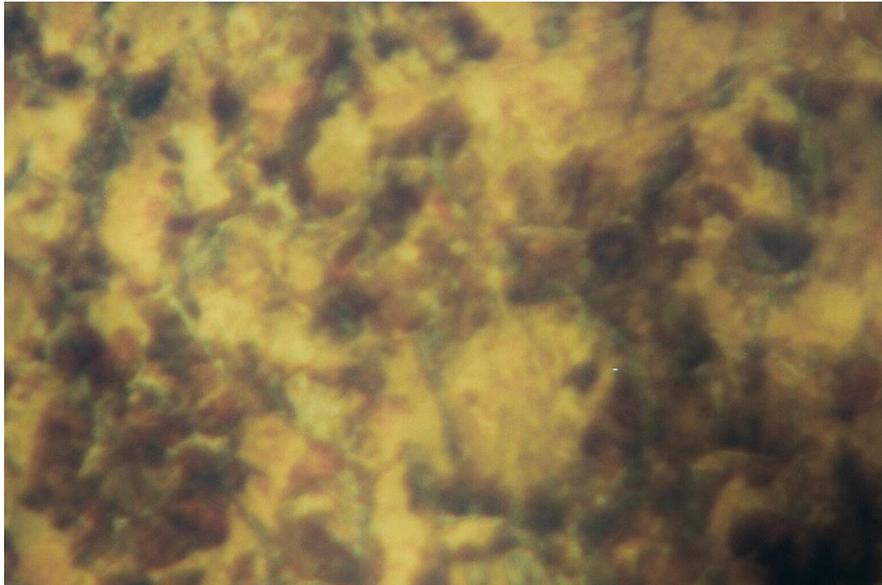


Fig. 5.30. Fotografía del centro de la barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500 x.

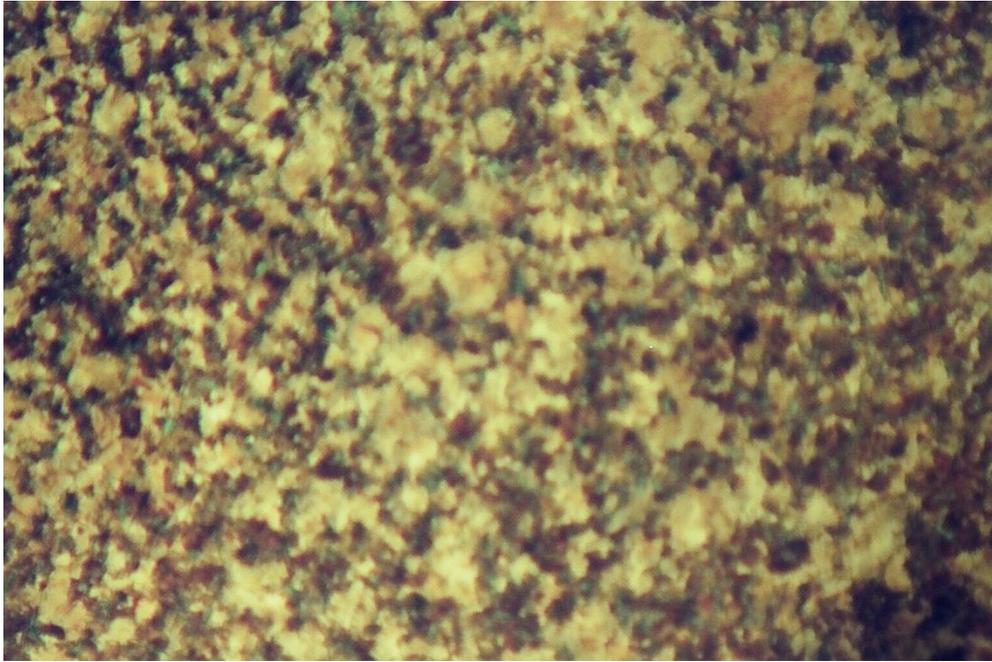


Fig. 5.31. Fotografía a un  $\frac{1}{2}$  del radio de una barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.

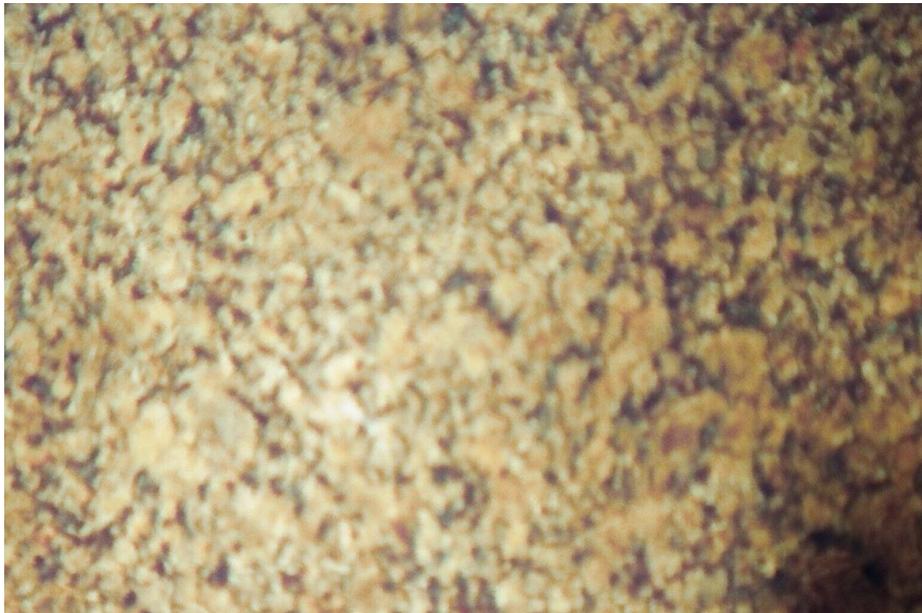


Fig. 5.32. Fotografía a un  $\frac{1}{4}$  del radio desde la superficie en una barra de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.



Fig. 5.33. Fotografía a un  $\frac{1}{4}$  del radio desde la superficie en una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.



Fig. 5.34. Fotografía a la  $\frac{1}{2}$  del radio en una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.



Fig. 5.35. Fotografía del centro de una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100 X.

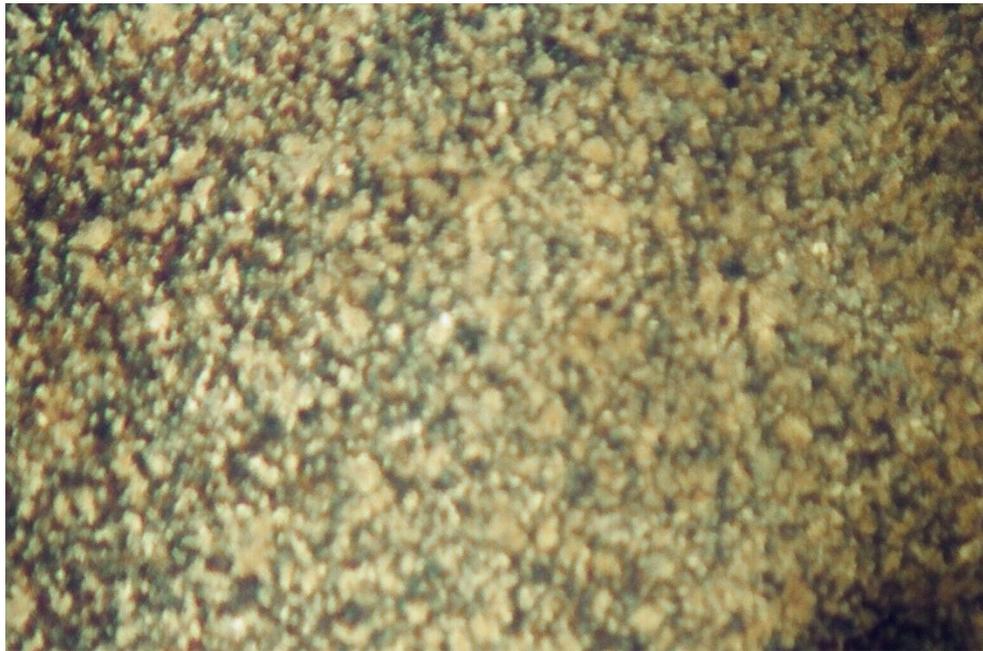


Fig. 5.36 Fotografía cercana a la superficie de una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.

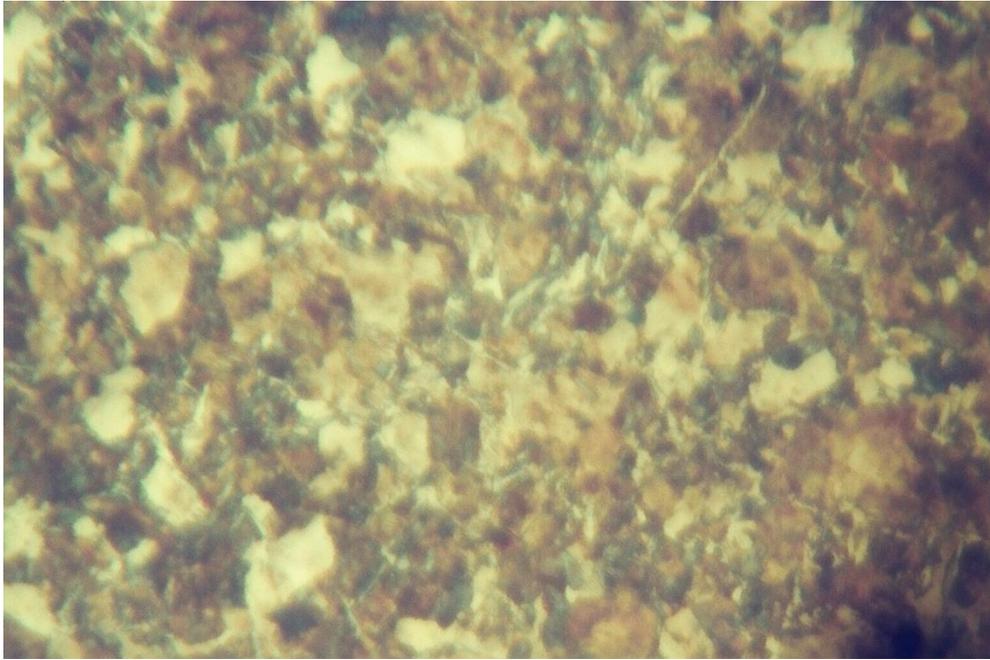


Fig. 5.37 Fotografía de la superficie una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.

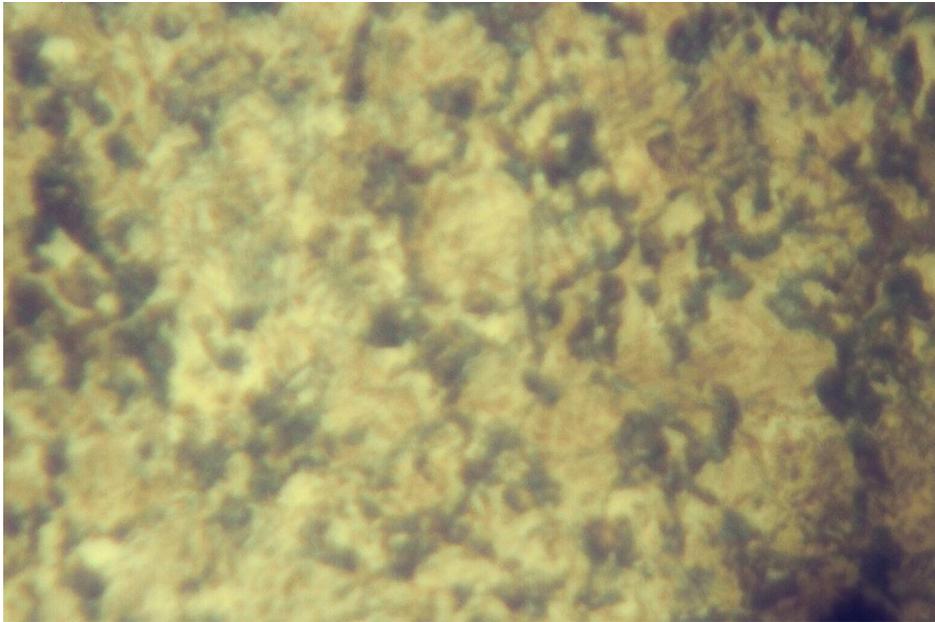


Fig. 5.38. Fotografía a un  $\frac{1}{4}$  del radio de la superficie una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 500x.

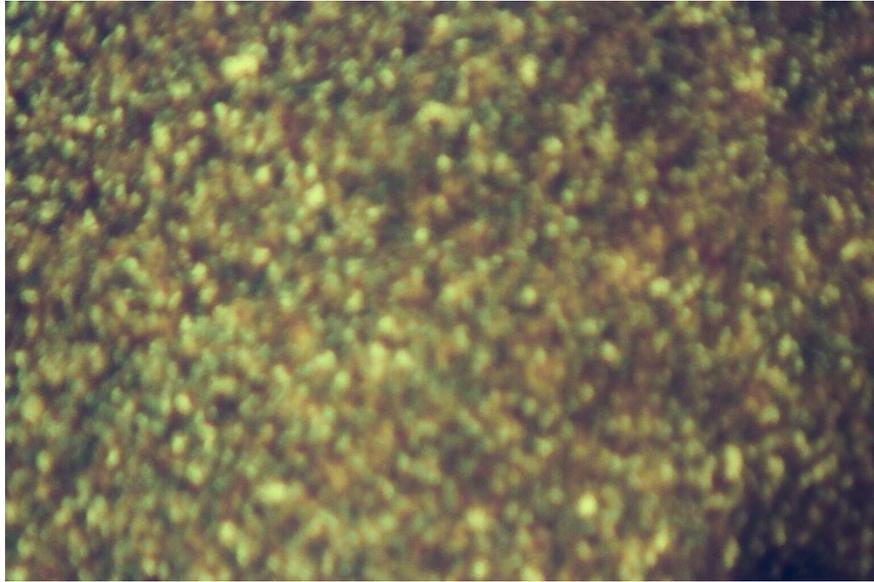


Fig. 5.39. Fotografía a un 1/8 de radio desde la superficie una barra de 2 pulg de diámetro de un acero AISI 1045, a 100x.

Las Figs. 5.40 y 5.41 corresponden a mosaicos obtenidas mediante un barrido de fotografías, en la cual se presenta el cambio de microestructura a través de la sección transversal de las muestras de 1 y 2 pulg de diámetro.



Fig. 3.40. Mosaico de la zona de transición correspondiente al radio crítico en una barra de 1 pulg de diámetro de acero AISI 1045.



Fig. 5.41. Mosaico de la zona de transición correspondiente al radio crítico en una barra de 2 pulg de diámetro de acero AISI 1045.

#### 5.4. RESUMEN DE RESULTADOS

- Se logró simular con éxito las curvas de enfriamiento para todos los diámetros de barra de acero evaluados durante esta investigación.
- Fue posible graficar sobre las curvas TTT del acero AISI 1045, corroborando la información teórica sobre las fases que se encontrarían en cada una de las muestras después del temple, pudiendo definir los porcentajes de fases presentes a lo largo de la sección transversal de las muestras.
- Las fotografías cumplieron el propósito de corroborar que las curvas de enfriamiento simuladas poseen el nivel de exactitud necesario para predecir la microestructura al ser combinadas con los diagramas TTT.
- Se hizo predicciones del estado de esfuerzos basadas en la teoría y las etapas de transformación por las que pasa un material al ser templado.

## CONCLUSIONES

- Se logró simular con éxito y con relativa confiabilidad el enfriamiento que se produce durante el temple del acero; se ha demostrado por medio de información teórica y práctica que la transformación de fases esperada para puntos seleccionados en el sección transversal de la barra corresponden a puntos que coinciden con el diagrama TTT al sobreponer las curvas de enfriamiento simuladas.
- Fue posible calcular un coeficiente de transferencia de calor definiendo el diámetro crítico para los tres calibres de barras utilizadas durante esta investigación, con la ayuda de un gráfico de durezas según el porcentaje de martensita presente después del temple, así también mediante el uso de herramientas como las curvas de Lamont; dicho coeficiente fue una aproximación validado al comparar la microestructura predicha por el diagrama TTT y al ser observada a través del microscopio en las muestras obtenidas.
- A pesar de las muchas dificultades de técnicas y de recursos bibliográficos se logró crear un modelo útil del enfriamiento de elementos durante el temple para predecir los estados de esfuerzos residuales.
- Se requiere recopilar información experimental tanto de coeficientes de transferencia de calor así como formas de medir los esfuerzos residuales para que en el futuro otros estudiantes puedan retomar este trabajo y elevar el grado de complejidad y certeza de la simulación del temple del acero.

## RECOMENDACIONES.

- Se recomienda invertir en software de simulación, como Abaqus, Comsol, Ansys, etc. ya que si bien el costo inicial de la inversión se podría considerar alto con el tiempo resultara el ahorro en la compra de materiales y la capacidad de repetir experiencias sin gastar en nuevos recursos.
- Obtener el software de simulación de procesos de tratamientos térmicos Dante, que ha sido usado por investigadores y en tesis para obtener el grado de doctor y según explica su sitio web puede simular una gran cantidad de procesos, los cuales no se puede reproducir en la realidad por falta de recursos, al mismo tiempo al largo plazo resulta en un ahorro de materiales y energía.

## REFERENCIAS

- [1] Sydney H. Avner (1988). Introducción a la metalurgia física. Mexico. Editorial McGraw Hill.
- [2] Zienkiewicz O.C y Taylor R.C (1994). El método de los elementos finitos Volumen 1. Mexico. Editorial McGraw Hill.
- [3] Raúl Coss Bú (1998). Simulación: un enfoque práctico. Mexico. Editorial Limusa.
- [4] Simulación por computadora. En Wikipedia Recuperado de [http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_computadora)
- [5] Fletcher, A. J. Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment. Inglaterra. Elsevier Scientific Publishers LTD.
- [6] Información sobre Abaqus En Wikipedia Recuperado de <http://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>
- [7] Información sobre Abaqus En Sitio Web Abaqus Recuperado de <http://www.3ds.com/products/simulia/portfolio/abaqus/overview/>
- [8] Thomas Goldsmith Toliver, Jr. (enero 9, 1910 a marzo 5, 2009) fue un pionero de la televisión estadounidense, el co-inventor del juego de arcade primero en utilizar un tubo de rayos catódicos, y un profesor de física en la Universidad de Furman.
- [9] Abaqus CAE User's Manual de sitio Web Sharnet.ca <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/books/usi/default.htm>
- [10] Abaqus User Subroutines Reference Manual de sitio Web Sharnet.ca <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/books/sub/default.htm>
- [11] Análisis de las microestructuras, distorsiones y tensiones residuales en una pieza de acero sometida a un temple por inmersión de sitio Web KBen <http://www.kbeng.com.ar/es/publicaciones.php>

- [12] Modelización de Tensiones Residuales en el Tratamiento Térmico de Aceros de Resortes de sitio web K Beng  
<http://www.kbeng.com.ar/es/publicaciones.php>
- [13] YUNUS A. ÇENGEL, Termodinámica. editorial MCGRAW-HILL, 2012. México
- [14] Klaus Jürgen Bathe. Finite Element Procedures. Prentice - Hall, 1996, Estados Unidos
- [15] Landau, H.G., J.H. Weiner, and E.E. Zwicky, Jr., "Thermal Stress in a Viscoelastic-Plastic Plate with Temperature Dependent Yield Stress," Journal of Applied Mechanics, vol. 27, pp. 297–302, 1960.
- [16] Bowang Xiao, Numerical modeling and experimental investigation for optimization in quenching processes of aluminium and Steel parts. Dissertation submitted to the Worcester Polytechnic Institute.
- [17] [www.kbeng.com.ar/.../1250860297\\_microestructuras\\_\\_distorsiones\\_y\\_t..](http://www.kbeng.com.ar/.../1250860297_microestructuras__distorsiones_y_t..)
- [18] H. S. Hasan, M. J. Peet, J. M. Jalil and H. K. D. H. Bhadeshia, Heat Transfer Coefficients during Quenching of Steels, University of Cambridge.
- [19] Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque práctico. Editorial McGrawhill. México.
- [20] P J Maroni. Templabilidad. Editorial Librería Mitre. 1967. Argentina.
- [21] <http://www.matweb.com/AISIrch/DataSheet.aspx?MatGUID=cbe4fd0a73cf4690853935f52d910784&ckck=1>
- [21] Saleem Hashmi. Comprehensive Materials Processing. Elsevier. 2014. Estados Unidos