

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DETERMINACION DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ENFRIAMIENTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS DE MEDIO CARBONO (AISI 1045 Y AISI 1070) DURANTE EL TRATAMIENTO TÉRMICO.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

GUACHAMÍN GUAMÁN ÁNGEL FABIÁN
Afabian_20@hotmail.com

VARGAS VARGAS HERMEL VICENTE
Ermel3087@hotmail.com

DIRECTOR: ING. RODRIGO RUIZ
Rodrigo.ruiz@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, Hermel Vicente Vargas Vargas y Ángel Fabián Guachamín Guamán declaramos bajo juramento que el presente proyecto de titulación escrito es de nuestra autoría, que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento

A través del presente documento cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a éste trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Hermel Vicente Vargas Vargas

Ángel Fabián Guachamín Guamán

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto de titulación fue desarrollado por los señores Ángel Fabián Guachamín Guamán y Hermel Vicente Vargas Vargas, bajo mi supervisión.

Ing. Rodrigo Ruiz Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradezco a Dios por permitirnos terminar el presente proyecto de titulación para lo obtención del título de ingeniería. A mi querida madre y a mi Tío Isidro mil gracias.

A todas las personas que han contribuido con sus conocimientos para que nosotros avancemos con el proyecto, es un honor mencionarlos: Personal de máquinas herramientas, personal del laboratorio de materiales, colaboradores y a nuestro director de tesis.

Hermel

Primeramente agradezco a Dios por llenar mi vida de dicha y bendiciones. A mis padres Hermenegildo (□) y Carmen por brindarme todo el apoyo incondicional que comparten junto a mí, mis ideales, mis triunfos y fracasos, y todo el esfuerzo y sacrificio que realizaron para darme la dicha de estudiar. A mi hermano Kleber por su apoyo incondicional. A mi abuelita por tenerme siempre presente en sus oraciones, en su mente y en su corazón. A mi esposa Anita y mi hija Valery gracias por todo su amor, paciencia y comprensión, por ser mi luz cuando no puedo ver, porque con su compañía las cosas malas se convierten en buenas, las tristezas se transforman en alegrías y la soledad no existe. A la Escuela Politécnica Nacional por abrirme las puertas del conocimiento y especialmente a mis maestros Ing. Rodrigo Ruiz e Ing. Patricio Estupiñan de la gloriosa Facultad de Ingeniería Mecánica por su apoyo en la acertada dirección del presente proyecto. A todos mis familiares, amigos y compañeros por su confianza y lealtad.

Gracias a todos que “Dios Les Bendiga”.

Ángel Fabián

DEDICATORIA

A mi querida madre a mis abuelos, que se han esforzado tanto por mí y que sin ellos no habría podido alcanzar éste objetivo.

Hermel Vargas

A la memoria de mi añorado padre Hermenegildo (□), a mi madre Carmen, a mi hermano Kleber y de manera muy especial dedico este esfuerzo a las personas que mas adoro, admiro y respeto en este mundo a quienes lograron cambiar mi vida a mi esposa Anita y mi hija Valery.

Ángel Fabián

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS.....	XI
INDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE ANEXOS	XVIII
RESUMEN.....	XIX
PRESENTACION.....	XX
CAPITULO 1. ESTUDIO DE LOS ACEROS AL CARBONO	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ESTRUCTURA DEL ACERO.....	1
1.3. ESTADOS ALOTRÓPICOS DEL HIERRO.....	2
1.4. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE LAS ALEACIONES HIERRO CARBONO.....	5
1.4.1. EL SISTEMA METAESTABLE FE- FE_3C	8
1.4.2. DEFINICION DE ESTRUCTURAS	10
1.4.3. HOMOGENEIDAD DE LA AUSTENITA.....	12
1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.....	13
1.5.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS SEGÚN EL PROCESO DE FABRICACIÓN	13
1.5.2. CLASIFICACION DE LOS ACEROS SEGÚN EL USO	13
1.5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS SEGÚN SU COMPOSICIÓN....	14
1.5.3.1. Aceros al carbono.....	14
1.5.3.2. Aceros Aleados	17
1.5.3.2.1. Definición.....	17
1.5.3.2.2. Clasificación	17
1.6. ELEMENTOS DE ALEACIÓN.....	18
1.7. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN ESTADO DE SUMINISTRO	22
1.7.1. SELECCIÓN DE LOS ACEROS PARA EL ESTUDIO	22

1.7.2.	CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 1045.....	22
1.7.2.1.	Generalidades	22
1.7.2.2.	Composición química	23
1.7.2.3.	Propiedades mecánicas	23
1.7.2.4.	Tratamiento térmico.....	23
1.7.2.5.	Aplicaciones	23
1.7.3.	CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 1070.....	24
1.7.3.1.	Generalidades	24
1.7.3.2.	Composición química	25
1.7.3.3.	Usos típicos:.....	25
1.7.3.4.	Aplicaciones	25
1.7.3.5.	Características que debe cumplir el alambón de alto carbono.	26
CAPITULO 2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....		27
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	27
2.2.	TEORÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS	27
2.2.1.	DEFINICIÓN	27
2.2.1.1.	Calentamiento hasta la temperatura fijada.....	28
2.2.1.2.	Permanencia a la temperatura fijada.....	29
2.2.1.3.	Enfriamiento desde la temperatura fijada según el proceso.....	32
2.3.	DIAGRAMA TTT	32
2.3.1.	TIPOS DE DIAGRAMA TTT	35
2.3.1.1.	Diagrama isotérmico TTT	36
2.3.1.2.	Diagrama de enfriamiento continuo TTT	36
2.3.2.	ZONAS DEL DIAGRAMA TTT	38
2.3.2.1.	Zona Perlítica.	39
2.3.2.2.	Zona Bainítica.....	39
2.3.2.3.	Zona Martensítica.....	39
2.4.	AUSTENIZACIÓN.....	40

2.5.	TECNOLOGÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS	41
2.5.1.	RECOCIDO	41
2.5.1.1.	Recocido isotérmico	41
2.5.1.2.	Recocido Incompleto	42
2.5.1.3.	Recocido de Recristalización.....	42
2.5.1.4.	Recocido de Alivio de tensiones.....	43
2.5.1.5.	Recocido de homogeneización.....	43
2.5.1.6.	Recocido de Esferoidización	43
2.5.2.	NORMALIZADO.....	43
2.5.2.1.	Normalizado de aceros al carbono.....	44
2.5.2.2.	Normalizado de aceros aleados	45
2.5.3.	AUSTEMPERING	45
2.5.4.	MARTEMPERING.....	47
2.5.5.	TEMPLE	48
2.5.5.1.	Objetivos del temple	49
2.5.5.2.	Factores del temple	49
2.5.5.3.	Fases del temple	49
2.5.5.4.	Velocidad de enfriamiento durante el temple	49
2.5.6.	REVENIDO	51

CAPITULO 3. PREPARACIÓN DE PROBETAS, SELECCIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO Y EQUIPO A UTILIZARSE..... 53

3.1.	PREPARACIÓN DE PROBETAS	53
3.1.1.	PREPARACIÓN DE PROBETAS METALGRÁFICAS	53
3.1.1.1.	Equipo para la preparación de probetas metalográficas.	55
3.1.2.	PREPARACIÓN DE PROBETAS DE TRACCIÓN.....	56
3.1.2.1.	Preparación de probetas de tracción del acero AISI 1045	56
3.1.2.1.1.	Equipos para la realización de las probetas de tracción AISI 1045.....	59
3.1.2.2.	Preparación de probetas de tracción del acero AISI 1070	60

3.1.3.	PREPARACIÓN DE PROBETAS CHARPY	60
3.1.3.1.	Procedimiento para la preparación de las probetas charpy del acero AISI 1045.....	61
3.1.3.2.	Equipos para la preparación de probetas charpy	63
3.2.	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN ESTADO DE SUMINISTRO (PROBETA TESTIGO).....	64
3.2.1.	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO AISI.....	64
3.2.1.1.	Composición Química del acero AISI 1045	65
3.2.1.2.	Propiedades mecánicas del acero AISI 1045.....	65
3.2.1.3.	Metalografía del acero AISI 1045	66
3.2.2.	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO AISI 1070.....	68
3.2.2.1.	Composición Química del acero AISI 1070	68
3.2.2.2.	Propiedades mecánicas del acero AISI 1070.....	69
3.2.2.3.	Metalografía del acero AISI 1070	69
3.3.	CODIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.....	71
3.4.	SELECCIÓN DEL RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO A UTILIZARSE EN CADA PROBETA.....	71
3.4.1.	RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI 1045.....	71
3.4.2.	RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI 1070.....	72
3.5.	EQUIPOS UTILIZADOS PARA CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DURANTE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS	73

CAPITULO 4. ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS LUEGO DEL TRATEMIENTO TÉRMICO..... 78

4.1.	ENSAYO DE DUREZA	78
4.1.1.	EQUIPO PARA ENSAYO DE DUREZA.....	78
4.1.2.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE DUREZA	79

4.1.3.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA DEL ACERO AISI 1045 Y AISI 1070.....	80
4.2.	ENSAYO CHARPY	80
4.2.1.	EQUIPO PARA EL ENSAYO CHARPY	81
4.2.2.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE IMPACTO.....	81
4.2.3.	RESULTADO DEL ENSAYO CHARPY DEL ACERO AISI 1045.....	82
4.3.	ENSAYO DE TRACCIÓN	82
4.3.1.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AISI 1045	82
4.3.2.	EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AISI 1045.....	83
4.3.3.	EQUIPOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AISI 1070.....	83
4.3.4.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA EL ACERO AISI 1070	84
4.3.5.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DE LOS ACEROS AISI 1045 Y AISI 1070.....	85
4.4.	ANÁLISIS METALGRÁFICO.....	86
CAPITULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		108
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	108
5.2.	Resultados obtenidos del ensayo metalográfico de las probetas de Acero AISI 1045 tratadas térmicamente.	110
5.2.1.1.	Resultados obtenidos del ensayo metalográfico del Acero AISI 1070.....	114
5.3.	DIAGRAMA TTT RELACIONANDO TEMPERATURA DE ENFRIAMIENTO, TIEMPO DE TRANSFORMACIÓN ISOTERMICA DE LA AUSTENITA.	118
5.4.	EFFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE ENFRIAMIENTO EN LAS PROPIEDADES DE LOS ACEROS TRATADOS TÉRMICAMENTE.....	121

5.4.1.	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE DUREZA	121
5.4.1.1.	Analizando los resultados del ensayo de dureza del acero AISI 1045 se obtiene que:	121
5.4.1.2.	Analizando los resultados del ensayo de dureza del acero AISI 1070 se obtiene que:	123
5.4.2.	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO CHARPY	124
5.4.3.	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN	125
5.4.3.1.	Analizando los resultados del ensayo de tracción del acero AISI 1045 se obtiene que:	126
5.4.3.2.	Analizando los resultados del ensayo de tracción del acero AISI 1070 se obtiene que:	127
5.4.4.	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL ACERO AISI 1045	128
5.4.5.	COMPRACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL ACERO AISI 1070	128
5.5.	DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN EN LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN	129
5.5.1.	DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL ACERO AISI 1045	129
5.5.2.	DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL ACERO AISI 1070	139
5.6.	ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE FASE EN CADA TRATAMIENTO TÉRMICO	145
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		147
CONCLUSIONES		147
RECOMENDACIONES		149
BIBLIOGRAFÍA		150

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características y propiedades de los diferentes estados alotrópicos del hierro.....	5
Tabla 1.2. Clasificación de los aceros según el proceso de fabricación.....	13
Tabla 1.3. Efectos específicos de los elementos de aleación en el acero.....	19
Tabla 1.4. Composición química del acero AISI 1045.....	23
Tabla 1.5 Composición química del acero AISI 1070.....	25
Tabla 2.1. Temperaturas típicas de normalización para aceros al carbono	44
Tabla 2.2. Temperaturas típicas de normalización para aceros aleados ³⁰	45
Tabla 3.1. Especificaciones técnicas de la desbastadora de Disco.	55
Tabla 3.2. Especificaciones técnicas del banco de pulido.....	55
Tabla 3.3. Especificaciones técnicas de la pulidora de paño.	56
Tabla 3.4. Hoja de procesos de probeta de tracción AISI 1045.	58
Tabla 3.5. Hoja de procesos de probetas charpy AISI 1045	62
Tabla 3.6. Composición química del acero AISI1045 según la norma ASTM A 108.	65
Tabla 3.7. Composición química del acero AISI 1045 utilizado.....	65
Tabla 3.8. Ensayo de Dureza	65
Tabla 3.9. Ensayo charpy.....	66
Tabla 3.10. Ensayo de tracción	66
Tabla 3.11. Composición química del acero AISI 1070 según estándares de calidad.	68
Tabla 3.12. Composición química del acero AISI 1070.....	68
Tabla 3.13. Ensayo de Dureza	69
Tabla 3.14. Ensayo de tracción	69
Tabla 3.15. Codificación de las probetas para el estudio.	71

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas del Durómetro.	79
Tabla 4.2. Ensayo de dureza Acero AISI 1045.....	80
Tabla 4.3. Ensayo de dureza Acero AISI 1070.....	80
Tabla 4.4. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos de impacto.	81
Tabla 4.5. Ensayo charpy del Acero AISI 1045.....	82
Tabla 4.6. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos mecánicos.....	83
Tabla 4.7. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos mecánicos.....	84
Tabla 4.8. Ensayo de tracción del acero AISI 1045.....	85
Tabla4.9. Ensayo de tracción del acero AISI 1070.....	85
Tabla 5. 1. Resumen del análisis metalográfico para el acero AISI 1045.....	111
Tabla 5. 2. Resumen del análisis metalográfico para el acero AISI 1070.	115
Tabla 5. 3. Resumen de las propiedades del acero AISI1045.....	138
Tabla 5. 4. Resumen de las propiedades del acero AISI 1070.	144

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Estructura BCC del hierro alfa.....	3
Figura 1. 2 Estructura BCC del hierro alfa no magnético	3
Figura 1. 3 Estructura FCC del hierro alfa no magnético	4
Figura 1. 4 Estructura BCC del hierro alfa no magnético	4
Figura 1. 5 Diagrama de equilibrio de las aleaciones Hierro-Carbono estable y metaestable superpuestas.....	7
Figura 1. 6 Diagrama de equilibrio de las aleaciones Hierro-Carbono	8
Figura 1. 7 Microestructura.....	11
Figura 1. 8 Acero AISI 1045 en estado de suministro	22
Figura 1. 9 Acero AISI 1070 en estado de suministro	24
Figura 2.1 Tiempo necesario para alcanzar en una pequeña pieza de un acero al carbono eutectoide (C-0.90% gama) diversos grados de austenización.....	31
Figura 2. 2 Duración total del calentamiento de las piezas de acero en los hornos de sales	32
Figura 2. 3. Partes del diagrama TTT.....	33
Figura 2. 4 Diagrama de un Acero a) Hipoeutectoide y b) Hipereutectoide.	34
Figura 2. 5. Diagrama de enfriamiento continuo para un acero al carbono eutectoide, con indicación de las microestructuras obtenidas a diferentes velocidades de enfriamiento.....	37
Figura 2. 6 Zonas del diagrama TTT	38
Figura 2. 7 Ciclos de calentamiento y enfriamiento de los diferentes tratamientos térmicos entre ellos el normalizado.....	44
Figura 2. 8 Representación esquemática del Austempering en el diagrama TTT	46
Figura 2. 9 Representaciones esquemáticas del Martempering.....	47
Figura 3. 1 Dimensiones de la probeta de tracción del acero AISI 1045.....	57
Figura 3. 2 Sierra mecánica	59
Figura 3. 3 Torno Nossoti	59

Figura 3. 4 Dimensiones de la probeta de tracción del acero AISI 1070.....	60
Figura 3. 5 Dimensiones de la probeta Charpy según la norma INEN 130 (1973-03).....	61
Figura 3. 6 Limadora.....	63
Figura 3. 7 Rectificadora.....	64
Figura 3. 8 Acero AISI 1045. Probeta en condiciones de suministro. Inclusiones 100X.....	66
Figura 3.9 Acero AISI 1045. Probeta en condiciones de suministro. 100X.....	67
Figura 3.10 Acero AISI 1045. Probeta en condiciones de suministro. 500X.....	67
Figura 3.11 Acero AISI 1070. Probeta en condiciones de suministro. Inclusiones. 100X.....	69
Figura 3.12 Acero AISI 1070. Probeta en condiciones de suministro. 100X.....	70
Figura 3.13 Acero AISI 1070. Probeta en condiciones de suministro. 500X.....	70
Figura 3.14 Etapa de calentamiento y tiempo de permanencia del acero AISI 1045.....	72
Figura 3.15 Etapa de calentamiento y tiempo de permanencia del acero 1070...	73
Figura 3.16 Horno N°1 para Pre calentamiento.....	73
Figura 3.17 Horno N°3 para calentamiento hasta temperatura de austenización	74
Figura 3. 18 Horno N°7 para enfriamiento isotérmico a 600 °C.	74
Figura 3. 19 Horno N°5 para enfriamiento isotérmico a 500°.....	75
Figura 3. 20 Horno N°5 para enfriamiento isotérmico a 380°C.	75
Figura 3. 21 Horno N°2 para enfriamiento isotérmico a 200°C.	76
Figura 3. 22 Contenedor N°1 para enfriamiento en agua.....	76
Figura 3. 23 Contenedor N°2 para enfriamiento en aceite.....	77
Figura 4.1 Ensayos de Dureza Rockwell y Brinell.....	78
Figura 4.2 Acero AISI 1045, probeta 1.1 enfriada a 600° C. Inclusiones 100X.....	86
Figura 4.3 Acero AISI 1045, probeta 1.1 enfriada a 600° C. 100X.....	87
Figura 4.4 Acero AISI 1045, probeta 1.1 enfriada a 600° C. 500X.....	87
Figura 4.5 Acero AISI 1045, probeta 1.2 enfriada a 500° C. Inclusiones. 100X ..	88

Figura 4.6 Acero AISI 1045, probeta 1.2 enfriada a 500° C. 100X.....	88
Figura 4.7 Acero AISI 1045, probeta 1.2 enfriada a 500° C. 500X	89
Figura 4.8 Acero AISI 1045, probeta 1.3 enfriada a 380° C. Inclusiones 100X	89
Figura 4.9 Acero AISI 1045, probeta 1.3 enfriada a 380° C. 100X	90
Figura 4.10 Acero AISI 1045, probeta 1.3 enfriada a 380° C. 500X	90
Figura 4.11 Acero AISI 1045, probeta 1.4 enfriada 200° C. Inclusiones 100X...91	
Figura 4.12 Acero AISI 1045, probeta 1.4 enfriada 200° C. 100X.....	991
Figura 4.13 Acero AISI 1045, probeta 1.4 enfriada 200° C 500X.....	92
Figura 4.14 Acero AISI 1045, probeta 1.5 enfriada en ACEITE. Inclusiones 100X.....	92
Figura 4.15 Acero AISI 1045, probeta 1.5 enfriada en ACEITE. 100X.....	93
Figura 4.16 Acero AISI 1045, probeta 1.5 enfriada en ACEITE. 500X.....	93
Figura 4.17 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfriada en AGUA. Inclusiones 100X	94
Figura 4.18 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfriada en AGUA. 100X.....	94
Figura 4.19 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfriada en AGUA 1000X.....	995
Figura 4.20 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfriada en AGUA. 1000X.....	95
Figura 4.21 Acero AISI 1045, probeta 1.7 enfriada en AIRE. Inclusiones 100X ...96	
Figura 4.22 Acero AISI 1045, probeta 1.7 enfriada en AIRE. 100X.....	96
Figura 4.23 Acero AISI 1045, probeta 1.7 enfriada en AIRE. 500X.....	97
Figura 4.24 Acero AISI 1070, probeta 2.1 enfriada a 600° C. Inclusiones.....	97
Figura 4.25 Acero AISI 1070, probeta 2.1 enfriada a 600° C.....	98
Figura 4. 26 Acero AISI 1070, probeta 2.1 enfriada a 600° C. 500X.....	98
Figura 4.27 Acero AISI 1070, probeta 2.2 enfriada a 500° C. Inclusiones 100X..99	
Figura 4.28 Acero AISI 1070, probeta 2.2 enfriada a 500° C. 100X.....	99
Figura 4.29 Acero AISI 1070, probeta 2.2 enfriada a 500° C. 500X.....	100
Figura 4.30 Acero AISI 1070, probeta 2.3 enfriada 380°C. Inclusiones 100X.....	100
Figura 4.31 Acero AISI 1070, probeta 2.3 enfriada 380°. 100X.....	101
Figura 4.32 Acero AISI 1070, probeta 2.3 enfriada 380°. 500X.....	101
Figura 4.33 Acero AISI 1070, probeta 2.4, enfriada a 200° C Inclusiones 100X	102

Figura 4.34 Acero AISI 1070, probeta 2.4, enfriada a 200° C. 100X.....	102
Figura 4.35 Acero AISI 1070, probeta 2.4, enfriada a 200° C. 500X	103
Figura 4.36 Acero AISI 1070, probeta 2.5 enfriada en ACEITE. Inclusiones 100X	103
Figura 4.37 Acero AISI 1070, probeta 2.5 enfriada en ACEITE. 100X.....	104
Figura 4.38 Acero AISI 1070, probeta 2.5 enfriada en ACEITE. 500x.....	104
Figura 4.39 Acero AISI 1070, probeta 2.6 enfriada en AGUA. Inclusiones 100X	105
Figura 4.40 Acero AISI 1070, probeta 2.6 enfriada en AGUA. 100X.....	105
Figura 4.41 Acero AISI 1070, probeta 2.6 enfriada en AGUA. 500X.....	106
Figura 4.42 Acero AISI 1070 probeta 2.7 enfriada en AIRE Inclusiones 100X...	106
Figura 4.43 Acero AISI 1070 probeta 2.7 enfriada en AIRE. 100X.....	107
Figura 4.44 Acero AISI 1070 probeta 2.7 enfriada en AIRE. 500X.....	107
Figura 5.1 Diagrama Fe-C con resultados que se deberían alcanzar al utilizar determinados regímenes de tratamiento térmico.....	109
Figura 5. 2 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1045	119
Figura 5. 3 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1070.	120
Figura 5.4 Dureza vs temperatura de enfriamiento AISI 1045	121
Figura 5. 5 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1045 con la escala de durezas.....	122
Figura 5.6 Dureza vs temperatura de enfriamiento AISI 1070.	123
Figura 5. 7 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1070 con la escala de durezas.....	124
Figura 5. 8 Tenacidad vs T°enfriamiento para el ac ero AISI 1045.	125
Figura 5.9 Resistencia a la tracción vs Temperatura de enfriamiento.....	126
Figura 5.10 Resistencia a la tracción vs Temperatura de enfriamiento.....	127
Figura 5.11 Comparación de Propiedades Mecánicas en el Acero AISI 1045 ...	128

Figura 5.12 Dureza vs T°enfriamiento para el acero AISI 1070	129
Figura 5.13 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.0 del acero AISI 1045.....	130
Figura 5.14 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.1 del acero AISI 1045.....	131
Figura 5.15 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.2 del acero AISI 1045.....	132
Figura 5.16 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.3 del acero AISI 1045.....	133
Figura 5.17 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.4 del acero AISI 1045.....	134
Figura 5.18 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.5 del acero AISI 1045.....	135
Figura 5.19 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.6 del acero AISI 1045.....	136
Figura 5.20 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.7 del acero AISI 1045.....	137
Figura 5. 21 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.0 del acero AISI 1070.....	139
Figura 5.22 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.1 del acero AISI 1070.....	140
Figura 5. 23 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.2 del acero AISI 1070.....	141
Figura 5. 24 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.3 del acero AISI 1070.....	142
Figura 5. 25 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.7 del acero AISI 1070.....	143
Figura 5. 26 Análisis de fase del tratamiento térmico en el acero AISI 1045	145
Figura 5.27 Análisis de fase del tratamiento térmico en el acero AISI 1070.	146

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Catálogo de aceros de Ivan Bohman C.A. (AISI 1045).....	151
ANEXO B: Certificado de calidad de Acindar para el acero AISI 1070.....	153
ANEXO C: Norma INEN 109 para el ensayo de tracción del acero.....	155
ANEXO D: Norma INEN 127 para el ensayo de tracción de alambre de acero..	165
ANEXO E: Norma INEN para el ensayo Charpy.....	172
ANEXO F: Composición química del acero AISI 1045 (proporcionado por la empresa Fundireciclar).....	182
ANEXO G: Estándares de calidad de aceros AISI 1045 y AISI 1070.....	184
ANEXO H: Tabla de comparación entre durezas y resistencia a la tracción (Fuente Boehler).....	187
ANEXO I: Informe técnico del laboratorio de ensayos destructivos.....	189

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo analizar el efecto de la temperatura de enfriamiento en las propiedades mecánicas de los aceros AISI 1045 y AISI 1070, para luego cuantificar dichos resultados mediante ensayos mecánicos realizados a diferentes probetas tratadas térmicamente.

Actualmente no existe un estudio que compare los diagramas temperatura-tiempo-transformación con los resultados prácticos, por ello el interés de demostrar el diagrama usando diferentes temperaturas de enfriamiento para dichos aceros que son de gran demanda en el mercado.

Se trata de un estudio que combina varios conceptos de ingeniería de materiales muy importantes para un ingeniero mecánico y que se enfatiza en los procesos de tratamientos térmicos, un sector tecnológicamente muy usado en la industria metal-mecánica del país.

El principal beneficiado del presente estudio será el sector metal-mecánico pues se busca comprobar cómo dos aceros de medio carbono son susceptibles de tratamiento térmico, es decir mejorar las propiedades mecánicas de dichos aceros de acuerdo a una temperatura de enfriamiento según el diagrama-temperatura-tiempo transformación.

Por lo expuesto el presente estudio busca obtener resultados comparables a los expuestos en la teoría, utilizando los medios que posee la universidad así como varios de sus laboratorios.

PRESENTACIÓN

El presente estudio muestra detalladamente el efecto de la temperatura de enfriamiento sobre las propiedades mecánicas de los aceros AISI 1045 Y AISI 1070 durante diferentes temperaturas de enfriamiento, con distintas probetas fabricadas según la norma INEN 109 (1973-11) y INEN 130 (1976-03) para el acero AISI 1045 mientras que para el acero AISI1070 se utilizó norma INEN 127 (1975-07).

El efecto sobre las propiedades mecánicas ha sido analizado mediante ensayos de dureza, tracción y charpy aplicados a las probetas tratadas térmicamente según la temperatura de enfriamiento.

Para disponer de un estudio completo se realiza un análisis metalográfico que muestra las diferentes microestructuras debido a la transformación que se produce a diferentes temperaturas de enfriamiento y que han sido relacionadas con los resultados de los ensayos mecánicos.

En el primer capítulo se realiza un estudio teórico de los aceros al carbono y de las propiedades de los aceros utilizados en éste trabajo en su estado de suministro.

En el segundo capítulo se detalla la teoría de los diferentes tratamientos térmicos de los aceros y sus características generales para la obtención de propiedades mecánicas deseadas según el diagrama tiempo-temperatura-transformación (TTT) respectivo para cada acero.

En el tercer capítulo se describe el proceso tecnológico con el cual se construyen las diferentes probetas: para metalografía, para ensayos de tracción y charpy. Para la realización de los diferentes tratamientos térmicos, se seleccionan los diferentes regímenes de tratamientos térmicos a llevarse a cabo y los equipos a utilizarse.

En el capítulo cuarto se tabulan los datos obtenidos en los ensayos mecánicos de dureza, tracción y charpy que han sido realizados a las probetas tratadas

térmicamente, además se realiza el análisis de las microestructuras obtenidas en las transformaciones del material según las temperaturas de enfriamiento.

En el quinto capítulo se presenta el análisis de resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de dureza, tracción y charpy, además se compara las microestructuras encontradas en las probetas metalográficas con los resultados teóricos esperados. También se presenta el diagrama temperatura – tiempo-transformación (TTT) donde se muestran las curvas de enfriamiento prácticas aproximadas de acuerdo a las estructuras de fase encontradas así como la escala de durezas.

En el sexto capítulo se concluye el presente estudio mencionando las conclusiones y recomendaciones que evidenció el análisis de los aceros tratados térmicamente.

CAPITULO 1

ESTUDIO DE LOS ACEROS AL CARBONO

1.1. INTRODUCCIÓN

El acero es hoy en día uno de los materiales más usados en ingeniería, éste engloba un vasto grupo de materiales que en muchos casos tienen aplicaciones específicas y en general tienen en el tratamiento térmico una etapa imprescindible para su utilización.

Se denomina acero a la aleación formada principalmente de Fe y C en proporciones que oscilan entre (0.008%-2.11% en peso).

Se suele componer de otros elementos ya inmersos en el material del que se obtiene pero se le puede añadir otros elementos para mejorar sus características tanto mecánicas como químicas entre ellas la dureza, maleabilidad, resistencia y otras propiedades.

1.2. ESTRUCTURA DEL ACERO¹

Las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de la cantidad de carbono y de su distribución en el hierro. Antes del tratamiento térmico, la mayor parte de los aceros son una mezcla de tres fases ferrita, perlita, y cementita. La ferrita, blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución. La

¹ <http://www.monografias.com/trabajos45/hierro-y-acero/hierro-acero2.shtml>.

cementita un compuesto químico de hierro con 6.67% de carbono aproximadamente es de gran dureza y más quebradizo. La perlita es una mezcla mecánica eutectoide de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura característica, y sus propiedades físicas son intermedias entre las de sus dos componentes. La resistencia y la dureza de un acero que no ha sido tratado térmicamente dependen de las proporciones de estas tres fases. Cuando mayor es el contenido de carbono de un acero menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita. Cuando el acero tiene un 0.8% de carbono, está por completo compuesto de perlita. Al elevarse la temperatura del acero, la ferrita y la perlita se transforman en una forma alotrópica de aleación de hierro y carbono conocida como austenita, que tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal. Si el acero se enfría despacio, la austenita vuelve a convertirse en ferrita y perlita, pero si el enfriamiento es rápido la austenita se convierte en martensita, una modificación alotrópica de gran dureza similar a la ferrita pero con carbono en solución sólida.

1.3. ESTADOS ALOTRÓPICOS DEL HIERRO

Para comprender los mecanismos por los cuales se rigen los tratamientos térmicos es necesario conocer previamente las transformaciones estructurales que sufre el hierro cuando cambia su temperatura.

Cuando se calienta el hierro desde la temperatura ambiente hasta su estado líquido, sufre una serie de transformaciones en su estructura cristalina. A las diferentes estructuras que aparecen cuando se produce este calentamiento se las denomina estados alotrópicos.

Hierro alfa

El hierro alfa se presenta a temperaturas inferiores a los 911°C. Presenta una cristalización según el sistema cúbico centrado en el cuerpo. No disuelve el carbono y tiene carácter magnético. A los 768°C pierde el magnetismo. Mientras dura esta transformación la temperatura permanece constante. Las temperaturas a las cuales tienen lugar estas transformaciones se denominan puntos críticos y

son representados mediante la letra A. Cuando se trata de un enfriamiento Ar, y si es un calentamiento Ac. La capacidad que posee el hierro alfa para formar soluciones sólidas es muy débil porque los espacios interatómicos disponibles son muy pequeños. La máxima cantidad de carbono que pueden disolver es de 0,025 % a 723°C. Este estado recibe el nombre de ferrita.

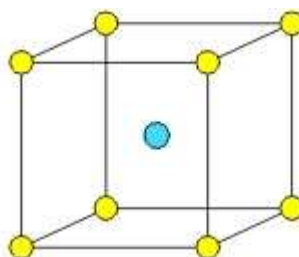


Figura 1. 1 Estructura BCC del hierro alfa²

Hierro alfa no magnético.

En los procesos de calentamiento y enfriamiento del hierro puro desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de austenización se puede observar que hay una zona comprendida entre 790°C y 910°C en el calentamiento y 898°C a 750°C en el enfriamiento en el que el hierro pierde sus propiedades magnéticas. El hierro alfa magnético y el hierro alfa no magnético cristalizan en la misma forma y su aptitud de disolución del carbono también es casi idéntica. Éste estado ha sido llamado durante muchos años Fe beta, pero últimamente se ha abandonado esa denominación y se acepta que en esas zonas el Fe se presenta en forma de Fe alfa no magnético.

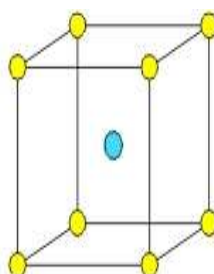


Figura 1. 2 Estructura BCC del hierro alfa no magnético³

² APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971;pag 34

Hierro gamma

Se forma a temperaturas comprendidas entre los 911° y los 1393°C. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras (FCC). Tiene gran capacidad para formar soluciones sólidas, ya que dispone de espacios interatómicos grandes. Puede disolver hasta un 2.11% de carbono. Esta solución recibe el nombre de austenita.

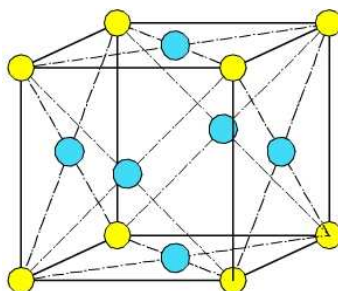


Figura 1. 3 Estructura FCC del hierro alfa no magnético⁴

Hierro Alfa (antes conocido como hierro delta)

Se forma a temperaturas comprendidas entre los 1393°C y 1539°C. Cristaliza en red cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Debido a que aparece a elevadas temperaturas, tiene poca importancia en el estudio de los tratamientos térmicos.

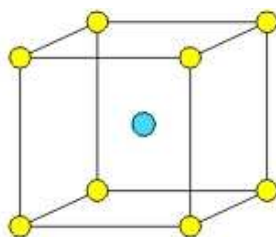


Figura 1. 4 Estructura BCC del hierro alfa no magnético⁵

³ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pag 38

⁴ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pag 38

⁵ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pag 39

Todas las transformaciones alotrópicas van acompañadas de un cambio de volumen, este hecho se puede apreciar con la ayuda de un dilatómetro.

En la tabla 1.1 se resume los diferentes estados alotrópicos del Fe los sistemas cristalinos y zonas de estabilidad.

Tabla 1. 1. Características y propiedades de los diferentes estados alotrópicos del hierro⁶.

Estados Alotrópicos	Red Cristalina	Propiedades Mag.	Peso específico
Alfa Magnético	Centrado en el cuerpo	Muy mag	Inferior al Fe gama y alfa no mag
Alfa No mag	Centrado en el cuerpo	Débilmente mag	Superior al Fe alfa mag
Gamma	Centrado en las caras	No mag	Superior al Fe alfa
Alfa	Centrado en el cuerpo	Débilmente mag	Inferior al del Fe gamma

1.4. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE LAS ALEACIONES HIERRO CARBONO

Todas las posibles aleaciones Hierro - Carbono y sus formas con la temperatura están representadas en lo que se llama el Diagrama de Equilibrio Hierro Carbono. (Figura 1.9). En el eje de las abscisas se tiene el contenido de carbono de las aleaciones en tanto por ciento, hasta el 6.67% donde se encuentra la concentración del segundo componente del sistema: la cementita. En el mismo eje se marca el contenido de cementita en las aleaciones en porcentaje desde 0 a 100%. Para la cantidad de carbono igual a 6.67% el contenido de cementita es 100%.

Para que una solución hierro-carbono reciba el nombre de aleación, la concentración de carbono no puede ser mayor del 6.67%, ya que, si fuese mayor, perdería las cualidades metálicas y recibiría el nombre de compuesto químico.

En el diagrama Hierro-Carbono de la Figura 1.9, se puede apreciar los siguientes constituyentes fundamentales generales:

⁶ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971;pag 38

Hierro, tiene un contenido en carbono menor del 0.008%. El hierro puro es difícil de obtener puesto que la concentración de carbono a temperatura ambiente ha de ser menor al 0.008%.

Aceros, para que una aleación de hierro carbono se considere acero, la concentración de carbono a de estar constituida entre 0.008% y 2.11% a temperatura ambiente. El campo de aplicación de los aceros es muy amplio, abarcando todos los campos de la industria. Entre sus características fundamentales está: su alta dureza, buena resistencia mecánica, maleabilidad, ductilidad, etc.

Fundiciones, reciben este nombre las aleaciones hierro-carbono que tienen una concentración de carbono entre 2.11% y 6.67%. La característica fundamental de la fundición es su extraordinaria dureza, que la hace ideal para herramientas de corte.

Existen dos diagramas principales en el sistema Fe-C los cuales representan los metales y aleaciones de mayor uso llamados aleaciones ferrosas: Uno de ellos es el equilibrio metaestable de Hierro-cementita (Fe-Fe₃C) y el otro es el diagrama de equilibrio estable hierro-grafito.

Fe-Fe₃C (metaestable): Este sistema está representado en el diagrama de la Figura 1.9 con líneas llenas gruesas. El diagrama Hierro-cementita se utiliza principalmente para aceros y fundiciones blancas, es decir las aleaciones con el carbono ligado, sin carbono libre (grafito).

Fe-grafito (estable): En el diagrama de la Figura 1.9 está representado con líneas punteadas; éste sistema expone el esquema de formación de las estructuras en las fundiciones grises donde el carbono se encuentra total o parcialmente en estado libre (grafito).

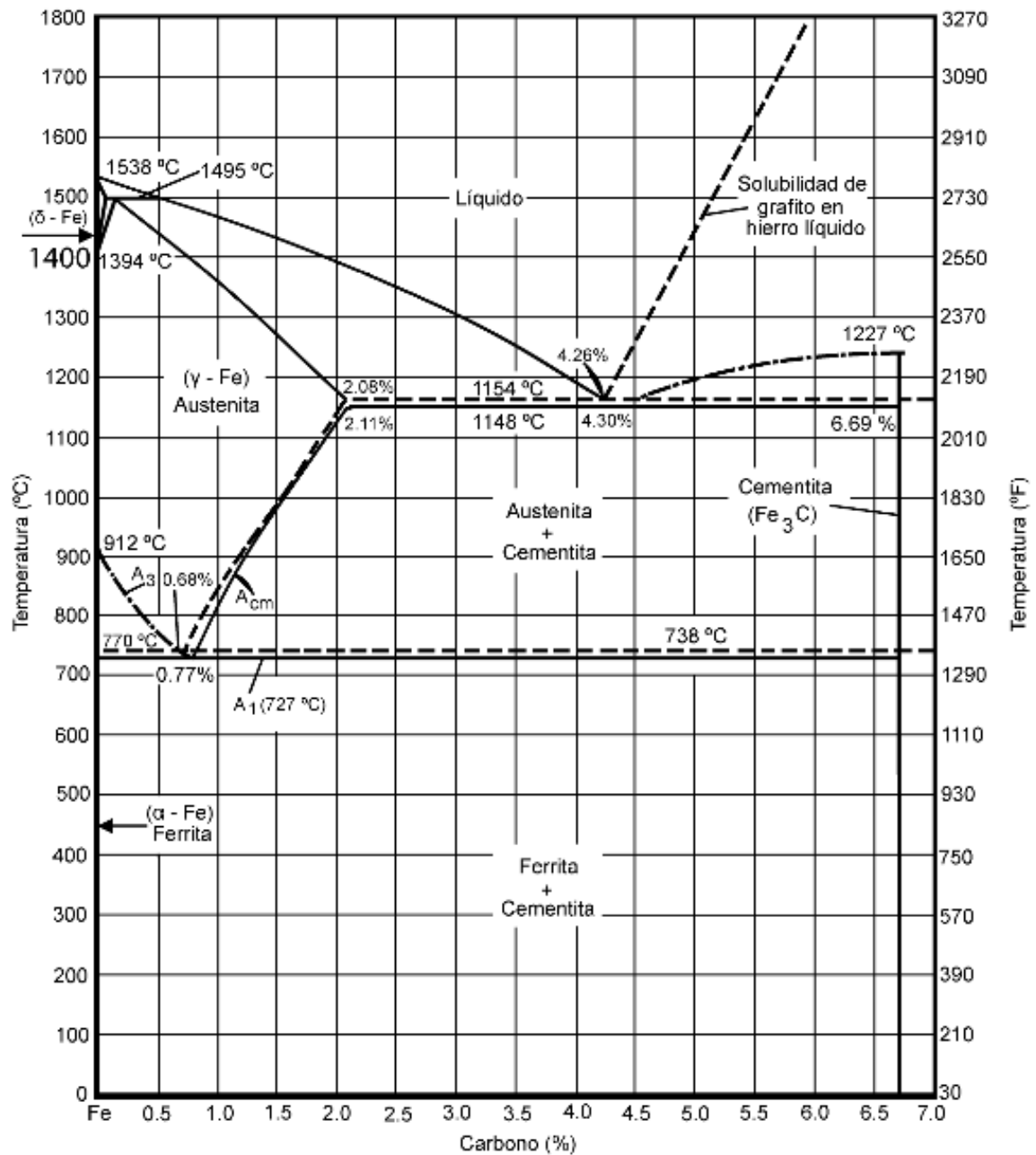


Figura 1. 5 Diagrama de equilibrio de las aleaciones Hierro-Carbono estable y metaestable superpuestas⁷

⁷ GANDY, D; Carbon steel handbook; 2da Ed; Electric Power Research institute EPRI; California-USA; 2007.

1.4.1. EL SISTEMA METAESTABLE FE- Fe_3C

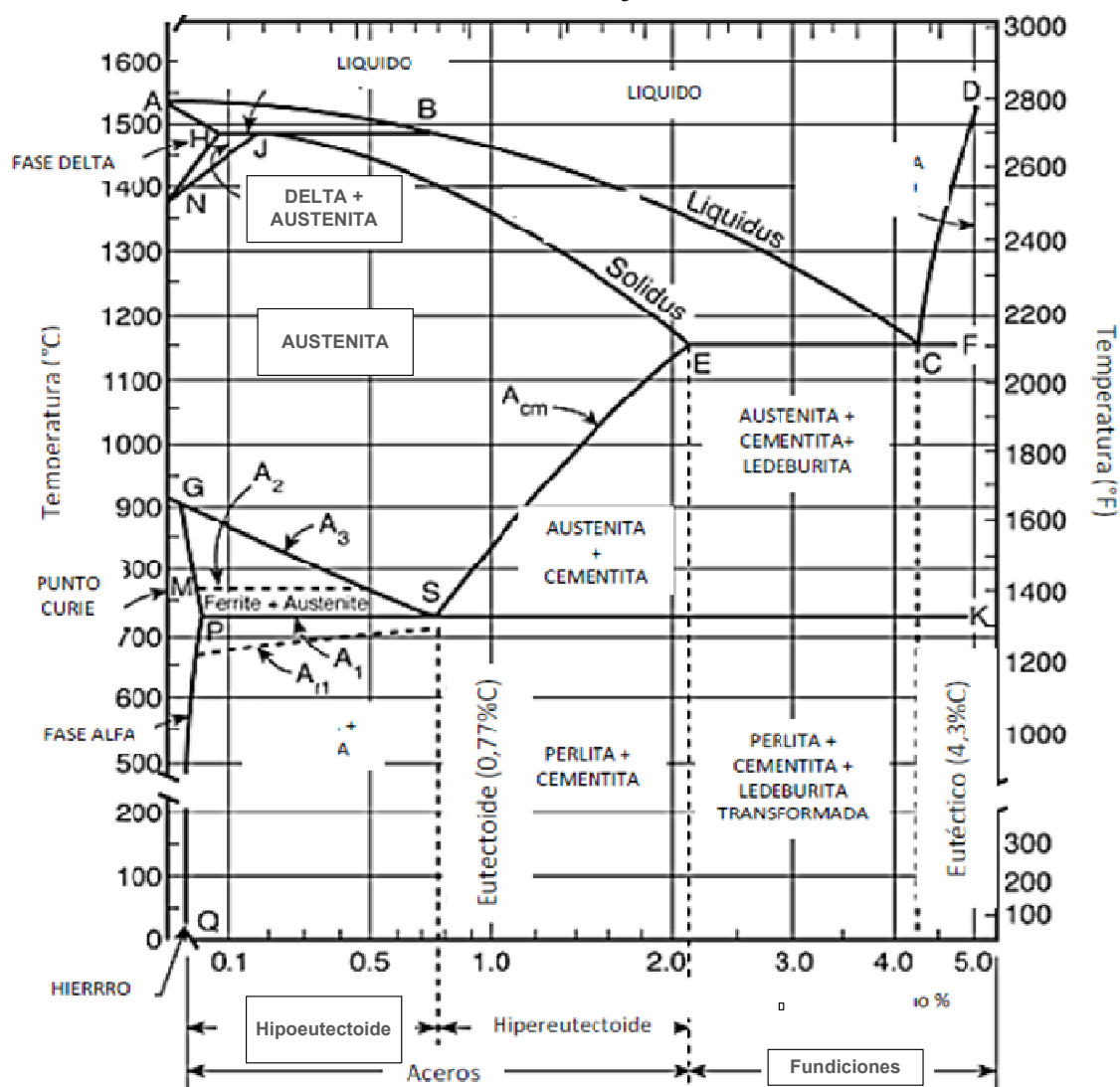


Figura 1. 6 Diagrama de equilibrio de las aleaciones Hierro-Carbono⁸

En este diagrama se tiene lo siguiente: el punto de fusión del hierro puro (0%C) es 1539° C y luego que se agrega carbono, disminuye el punto de fusión de la aleación hasta llegar a 1154° C cuando contiene 4.3% Carbono (ó 4.26%C) y luego con mayor cantidad de carbono vuelve a subir el punto de fusión. Por esa razón ese punto mínimo se llama “eutético” del griego “fácil fusión” y es muy importante para poder licuar el metal y verterlo en moldes.

⁸ GANDY, D; Carbon steel handbook; 2da Ed; Electric Power Research institute EPRI; California-USA; 2007.

Otro aspecto importante es el que se refiere a la máxima solubilidad de carbono en la red de hierro (sólido) que se produce a 1148°C y es de 2.11% C. Nótese que el hierro entre la temperatura 1393°C y 911°C , se llama hierro gama y corresponde a la forma cristalina de cubo centrada en las caras. El hierro en esa forma cristalina tiene los huecos más grandes en la red, pudiendo así acomodar los átomos de carbono con distorsión no tan pronunciada como es el caso de la forma cristalina cubo centrada en el cuerpo llamada hierro alfa, razón por la cual el Fe_{γ} disuelve mayor cantidad de carbono que el Fe_{α} . Esta disolución se refiere a aceptar el carbono en su red y formar una fase totalmente homogénea, tal como la disolución de la sal en el agua. Se puede introducir más carbono en el hierro líquido pero al enfriar, éste expulsa el exceso de carbono de la red ya sea en forma de carbono puro (forma cristalina compleja llamada grafito) u otras veces en forma de un compuesto de hierro rico en carbono, un carburo muy duro llamado cementita con la siguiente fórmula química Fe_3C . Esto es igual que al enfriar una solución de agua con sal, ésta alcanza el límite de solubilidad de la sal con el agua, ya que ésta disminuye con la temperatura, y la sal precipita al ser expulsada de la solución.

El sistema $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ es muy importante, porque cuando hay menos cantidad de carbono, menos de 2.11% las aleaciones contienen el carbono en forma de cementita y reciben el nombre de ACEROS y son posibles de deformar sin quebrarse. Cuando tienen mayor cantidad de carbono reciben el nombre de fundiciones, en ellas el carbono en exceso precipita como grafito y aún más como láminas o escamas de grafito que interrumpen la red de hierro, tornándolos quebradizos.

Cuando el acero con constitución austenítico, se enfría lentamente, la austenita se transforma en distintos productos; así por ejemplo, si el acero es hipoeutectoide la austenita se transforma inicialmente en ferrita hasta la temperatura eutectoide, a la cual la austenita remanente se transforma en perlita. La microestructura final será perlita y ferrita proeutectoide en una proporción que depende de la composición y la velocidad de enfriamiento.

Si el acero es de composición eutectoide, la austenita se transforma completamente en perlita; si la composición es hipereutectoide se obtiene

cementita proeutectoide y perlita como producto de la transformación. Cuando la velocidad de enfriamiento aumenta, la morfología de la ferrita y la cementita proeutectoide cambia y la perlita se hace más fina. A una velocidad elevada, los anteriores constituyentes desaparecen súbitamente a una velocidad de enfriamiento crítico, y aparece una estructura nueva más dura que es la martensita.

Estos productos, obtenidos por enfriamiento rápido, son metaestables desde un punto de vista termodinámico de gran utilidad para la ingeniería debido a sus propiedades.

1.4.2. DEFINICION DE ESTRUCTURAS⁹

Ahora se definirán los nombres que, por razones descriptivas se han asignado a las estructuras que parecen en este diagrama.

Cementita: es un carburo de Hierro (Fe_3C), contiene 6.67% de C en peso. Se produce por efecto del exceso de carbono sobre el límite de solubilidad. Si bien la composición química de la cementita es (Fe_3C) la estructura cristalina es del tipo ortorrómbica con doce átomos de hierro y 4 átomos de carbono por celda. Es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia tensil (aproximadamente 5000 lb/pulg^2 ($34,47 \text{ MPa}$)) y de alta resistencia compresiva es la estructura más dura que aparece en el diagrama.

Austenita: Es el nombre dado a la solución sólida γ . Es una solución sólida intersticial de carbón disuelto en $\text{Fe}\gamma$ (FCC). La máxima solubilidad es del 2.11% de C a 1130°C (Punto E) las propiedades promedio son: resistencia a la tensión 150000 lb/pulg^2 (1034 MPa), elongación 10% en dos pulgadas, dureza HRC 40 aproximadamente y tenacidad alta. Generalmente no es estable a temperatura

⁹ AVNER, Sidney; Introducción a la metalurgia física; segunda edición; Editorial McGRAW-HILL; México; 1988 pág. 237.

ambiente. Bajo ciertas condiciones, es posible obtener austenita a temperatura ambiente, y su estructura se muestra en la figura 1.11a.

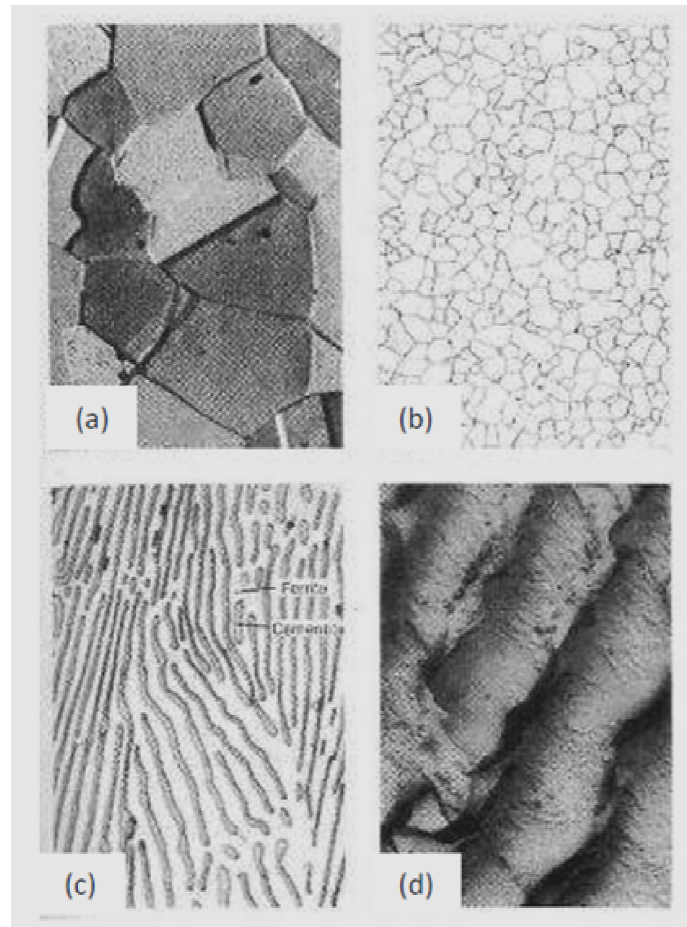


Figura 1. 7 Microestructura de: a) Austenita 500x;b) Ferrita 100x;c) perlita, 2500x; b) perlita, micrografo de electrones 17000x aumentada 3x al imprimir.⁹

Ledeburita: Es la mezcla eutéctica de austenita y cementita; contiene 4.3% de C y se observa a 1130°C.

Ferrita: Es el nombre dado a la solución sólida . Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en Fe (BCC) figura 1.11b. La máxima solubilidad es 0.025% de C a 723°C (punto P), y se disuelve solo a 0.008% de C a temperatura ambiente es la estructura más suave que aparece en el diagrama. Las propiedades promedio son resistencia tensil 40000 lb/pulg² (275 MPa), elongación 40% en 2 pulgadas (0.0508m), dureza menor que HRC 0 o HRB 90.

Perlita (punto S) Es la mezcla eutectoide que contiene 0.77% de C y se forma a 723°C en un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. La figura 1.11c muestra la fina mezcla tipo huella dactilar, llamada perlita la base o matriz perlítica blanca que forma la mayoría de mezcla eutectoide contiene delgadas placas de cementita. La figura 1.11d muestra la misma estructura amplificada 17000 veces con el microscopio electrónico, las propiedades promedio son: resistencia tensil 120000 lb/pulg² (827 MPa), elongación 20% en 2 pulgadas (0.0508m), dureza HRC 20, dureza HRB 95-100.

1.4.3. HOMOGENEIDAD DE LA AUSTENITA¹⁰

Cuando utilizamos la composición del acero dado, suponemos implícitamente que todos los elementos del acero están presentes de modo homogéneo en la austenita antes del enfriamiento por temple. Para tener una austenita homogénea las condiciones de austenización deben ser de tal naturaleza que la temperatura de austenización sea lo suficientemente elevada como para disolver todas las adiciones de aleantes y el contenido de carbono en la austenita y que se dé el tiempo suficiente para disolver todos los carburos y homogenizar la composición. Las condiciones de austenización también incluyen el control de la atmosfera para evitar la descarburización. Así mismo se debe tener cuidado de no austenitizar a temperaturas muy altas por que se produce engrosamiento del tamaño de grano de la austenita. Un tamaño de grano de austenita grande da por resultado un acero endurecido con poca tenacidad. Otro efecto de las temperaturas de austenización excesivamente altas es que el exceso de calor que es preciso extraer durante el enfriamiento hace difícil alcanzar las velocidades de enfriamiento críticas para obtener martensita, y puede inducir más esfuerzos térmicos. Una vez seleccionada la temperatura de austenización, es importantísimo permitir que todos los carburos y adiciones se disuelvan

¹⁰ MANGONON, Pat; Ciencia de materiales: selección y diseño; primera edición; Pearson education; México; 2007; Pág. 371.

totalmente, y homogeneizar la composición manteniendo el acero a la temperatura de austenización durante el tiempo suficiente. La práctica común consiste en mantener el acero a la temperatura de austenización durante una hora por cada pulgada (0.0254 m) de espesor. Esto proporciona el tiempo suficiente para que la sección central alcance la temperatura y para que el carbono y los elementos de aleación se difundan.

1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS¹¹

Para clasificar el acero se lo puede realizar según los siguientes métodos:

1.5.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS SEGÚN EL PROCESO DE FABRICACIÓN¹²

Tabla 1. 2. Clasificación de los aceros según el proceso de fabricación.

<i>Procedimiento de fabricación</i>	<i>Contenido de S y P%</i>		<i>En el proceso se eliminan</i>		<i>Orden</i>	
	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Calidad</i>	<i>Precio</i>
Martin-Siemens	0,05	0,04	Parcial	Se elim	4	3
Convertidor con soplado de O₂	0,05	0,04	Idem	Idem	3	2
Bessemer	0,07	0,09	No se elim	No se elim	5	1
Martin-Siemens (Acido)	0,05	0,05	Idem	Idem	2	4
En hornos eléctricos	0,03	0,03	Se elim	Se elim	1	5

Cada uno de ellos se difieren en contenido de: Fósforo, azufre, silicio, oxígeno.

1.5.2. CLASIFICACION DE LOS ACEROS SEGÚN EL USO

Generalmente estos aceros serán usados como aceros para máquinas, para resortes, para calderas, y para herramientas.

¹¹ AVNER, Sidney; Introducción a la metalurgia física; segunda edición; Editorial McGRAW-HILL; México; 1988 pág. 247.

¹² GALVÁN, Vicente; Materiales Metálicos; editorial de la UPV

Aceros para maquinaria

Son generalmente aceros de baja aleación utilizados para la construcción o reparación de maquinaria en general. Existen varias familias de aceros de maquinaria designados así en función a los elementos aleantes de mayor presencia en su composición química. Usados principalmente en la fabricación de: ejes, engranajes, guías, tornillos sin fin, pines, sellos, etc.

Acero para herramientas

Aceros diseñado para alta resistencia al desgaste, tenacidad y fuerza, en general el contenido de carbono debe ser superior a 0.3% pero en ocasiones también se usan para la fabricación de ciertas herramientas, aceros con un contenido de carbono más bajo (0.1-0.3%).

Acero para la construcción

El acero que se emplea en la industria de la construcción, bien puede ser el acero de refuerzo en las armaduras para estructuras de hormigón y el acero estructural para estructuras metálicas.

1.5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS SEGÚN SU COMPOSICIÓN

Existe una gran variedad de aceros, los cuales se pueden clasificar en términos generales con base al contenido de carbono en dos grande grupos:

- Aceros al carbono.
- Aceros aleados.

1.5.3.1. Aceros al carbono

Más del 90 % de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros son aleaciones hierro – carbono, que generalmente tiene la siguiente composición¹³:

¹³ PAZOS, N; Tecnología de los metales y procesos; manufactura: Universidad Católica Andrés Bello; 2005; pag81.

Carbono: menor a 2.11% peso

Manganeso: menor 1% en peso

Silicio: menor 0.35% en peso

Fósforo: 0.05% en peso

Azufre: 0.04% en peso

Hierro: balance ($100\% - \sum_1^n \% \text{ en peso elemento } x$)

Entre los productos fabricados con acero al carbono se encuentran máquinas, carrocerías de automóviles, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques y muchos más productos.

Los aceros al carbono pueden alcanzar resistencias de 690 MPa pero con elevada pérdida de ductilidad y tenacidad; además tiene poca resistencia a la corrosión y la oxidación.

Según su contenido de carbono, estos aceros se clasifican:

Bajo carbono, menos de 0.25%

Carbono medio, 0.25 - 0.6%

Alto carbono, más de 0.6%

Aceros de bajo carbono

- Generalmente contienen menos del 0.25 % de C en peso.
 - Su microestructura consiste en ferrita y perlita.
 - Son los que se producen comercialmente en mayor cantidad.
 - No adquieren dureza fácilmente al temple.
 - Son blandos pero dúctiles.
-

- Su incremento en la resistencia puede lograrse por medio de trabajo en frío
- Son los de menor costo de producción.
- Se utilizan en vehículos, tuberías, elementos estructurales.
- Su resistencia media en estado normalizado varía de 35 a 53 kg/mm² y los alargamientos de 33 a 23 %.

Aceros de medio carbono

- Tienen concentraciones de carbono entre 0.25-0.6%
- Se pueden mejorar sus propiedades a través de tratamientos térmicos.
- Presentan mayor resistencia que los aceros de bajo carbono pero menos dúctiles.
- Se utilizan en piezas que requieren una alta resistencia mecánica al desgaste
- Se utilizan en equipo de maquinaria automotriz y equipo agrícola (engranajes, ejes, bielas, cigüeñales) en equipo de ferrocarriles.

Aceros de alto carbono

- Tienen concentraciones de carbono entre 0.6-1.4%
- Son aceros más resistentes pero menos dúctiles.
- Se añaden otros elementos como wolframio para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Se utilizan principalmente en la fabricación de herramientas.
- Son los que mejor responden al tratamiento térmico.
- Casi siempre se utilizan en estado templado con el fin de que desarrolle la mayor dureza, resistencia, tenacidad y ductilidad.
- No se pueden soldar con facilidad.
- Se utilizan por lo general para partes que requieren resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste, como las herramientas de corte, cables, alambres, y cuchillería.

1.5.3.2. Aceros Aleados

Con los aceros no aleados, o al carbono es imposible satisfacer las demandas de la industria actual. Para conseguir determinadas características de resistencia, dureza y resistencia a determinadas temperaturas, debemos recurrir a los elementos de aleación. Mediante la acción de uno o varios elementos en porcentajes adecuados se introducen modificaciones químicas y estructurales que afectan a las características mecánicas, resistencia a la oxidación y otras propiedades.

1.5.3.2.1. Definición

Se puede definir a un acero aleado como aquel cuyas propiedades características han sido obtenidas a partir de la adición de un elemento aleante determinado o específico que se difiere del carbono. Sin embargo la mayoría de aceros contienen pequeñas cantidades de Mn (hasta 0.90%) y Si (hasta 0.30%) por lo que no son considerados aceros aleados ya que su función es actuar como elemento que eviten la oxidación.

1.5.3.2.2. Clasificación

Según el contenido de aleación los aceros aleados se clasifican en:

- **Baja aleación**, contenido total de aleantes < 5%.
- **Alta aleación**, contenido total de aleantes > 5%.

Aceros de baja aleación son los aceros menos costosos pues contienen en menor cantidad elementos aleantes sin embargo proporcionan gran resistencia lo que los hace superiores a los aceros al carbono

Aceros de alta baja aleación son aquellos en que el total de elementos de aleación distintos del carbono superan el 5% en peso, la adición de estos elementos encarece el acero y solo se justifica por la mejora sustancial de ciertas propiedades. Tal es el caso de los aceros inoxidable que requieren la adición de aleantes para evitar ser dañados por el ambiente corrosivo.

1.6. ELEMENTOS DE ALEACIÓN

En la tabla 1.3 se observa los efectos específicos de los elementos de aleación en el acero.

Tabla 1. 3.Efectos específicos de los elementos de aleación en el acero¹⁴.

ELEMENTO	SOLUBILIDAD SOLIDA		INFLUENCIA EN LA FERRITA	INFLUENCIA EN LA AUSTENITA	INFLUENCIA EJERCIDA POR MEDIO DEL CARBURO		FUNCIONES PRINCIPALES
	EN HIERRO GAMMA	EN HIERRO ALFA			TENDENCIA A FORMAR CARBUROS	ACCION DURANTE EL REVENIDO	
Aluminio	1.1% (aumentado por C)	36%	La endurece considerablemente por solución solida	Si se disuelve en austenita, aumenta ligeramente la templabilidad	Negativa (grafitiza)		<ol style="list-style-type: none"> 1. Desoxida eficazmente 2. Restringe el crecimiento de grano (por formación de óxidos o nitruros dispersos) 3. Elemento de aleación en la nitruración del acero
Cromo	12.8% (20% con 0.5% C)	Ilimitada	La endurece ligeramente; aumenta la resistencia a la corrosión	Aumenta la templabilidad moderadamente	Mayor que Mn; menor que W	Contrarresta ligeramente al suavamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta la resistencia a la corrosión y oxidación 2. Aumenta la templabilidad 3. Añade alguna resistencia a altas temperaturas 4. Resiste la abrasión y al desgaste (con alto contenido de C)
Cobalto	Ilimitada	75%	La endurece considerablemente por solución solida	Cuando esta disuelto disminuye la templabilidad	Semejante al Fe	Mantiene la dureza por efecto de la solución solida	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contribuye a conservar la dureza al rojo, endureciendo la ferrita
Manganeso	Ilimitada	3%	La endurece marcadamente; reduce la plasticidad	Aumenta moderadamente la templabilidad	Mayor que Fe; menor que Cr	Muy poca, en porcentajes usuales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrarresta la fragilidad debida al azufre 2. Aumenta a bajo costo la templabilidad
Molibdeno	3% (8% con 0.3% C)	37.5% (menor con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en los aceros aleados con alto Mo-Fe	Aumenta fuertemente la templabilidad (Mo>Cr)	Fuerte; mayor que Cr	Se opone al movimiento, por endurecimiento o secundario	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eleva la T del inicio de crecimiento del grano de austenita 2. Profundiza el endurecimiento 3. Contrarresta la tendencia a la fragilidad por el

¹⁴ AVNER, Sidney; Introducción a la metalurgia física; segunda edición; Editorial McGRAW-HILL; México; 1988 Pág. 357.

							<p>revenido</p> <p>4. Aumenta las resistencias a altas temperaturas, a la fluencia y a la dureza al rojo</p> <p>5. Mejora la resistencia a la corrosión en aceros inoxidable</p> <p>6. Forma partículas resistentes a la corrosión</p>
Níquel	Ilimitada	10% (independiente del contenido de C)	La hace resistente y tenaz por solución sólida	Aumenta ligeramente la templabilidad pero tiende a retener austenita con alto contenido de C	Negativa (grafitiza)	Muy poca en pequeños porcentajes	<p>1. Hace resistentes los aceros no templados o recocidos</p> <p>2. Hace tenaces los aceros perlíticos - ferríticos (especialmente a baja temperatura)</p> <p>3. Austeniza las aleaciones de hierro al alto cromo</p>
Fosforo	0.5%	2.8% (independiente del contenido de C)	La endurece fuertemente por solución sólida	Aumenta la templabilidad	Despreciable		<p>1. Aumenta la resistencia del acero al bajo C</p> <p>2. Aumenta la resistencia a la corrosión</p> <p>3. Mejora la maquinabilidad en los aceros de cortado libre (aceros rápidos)</p>
Silicio	2% (9% con 0.35% C)	18.5 (no cambio mucho con el contenido de C)	La endurece con pérdida en plasticidad (Mn<Si<P)	Aumenta moderadamente la templabilidad	Negativa (grafitiza)	Sostiene la dureza por solución sólida	<p>1. Se emplea como desoxidador de propósito general</p> <p>2. Elemento de aleación para laminas eléctricas y magnéticas</p> <p>3. Mejora la resistencia a la corrosión</p> <p>4. Aumenta la templabilidad de los aceros que no tienen elementos grafitizadores</p> <p>5. Hace resistentes los aceros de baja aleación</p>
Titanio	0.75% (1% ± con 0.20% C)	6% (menos con temperatura)	Proporciona un sistema de endurecimiento por	Probablemente aumenta muy fuerte la	La mayor que se conoce (2%)	Los carburos persistentes probablemente	<p>Fija el C en partículas inherentes</p> <p>a) Reduce la dureza martensítica y la</p>

		disminuida)	envejecimiento en aleaciones con alto contenido de Ti-Fe	templabilidad al estar disuelto. Los efectos del carburo reducen la templabilidad	de Ti hace que el acero con 0.50% de C no se pueda endurecer)	no se afectan. Algún endurecimiento o secundario	templabilidad en aceros al cromo medio b) Previene la formación de austenita en aceros al alto cromo c) Previene el agotamiento localizado de cromo en aceros inoxidable durante un largo calentamiento
Tungsteno	6% (11% con 0.25% C)	33% (menos con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en aleaciones con alto W-Fe	Aumenta fuertemente la templabilidad en pequeñas cantidades	Fuerte	Se opone al suavamiento por envejecimiento secundario	1. Forma partículas duras y resistentes a la abrasión en aceros para herramientas 2. Promueve la dureza y la resistencia a altas temperaturas
Vanadio		Ilimitada	La endurece moderadamente por solución sólida	Aumenta fuertemente la templabilidad cuando esta disuelto	Muy fuerte (V<Ti o Co)	Máxima por endurecimiento o secundario	1. Eleva la temperatura de inicio de crecimiento del grano de la austenita (promueve el grano fino) 2. Aumenta la templabilidad (cuando esta disuelto) 3. Resiste el revenido y produce un marcado endurecido secundario

1.7. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN ESTADO DE SUMINISTRO

1.7.1. SELECCIÓN DE LOS ACEROS PARA EL ESTUDIO

Los aceros seleccionados para el estudio, fueron de acuerdo a su uso en la industria en el medio. Se seleccionó un acero al carbono (AISI 1045), para conocer sus propiedades mecánicas luego del tratamiento térmico, siendo este un acero muy usado en el medio, por su flexibilidad en el trabajo, se sabe también que es fácil conseguirlo por su bajo costo y porque se encuentra en el mercado fácilmente. También se seleccionó un acero (AISI 1070), para conocer las propiedades mecánicas luego del tratamiento térmico, siendo este un acero difícil de conseguir en nuestro medio ya que se emplean para realizar resortes y solo se encuentran en alambros.

1.7.2. CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 1045¹⁵

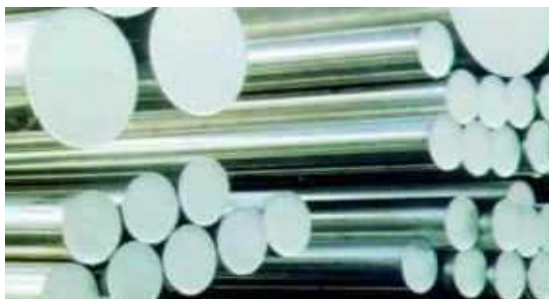


Figura 1. 8 Acero AISI 1045 en estado de suministro

1.7.2.1. Generalidades

Acero al carbono sin alear de esmerada manufactura, con buena tenacidad. Características son su alta uniformidad y rendimiento. Puede utilizarse en condición de suministro o con tratamiento térmico de temple y revenido. Aplicable a partes relativamente simples de máquinas. Dureza de suministro aproximada: 200 HB. **Ver ANEXO A**

¹⁵ Catálogo de aceros de Ivan Bohman

1.7.2.2. Composición química

Tabla 1. 4. Composición química del acero AISI 1045.

C	Si	Mn	Cr	P	S
760	0.50	0.30	0.60	---	0.04
AISI 1045	0.43-0.50	---	0.60-0.90	0.04	0.05

1.7.2.3. Propiedades mecánicas

Resistencia a la tracción: 65 Kg/mm²

Esfuerzo de cedencia: 32 Kg/mm²

Elongación: min 10%

Reducción de área: 40%

Dureza: 220-235

1.7.2.4. Tratamiento térmico

Forjado: 800 – 1050 °C

Normalizado: 830 – 850 °C

Temple (agua): 770 – 810 °C

Temple (aceite): 790 – 830 °C

Revenido (herramienta de corte): 100 – 300 °C

Revenido de bonificación: 550 – 650 °C

1.7.2.5. Aplicaciones

Componentes sencillos, como por ejemplo:

Pernos

Chavetas

Piezas de mediana resistencia para aplicación automotriz

Ejes

1.7.3. CARACTERISTICAS DEL ACERO AISI 1070¹⁶



Figura 1. 9 Acero AISI 1070 en estado de suministro

1.7.3.1. Generalidades

Acindar toma especiales precauciones durante la metalurgia secundaria en el horno cuchara para asegurar una adecuada limpieza del acero y una homogénea composición química. Las condiciones de colado del acero son ajustadas para minimizar la segregación central del carbono. Durante el enfriamiento controlado del alambrón, las velocidades de las distintas zonas del transportador a rodillos son ajustados para asegurar la homogeneidad de propiedades mecánicas del alambrón. Los parámetros de proceso tales como temperatura del horno de recalentamiento, temperatura de laminación, temperatura de formación de espiras, así como también las condiciones de enfriamiento son continuamente monitoreados en forma automática mediante ABB Advant Control System. **Ver ANEXO B.**

¹⁶ <http://www.steelforge.com/forgings/alloys/aisi1070report.html>

1.7.3.2. Composición química

Acindar produce alambrones de alto carbono según sus propias normas internas, con las siguientes características:

Tabla 1. 5Composición química del acero AISI 1070.

Grado	Análisis Químico de la colada					Propiedades Mecánicas		
	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si %	Carga de rotura Kg/mm2 KPSI		Estricción mín.
1070	0.68/0.75	0.60/0.90	0.25	0.25	0.15/0.30	98/116	139/165	33

1.7.3.3. Usos típicos:

Cables

Alambre para enfardelar algodón

Resortes

Alambre para laminación en frío

Alambre para tela metálica

1.7.3.4. Aplicaciones

Con los alambrones de alto carbono se fabrican una serie de productos como:

Cables

Resortes

Cordones galvanizados

Talones de cubierta

Alambres para enfardelar lana/algodón/celulosa

Alambres para laminar en frío

1.7.3.5. Características que debe cumplir el alambón de alto carbono.

Composición química uniforme.

Buena trefilabilidad.

Buena ductilidad remanente del alambre luego de la trefilación.

Excelente calidad superficial.

CAPITULO 2

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

2.1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento térmico es una operación muy importante en el ciclo tecnológico de preparación de muchas piezas. Solamente con la ayuda del diagrama TTT se puede obtener altas propiedades mecánicas que garanticen un trabajo normal de los elementos de las máquinas herramientas.

Con frecuencia los metales se tratan térmicamente para distribuir o anular las tensiones residuales sin embargo las modificaciones que más frecuentemente se realizan por tratamientos térmicos comprenden cambios en la naturaleza, forma, tamaño o distribución de los componentes estructurales.

2.2. TEORÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

2.2.1. DEFINICIÓN

Es una combinación de operaciones que comprenden el calentamiento, permanencia a dicha temperatura y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido tal que producirá propiedades deseadas.¹⁷

Existen varios tipos de tratamientos térmicos como son: Recocido, normalizado, temple, revenido, que de manera distinta cambian la estructura y las propiedades del acero tratado térmicamente y que son recomendadas en dependencia de las exigencias planteadas.

¹⁷ AVNER, Sidney; Introducción a la metalurgia física; segunda edición; Editorial McGRAW-HILL; México; 1988 Pág. 253.

2.2.1.1. Calentamiento hasta la temperatura fijada.

El incremento de temperatura debe ser uniforme en el que la pieza alcanza determinada temperatura en un tiempo establecido o también de forma escalonada es decir con intervalos de calentamiento y estabilización hasta llegar a la temperatura establecida.

En la etapa de calentamiento la progresión de los constituyentes que van a formar la solución sólida es la siguiente:

La nucleación de la austenita se va a producir, inicial y únicamente, en el interior de la fase perlítica.

Las piezas de poco espesor y de formas sencillas se pueden introducir directamente en los hornos calientes a alta temperatura 750°C a 850°C, pero en el caso de piezas gruesas hay que tomar precauciones. En las piezas gruesas el calentamiento ha de procurarse que sea lo más uniforme posible y debe llegar hasta el centro de la pieza. Debe hacerse lentamente para que haya la menor diferencia de temperatura entre el interior y la periferia, pues en caso contrario se puede crear fuertes tensiones internas que pueden dar lugar a grietas y roturas. Estas tensiones se crean primero por la desigual dilatación de las zonas calientes y frías de las piezas (periferia y centro) y luego por las contracciones que ocurren al atravesar el acero las zonas críticas.

El paso de la zona crítica no es peligroso cuando toda la pieza tiene la misma temperatura o las diferencias entre el centro y la periferia son pequeñas, como ocurre en los calentamientos lentos. En cambio, cuando en las piezas muy gruesas la periferia alcanza esa temperatura antes que el centro, la zona perlítica sufre una contracción, mientras el centro que no ha llegado a esa temperatura se está dilatando todavía el peligro de grieta es mayor.

Cuando en el calentamiento el acero alcanza aproximadamente los 732°C, la perlita comienza a transformarse en austenita, y cambia la estructura cristalina del hierro de la perlita, pasando de hierro alfa a hierro gamma, y el acero que se

estaba dilatando se contrae mientras dura esa transformación, continuando luego otra vez la dilatación.

Los calentamientos rápidos son peligrosos en las piezas gruesas, especialmente en los aceros de alto contenido de carbono, en los que el porcentaje de perlita es grande. En los aceros dulces, en cambio, se pueden utilizar mayores velocidades de calentamiento, ya que en ellos estos fenómenos tienen menos importancia.

El estado de la superficie del material tiene también gran influencia en la duración del calentamiento, existiendo por esa circunstancia diferencias muy notables entre los tiempos necesarios para conseguir un correcto calentamiento de barras o perfiles de diferente estado superficial.¹⁸

2.2.1.2. Permanencia a la temperatura fijada.

Su fin es la completa transformación del material. Para conseguir que toda la masa del acero este formada por cristales de austenita, hace falta que el acero permanezca a la temperatura de calentamiento un cierto tiempo. Puede considerarse como suficiente una permanencia de dos minutos por mm de espesor en el caso de querer obtener una austenización completa en el centro y superficies. Los largos mantenimientos y sobre todo a altas temperaturas son muy peligrosos ya que el grano austenítico crece rápidamente dejando el acero con estructuras finales gruesas y frágiles.

El tiempo de mantenimiento del acero a la temperatura de tratamiento comienza cuando toda la pieza, incluyendo las zonas del interior ha alcanzado esa temperatura. Aunque al rebasar el acero las temperaturas Ac_3 o Ac_m , todo el carbono forma solución con la austenita, unas regiones de austenita pueden tener más carbono que otras. Entonces el porcentaje de carbono tiende a igualarse en toda la masa, pero esta tendencia puede ser retardada por las segregaciones no metálicas que forman barreras entre los granos, por ejemplo el fósforo y el oxígeno que se encuentran en solución y que parece que tienden a repeler al carbono, o por la presencia de elementos aleantes como el cromo, wolframio, etc.,

¹⁸ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pág. 76

que tienden a formar carburos complejos. Como la difusión del carbono es mucho más rápida a alta temperatura, para reducir el tiempo de calentamiento podría efectuarse el tratamiento a temperaturas muy superiores a la crítica, pero como estos calentamientos dan lugar a un gran crecimiento de los cristales, generalmente se prefiere prolongar un poco su duración y efectuarlo a temperaturas relativamente bajas.

Cuando el material alcanza la temperatura de austenización ocurre que aunque toda la estructura sea ya totalmente austenita, en los primeros momentos todavía la austenita no es completamente homogénea.

En los aceros hipoeutectoides hay zonas que anteriormente eran de ferrita y que al ser austenizadas en los primeros momentos son bajas en carbono y en los aceros hipereutectoides hay zonas que anteriormente eran de carburos y luego cuando alcanzan altas temperaturas tienen en un principio alto contenido de carbono. En los aceros hipoeutectoides conviene que transcurra algún tiempo para que el carbono se difunda en las zonas que anteriormente fueron ferríticas.

Cuando se calienta con austenización incompleta los aceros hipereutectoides, la austenita que se encuentra junto a los carburos, tiene en general siempre un porcentaje de carbono superior al resto.

El tiempo necesario para obtener una estructura de austenita homogénea, varía con la máxima temperatura alcanzada y con las particulares características de la microestructura inicial. Cuando más alta sea la temperatura que se alcanza, menos tiempo es necesario para homogenizar la microestructura.

En la figura 2.1 se puede conocer la influencia del tiempo y de la temperatura en la austenización de un acero eutectoide.

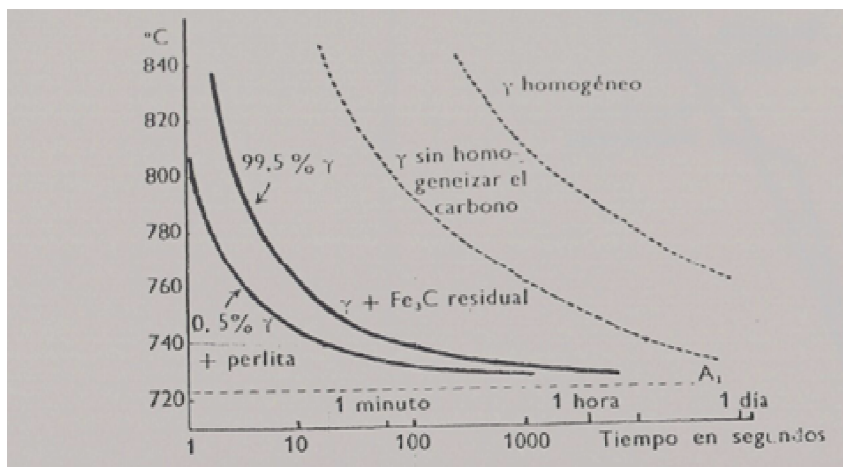


Figura 2.1 Tiempo necesario para alcanzar en una pequeña pieza de un acero al carbono eutectoide (C-0.90% gama) diversos grados de austenización. La primera línea (0.5% gama), señala la primera aparición perceptible de austenita. La segunda línea (99.5% gama), representa la desaparición casi completa de la perlita, pero quedando todavía algunas zonas de cementita. La tercera línea, indica que toda la masa es ya de austenita aunque hay todavía heterogeneidad en su contenido de carbono. La cuarta línea, señala la homogeneidad completa de la austenita.¹⁹

Si el calentamiento ha sido bastante rápido, el tiempo de permanencia deberá ser grande; en cambio, si la primera fase del calentamiento hasta alcanzar la temperatura conveniente ha sido larga, el tiempo de permanencia puede ser menor, ya que la penetración del calor habrá sido mejor y la última fase del calentamiento puede considerarse casi como parte de la permanencia a temperatura.

En general, para los tratamientos térmicos, el tiempo de permanencia oscila entre media hora y una hora por pulgada de espesor. Para procesos de calentamiento, cuya duración es de una hora por pulgada de diámetro, suelen utilizarse permanencias a temperatura de tratamiento de media hora por pulgada, y para procesos cuya duración es de media hora por pulgada, permanencias de una hora por pulgada.

Cuando el calentamiento se hace en baño de sales, la duración total del calentamiento es mucho más corta que en los hornos de mufla, debido a que la transmisión de calor se efectúa más rápidamente. Los tiempos de permanencia total del acero en el baño, es decir, desde que se introduce en el horno hasta que se saca de él para diversos espesores, se señala en la figura 2.2

¹⁹ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pág. 81

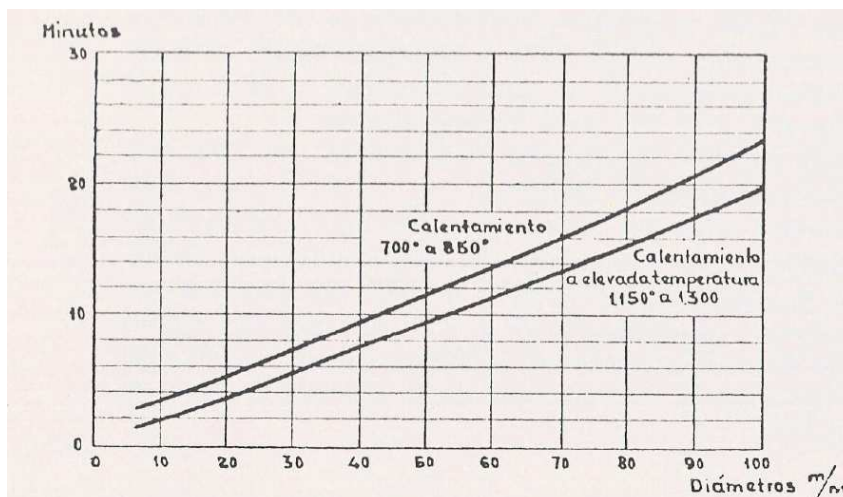


Figura 2. 2 Duración total del calentamiento de las piezas de acero en los hornos de sales²⁰

Una de las curvas se refiere a baja temperatura y la otra a temperaturas más elevadas. Los tiempos que se ha considerado como necesarios para el calentamiento a 1150°C-1300°C, corresponde a materiales que han sido precalentados previamente a 700°C-850°C.

2.2.1.3. Enfriamiento desde la temperatura fijada según el proceso.

Este tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice.

2.3. DIAGRAMA TTT

Se denomina curva TTT al diagrama que relaciona el tiempo y la temperatura requeridos para una transformación isotérmica.

Son muy útiles para entender las transformaciones de un Acero que se enfría isotérmicamente. Así por ejemplo, en el caso del acero, y más concretamente para la fase Austenita, que es inestable debajo de la temperatura de transformación eutécticoide, se necesita saber cuánto tiempo requerirá para empezar a transformarse a una temperatura subcrítica específica, cuánto tiempo precisará para estar completamente transformada y cuál será la naturaleza del producto de esta transformación.

²⁰ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pág. 80

Se elaboran con el porcentaje de transformación frente al logaritmo de las medidas de tiempo. En la figura 2.3 se observa las partes del diagrama TTT.

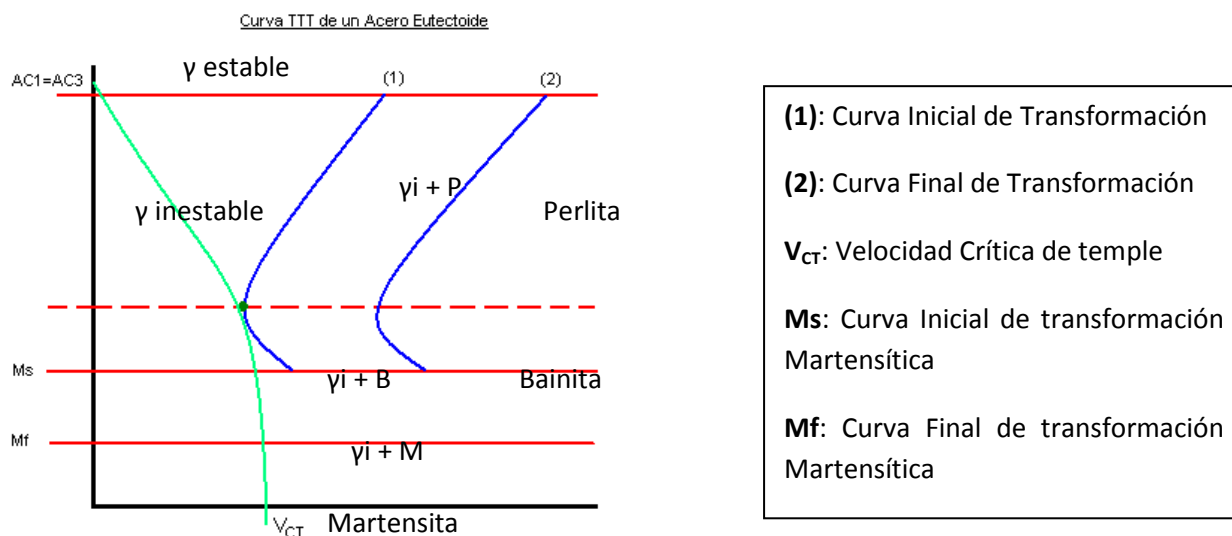


Figura 2. 3. Partes del diagrama TTT²¹

Por debajo de M_s la evolución es independiente del tiempo, sólo depende de la temperatura, es atérmica.

La nariz perlítica nos da el mínimo tiempo de retardo y nos define la velocidad crítica de temple del acero, que es la mínima velocidad que nos permite alcanzar una estructura 100% Martensítica, sin haber sido sometido a ninguna otra transformación en el enfriamiento.

Llamamos tiempo de retardo o periodo de incubación al tiempo necesario para que comience la transformación isoterma de la austenita, es distinto para cada temperatura.

El diagrama TTT más simple es el del acero al carbono eutectoide ya que no hay constituyentes proeutectoides en la microestructura. En la figura 2.4 se observa la diferencia entre un diagrama de un Acero Hipoeutectoide y otro Hipereutectoide.

²¹ <http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap4/41/>

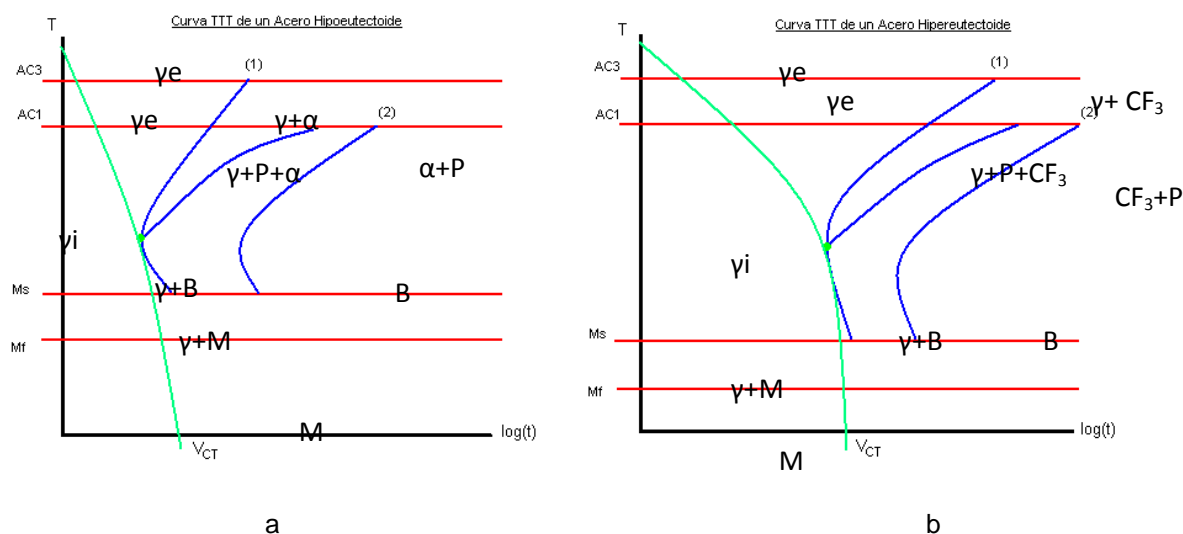


Figura 2. 4 Diagrama de un Acero a) Hipoeutectoide y b) Hipereutectoide.²²

En los diagramas distinguimos tres zonas:

1. La de la izquierda de las curvas, donde la Austenita todavía no ha comenzado a transformarse.
2. La comprendida entre las dos curvas, donde la Austenita está en periodo de transformación.
3. La de la derecha, donde la Austenita se encuentra completamente transformada.

Para obtener estos diagramas, se calienta un conjunto de probetas iguales a la temperatura de austenización, y se mantienen allí hasta que se transforman en austenita. Conseguido esto, se enfrían bruscamente en baños de sales o metal fundido hasta la temperatura deseada, que permanecerá constante mientras dure el ensayo; a intervalos de tiempo determinados se sacan las probetas del baño y se enfrían bruscamente hasta temperatura ambiente. Mediante el examen microscópico de las mismas, se determina la cantidad de austenita transformada en función del tiempo y con ello, el principio y el final de la transformación. Se obtiene así el diagrama que nos da la cantidad de Austenita transformada en función del tiempo, a temperatura constante.

²² <http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap4/42/>

Existen diversos factores que influyen sobre las curvas TTT, desplazando las mismas hacia la derecha o hacia la izquierda en el diagrama, es decir, retardando o adelantando el comienzo de la transformación martensítica, o desplazando hacia arriba o hacia abajo las líneas de principio y fin de la transformación martensítica. Estos factores son, entre otros:

1. El contenido en Carbono de la aleación: a mayor contenido mayor será el desplazamiento hacia la derecha de las curvas inicial y final de transformación; y hacia abajo las isothermas que indican el principio y el fin de la transformación martensítica.
2. Temperatura de Austenización: cuanto mayor sea, mayor será el tamaño de grano, y mayor por tanto el desplazamiento de las curvas hacia la derecha y hacia abajo.
3. Elementos Aleantes: distinguimos entre dos tipos:
 - a. Ganmágenos: aquellos que se disuelven preferentemente en la Austenita como son el Níquel y el Manganeso, que expanden por tanto el campo de existencia de la Austenita desplazando hacia abajo las isothermas.
 - b. Alfágenos: se disuelven preferentemente en la fase α (Ferrita), son por ejemplo el Cromo, el Molibdeno, el Vanadio y el Wolframio; y desplazan las isothermas hacia arriba.
 - c. Carburígenos: son elementos (habitualmente Alfágenos) que tienden a formar carburos. Producen una segunda zona de temperaturas de transformaciones rápidas al nivel de la transformación de la austenita en Bainita.

Todos los elementos de aleación, excepto el cobalto, aumentan los tiempos de transformación isoterma de la austenita.

2.3.1. TIPOS DE DIAGRAMA TTT

Además de las curvas TTT, podemos hablar de las curvas TTT de enfriamiento continuo, que no pueden ser deducidas a partir de las anteriores y que presentan unos tiempos mayores debido a que en el caso de enfriamiento continuo se pasa mayor cantidad de tiempo a altas temperaturas, mientras que en el caso

isotérmico el material llega instantáneamente a la temperatura de transformación. En estos últimos se indica en la parte inferior una escala de dureza.

2.3.1.1. Diagrama isotérmico TTT²³

En este diagrama se presenta la transformación de la austenita en los diferentes productos de transformación (perlita, bainita o martensita) por enfriamiento rápido hasta una temperatura determinada y el mantenimiento en ella para posteriormente ser enfriada al aire.

Mediante este diagrama tan solo se debe conocer los tiempos necesarios para que se inicie y concluya una determinada transformación, y solo es aplicable cuando el diámetro de la pieza es pequeño.

2.3.1.2. Diagrama de enfriamiento continuo TTT

En el enfriamiento continuo del acero, la transformación de austenita a perlita se produce a lo largo de un intervalo de temperaturas más bien que a una sola temperatura isotérmica. Como resultado, la microestructura final después del enfriamiento continuo será compleja, ya que la cinética de la reacción cambia en el intervalo de temperatura en el cual se produce la transformación, tal como se observa en la figura 2.5. Las líneas iniciales y finales de transformación se desplazan a tiempos mayores y a temperaturas ligeramente inferiores con relación a los diagramas isotérmicos. Además, no hay líneas de transformación por debajo de 450°C para la transformación de austenita a perlita.

En la figura 2.5 se muestra las distintas velocidades de enfriamiento para muestras de acero eutectoide continuamente enfriado desde las temperaturas de austenización hasta la temperatura ambiente. La curva A de enfriamiento representa un enfriamiento lentísimo, tal como podría obtenerse si suprimimos el calor del horno y permitimos al acero enfriarse a medida que el horno pierde calor. La microestructura en este caso debería ser de perlita gruesa. La curva de

²³ GIL, Mur; Metalografía; Primera edición; Edicions UPC; 2005; Pag 59

enfriamiento B, representa un enfriamiento más rápido, tal como debería obtenerse al retirar el acero austenizado del horno, y permitir su enfriamiento en aire en reposo. En este caso se forma una microestructura de perlita fina. La curva de enfriamiento C comienza con la formación de perlita, pero el tiempo es insuficiente para que se complete la transformación de austenita a perlita. La austenita remanente que no se transforma en perlita a temperaturas superiores, se transformará en martensita a temperaturas más bajas, comenzando a 220°C. La microestructura de este acero, en consecuencia, estará constituida por una mezcla de perlita y martensita. Enfriando a una velocidad mayor que la curva E, denominada velocidad crítica de temple, se conseguirá una estructura completamente martensítica. Esto es en síntesis las transformaciones que suceden en los aceros durante los enfriamientos continuos proporcionados industrialmente.

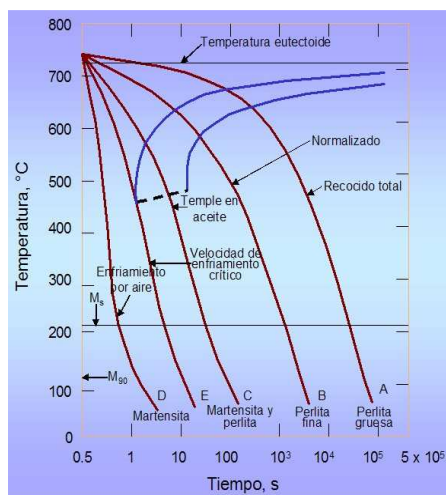


Figura 2. 5. Diagrama de enfriamiento continuo para un acero al carbono eutectoide, con indicación de las microestructuras obtenidas a diferentes velocidades de enfriamiento.²⁴

En el estudio de los diagramas tiempo-temperatura-transformación, se consideran tres zonas:

- a) Zona perlítica
- b) Zona bainítica
- c) Zona martensítica

²⁴ http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13_2_1.html

2.3.2. ZONAS DEL DIAGRAMA TTT

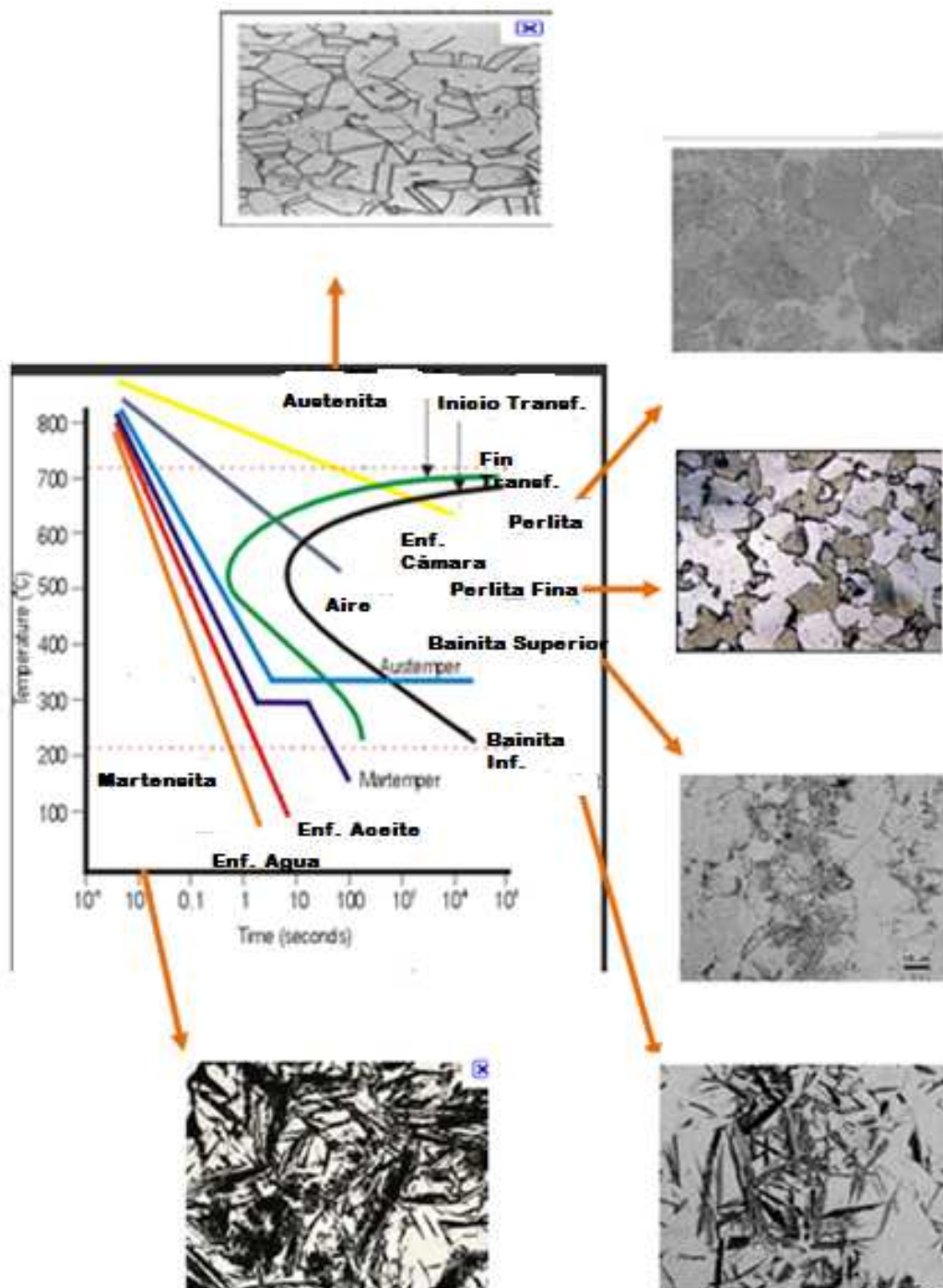


Figura 2. 6 Zonas del diagrama TTT²⁵

²⁵ Elaboración propia.

2.3.2.1. Zona Perlítica.

Cuando los cristales de ferrita y cementita se precipitan se da origen a un proceso de difusión en las zonas de mayor energía de la red de la austenita, tales como borde de grano, inclusiones etc. El carbono se encuentra disuelto en la austenita uniformemente por lo que para formarse la ferrita tienen que emigrar los átomos de carbono que formarán la cementita.

De ésta manera se forma la perlita como una mezcla de láminas alternadas de ferrita y cementita que crecen en distintas direcciones hasta alcanzar el final de la descomposición. A temperaturas muy elevadas se presenta como laminas muy alargadas mientras que al disminuir la temperatura la formación de perlita es más difícil debido a que la difusión del carbono en la austenita no se da con facilidad, afectando en la formación de cementita.

2.3.2.2. Zona Bainítica

La transformación bainítica de la austenita subenfriada se produce en un intervalo de temperaturas que se encuentra más abajo que el perlítico, pero más arriba que el intervalo martensítico, por esto suele llamarse intermedio. La transformación tiene rasgos de la formación perlítica y de la martensítica.

La peculiaridad determinante de ésta transformación es la circunstancia de que transcurre en un intervalo de temperaturas en el cual no existe difusión del hierro, pero se efectúa intensamente la difusión del carbono.

2.3.2.3. Zona Martensítica

Cuando la velocidad de enfriamiento es superior a la crítica de temple, no existe la difusión de carbono y la austenita se transforma en martensita sin que se produzca variación en la posición de los átomos de carbono, y la red queda sobresaturada de carbono. Esta sobresaturación hace que la red se deforme tetragonalmente, y la deformación será mayor cuanto mayor sea el contenido en carbono del acero.

La martensita se forma en un intervalo de temperaturas. La temperatura de comienzo de la transformación martensítica se conoce como temperatura M_s que depende directamente del tipo de acero y es inversamente proporcional al contenido de carbono.

Durante el temple la estructura que se forma es la martensita, se debe poner mucha atención en los cambios de volumen producidos en la transformación, ya que las diferencias de volumen producidos son considerables. En muchas ocasiones se producen grietas de temple debido a que no se pueden ajustar estos cambios de volumen.

2.4. AUSTENIZACIÓN

Se trata de un proceso en el cual se calienta la pieza de acero a una velocidad moderada hasta su temperatura de austenización, generalmente de 30°C a 50°C por encima de la temperatura crítica superior según el diagrama Fe-C y luego se mantiene la pieza a dicha temperatura un tiempo adecuado.

La perlita sobrecalentada por encima del punto crítico se transforma, a velocidad distinta en dependencia del grado de sobrecalentamiento, en austenita.

El comienzo de la transformación perlítica-austenítica va acompañado de la formación de los primeros granos de austenita que se forman en el límite entre la ferrita y la cementita constituyentes estructurales de la perlita. Por consiguiente una vez que se termina la transformación de perlita en austenita, se forma una gran cantidad de pequeños granos de austenita, dicho tamaño se conoce como grano inicial de austenita.

El fin del proceso de la transformación se caracteriza por la formación de la austenita y la desaparición de la perlita. Para obtener una austenita de composición homogénea no sólo hay que pasar durante el calentamiento el punto final de la transformación perlítico-austenítico, sino sobrecalentar por encima de éste punto o mantener ésta temperatura para que puedan terminar los procesos de difusión dentro del grano austenítico.

A continuación el mantenimiento a la temperatura dada, una vez terminada la transformación provoca el crecimiento de los granos de la austenita.

2.5. TECNOLOGÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

La base fundamental del tratamiento térmico es la cinética que estudia las transformaciones de fases dependientes del tiempo.

Las propiedades y microestructuras de los aceros pueden ser modificadas y mejoradas, por medio de ciertos tratamientos térmicos como el recocido, normalizado, temple y revenido entre los más utilizados.

2.5.1. RECOCIDO

El recocido es un término general que se utiliza para describir la restauración a sus propiedades originales de una aleación trabajada en frío o con tratamiento térmico, a fin de incrementar la ductilidad y por ende, la conformabilidad, reducir la resistencia mecánica y la dureza o por tanto, para modificar la microestructura. También es utilizado para aliviar los esfuerzos residuales. Dentro del tratamiento térmico de recocido existen varios tipos del mismo, que se explican a continuación:

2.5.1.1. Recocido isotérmico

Son tratamientos de ablandamiento que consisten en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior o inferior según los casos (generalmente de 740° a 880°) y luego enfriar hasta una temperatura de 600°-700°, que se mantiene constante durante varias horas, para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita y finalmente, se enfría al aire. Este tratamiento es muy rápido y se obtienen durezas muy bajas, tiene la ventaja de ser mucho más rápido que los recocidos ordinarios de enfriamiento lento, el recocido isotérmico es muy interesante para los aceros de herramientas de alta aleación.

Proceso

- Calentar el acero hasta llevarlo al estado austenítico completo y mantenerlo a esas condiciones.
- Enfriamiento del acero en un horno de aire caliente o baño de sales fundido hasta una temperatura comprendida entre los 600° y 700°C.
- Mantenimiento a temperatura constante, durante el tiempo necesario para que se produzca la transformación isotérmica de toda la austenita.
- Enfriamiento al aire.

Las ventajas desde el punto de vista estructural, es que la estructura obtenida es más homogénea, porque la temperatura se iguala en toda la masa del metal, durante el tiempo de permanencia a temperatura constante, vale decir que de esta manera, la transformación en toda la masa se produce con la misma velocidad de enfriamiento.

El recocido isotérmico también, permite mejorar la maquinabilidad y el grado de terminación superficial, reduce el riesgo de deformaciones.

2.5.1.2. Recocido Incompleto

Durante el recocido incompleto, la pieza de trabajo se recuece para restaurar su ductilidad, la cual se ha perdido en parte o completamente mediante el endurecimiento por trabajo durante el trabajo en frío. Posteriormente, la pieza se puede seguir trabajando hacia la forma final deseada.

2.5.1.3. Recocido de Recristalización

Todos los metales luego de ser trabajados en frío sufren un alargamiento de su estructura, por lo que resulta complicado volver a ser maquinados, para ello se realiza un recocido de recristalización.

El recocido de recristalización consiste en calentar la pieza hasta una temperatura dada por la aleación del material, mantenerlo un cierto tiempo y enfriarlo dentro del horno, éste proceso debe realizarse con atmosfera de gases.

2.5.1.4. Recocido de Alivio de tensiones

Para reducir o eliminar esfuerzos residuales, una pieza es comúnmente sometida a un recocido de alivio de esfuerzos.

El recocido de alivio de esfuerzos consiste en calentar la pieza a una temperatura no tan elevada como la de austenización, a fin de evitar transformaciones de fase. Luego se emplea un enfriamiento lento, como el que ocurre al aire. El alivio de esfuerzos a través de éste recocido promueve la estabilidad dimensional y también reduce la tendencia hacia el agrietamiento por esfuerzo.

2.5.1.5. Recocido de homogeneización

Las piezas fundidas y lingotes de aceros aleados se someten al recocido de homogeneización para disminuir su licuación dentrítica. El metal se calienta hasta 1100-1200°C, luego se mantiene un tiempo adecuado dependiendo del acero para luego someter a la pieza a un enfriamiento lento. Tras la homogeneización el acero tiene grano grueso.

2.5.1.6. Recocido de Esferoidización

Como resultado de éste tipo de recocido se obtiene la estructura de perlita granular, durante el recocido de esferoidización el enfriamiento debe ser lento con tal de garantizar la descomposición de la austenita. Los aceros con estructura perlítica granular son los menos propensos al sobrecalentamiento, formación de grietas y deformación durante el temple.

2.5.2. NORMALIZADO

El normalizado es un tratamiento no endurecedor que se aplica específicamente a los aceros y que consiste en austenitizar el material es decir llevarlo a una temperatura de austenitización, mantenerlo a esa temperatura durante un tiempo establecido y después enfriarlo en condiciones de convección natural de aire o ligeramente forzado. De esta manera se deja el acero con una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales en su composición.

Beneficios después de la normalización:

- Una mejor maquinabilidad.
- Refinamiento de tamaño de grano.
- Modificación de los esfuerzos residuales.

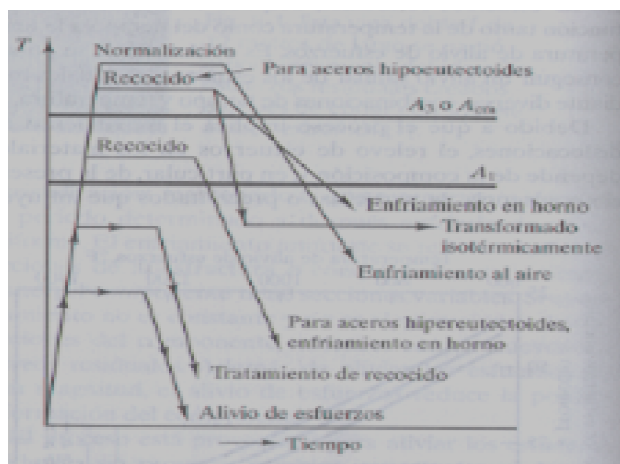


Figura 2. 7 Ciclos de calentamiento y enfriamiento de los diferentes tratamientos térmicos entre ellos el normalizado.²⁶

2.5.2.1. Normalizado de aceros al carbono.

Tabla 2.1. Temperaturas típicas de normalización para aceros al carbono²⁷

Acero AISI	Temperatura de normalización en °C
1015	900° a 925°C
1020	900° a 925°C
1035	900° a 925°C
1040	870° a 900°C
1045	845° a 870°C

²⁶ MANGONON, Pat; Ciencia de materiales selección y diseño; Primera edición; Pearson; México; 2007. Pag321.

²⁷ GRINBERG, María; Tratamientos térmicos de los aceros y prácticas de laboratorio; Editorial: Limusa; México; 1986.

1050	845° a 870°C
1060	815° a 845°C
1095	815° a 845°C

2.5.2.2. Normalizado de aceros aleados

En el caso de los aceros aleados que vayan a ser templados el normalizado es un proceso previo al que deben ser llevados.

Tabla 2. 2. Temperaturas típicas de normalización para aceros aleados³⁰

Acero AISI	Temperatura en °C	Acero AISI	Temperatura en °C
4032	900	8620	925
4140	870	8650	870
4340	870	9260	900
5120	925	81B45	870

Según la experiencia es recomendable normalizar las piezas gruesas 50°C por encima de la temperatura recomendada en la tabla 2.3

2.5.3. AUSTEMPERING

Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego enfriarlo rápidamente en plomo o sales fundidas, a temperaturas comprendidas entre 250° y 600° permaneciendo el acero en el baño a esta temperatura durante el tiempo suficiente para que se verifique la transformación completa de la austenita en otros constituyentes a temperatura constante.

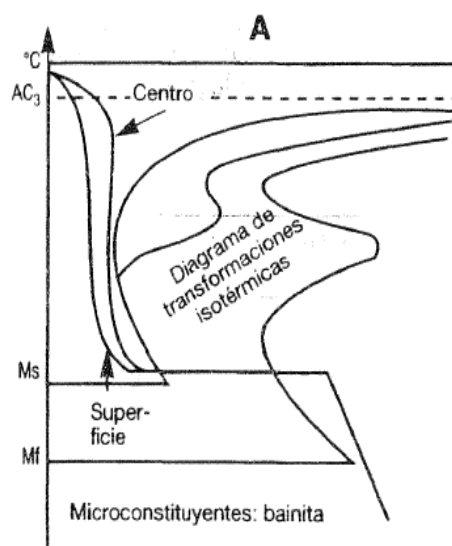


Figura 2. 8 Representación esquemática del Austempering en el diagrama TTT²⁸

Proceso

- Calentar el acero hasta llevarlo al estado austenítico completo.
- Enfriamiento del acero en un baño de sales fundido hasta una temperatura comprendida entre la temperatura martensítica y 450°. Tiene que ser suficientemente rápido para evitar la formación de perlita.
- Mantenimiento a esa temperatura hasta que toda la austenita se ha transformado en bainita.
- Enfriamiento al aire.

Esta forma de tratamiento isotérmico permite que la transformación de la austenita se realice simultáneamente en toda la masa del metal, con lo cual se logra reducir el valor de las tensiones residuales, distorsiones, riesgos de microfisuras, fisuras, roturas etc. y obtener una estructura bainítica y con valores de dureza variables desde 48 a 58 HRC.

²⁸ STURLA, ANTONIO; TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS, TEORÍA Y PRÁCTICA; TOMO II; ARGENTINA; 1998; PÁG. 150

2.5.4. MARTEMPERING

Es un tratamiento térmico que consiste en calentar el material a la temperatura temple, para luego sumergirlo en un medio (baño de sales) de enfriamiento cuya temperatura oscile entre 200° y 300°C y que se encuentra a una temperatura por encima de Ms y mantenerlo a esas condiciones durante un tiempo suficiente para igualar la temperatura en toda la masa del metal y luego enfriarlo al aire a temperatura ambiente.

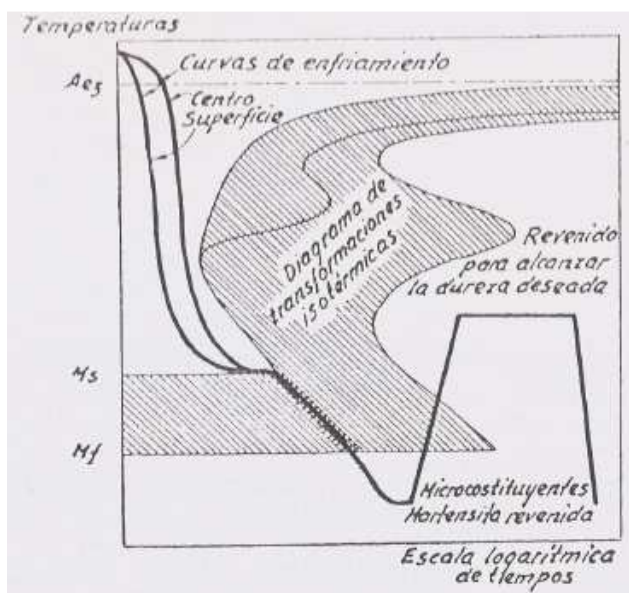


Figura 2. 9 Representaciones esquemáticas del Martempering²⁹

Factores del Martempering

Entre los factores que se deben tener en cuenta al realizar este tratamiento térmico se tiene:

- Composición química del material.
- Temperatura de calentamiento.
- Necesidad ineludible del conocimiento previo de la curva TTT.
- Tamaño de grano.
- Conocimiento del punto Ms
- Conocimiento del tiempo de permanencia sobre Ms para evitar que se forme la bainita.

²⁹ APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid;1971; pág. 285

- Dimensiones de la pieza.
- Condiciones de enfriamiento final.

Objetivos del Martempering

- Producir una estructura de temple desde una temperatura más baja que en el temple directo.
- Menores cambios volumétricos debido a la mayor cantidad de austenita retenida.
- Menor posibilidad de autorevenido de la martensita.
- Menor posibilidad que se produzca torceduras o deformaciones, dado que la transformación martensítica se realiza simultáneamente en toda la masa de la pieza.
- Disminución de tensiones internas.

Es muy importante que la temperatura del baño sea próxima y superior a M_s pues si fuera inferior parte de la austenita de la periferia se transformaría en martensita antes que el resto de la austenita del centro, y el proceso sería imperfecto.

La aplicación práctica de este tratamiento se ve limitada por la sección de la pieza y tipo de acero, puesto que el medio de enfriamiento no permite alcanzar la velocidad crítica de temple cuando las dimensiones del acero superan ciertos valores.

En los aceros al carbono el Martempering se aplica hasta un diámetro de la pieza en un máximo comprendido entre 10 y 12 mm para aceros aleados entre 20 y 30 mm.

2.5.5. TEMPLE

El temple es un tratamiento térmico que consiste en calentar un producto siderúrgico, durante cierto tiempo, a una temperatura generalmente por encima del punto crítico superior y luego enfriarlo bruscamente en medio líquido.

2.5.5.1. Objetivos del temple

Con el temple se persiguen objetivos entre los que se encuentran obtener una estructura martensítica que modifica las distintas propiedades del acero tratado térmicamente.

2.5.5.2. Factores del temple

Los factores que tienen relación directa con el temple son:

- a) Composición química y estado estructural del producto siderúrgico antes del Temple.
- b) Temperatura de temple.
- c) Tiempo de calentamiento.
- d) Velocidad de enfriamiento.

2.5.5.3. Fases del temple

Al elevarse la temperatura la estructura de la perlita se transforma a austenita, y durante un enfriamiento brusco, esta nueva estructura no tiene el tiempo suficiente para reordenarse ocasionando por lo tanto.

El proceso de realización del temple comprende dos fases, a saber:

- a) Calentamiento del producto siderúrgico hasta determinada temperatura.
- b) Enfriamiento rápido generalmente en un medio líquido.

2.5.5.4. Velocidad de enfriamiento durante el temple

Los medios para templar, deben proporcionar una alta velocidad de enfriamiento a temperatura de estabilidad mínima de la austenita, para prevenir su descomposición en la mezcla ferrita cementita.

Para suprimir la transformación bainítica frecuentemente la velocidad de enfriamiento debe ser mayor que en la zona de temperaturas de transformación perlítica. Sin embargo es conveniente un enfriamiento lento en el campo de temperaturas de transformación martensítica (por debajo del punto M_c), para

evitar la formación de altas tensiones internas que provocan la deformación del acero templado y la formación de grietas.

En calidad de medios para templar para los aceros al carbono y de baja aleación que tienen alta velocidad crítica de enfriamiento se emplea el agua a una temperatura de 20-30°C y distintas soluciones acuosas para los aceros aleados con alta estabilidad de la austenita sobreenfriada, se emplea aceite y aire.

Al sumergir el metal caliente en agua, aceite y otros líquidos hirvientes, al principio, alrededor del acero que se enfría se forma una camisa de vapor (ebullición de capas), la velocidad de enfriamiento es relativamente pequeña; luego, el líquido en la superficie de ésta comienza a hervir, se crea un contacto directo del líquido con el metal formando burbujas de vapor (ebullición de burbujeo), transcurre a gran velocidad; y, por debajo de la temperatura de ebullición el enfriamiento transcurre a una velocidad pequeña, fundamentalmente a cuenta de la convección.

El agua como medio para templar posee una gran velocidad de enfriamiento, pero tiene una serie de defectos. En primer lugar el agua tiene una etapa destacada de ebullición en capas, que se extiende en un amplio intervalo de temperaturas. En segundo lugar, el poder refrigerante se reduce bruscamente al aumentar su temperatura; además, el agua crea una alta velocidad de enfriamiento en la zona de temperatura de formación de martensita (250-300 °C / seg.).

Las propiedades de agua como medio para templar se mejoran agregándole sal común, sosa, álcalis, o ácido sulfúrico. En estas soluciones prácticamente se excluye totalmente la etapa de ebullición en capas lo que acelera el enfriamiento a altas temperaturas y lo hace más uniforme. Al mismo tiempo, en el intervalo de temperaturas de transformación martensítica estas soluciones poseen menor poder refrigerante que el agua. La capacidad de temple de las soluciones acuosas de sales y álcalis, como regla general es menos sensible al cambio de la temperatura.

El aceite mineral enfría en la zona de transformación perlítica en intermedia en forma más lenta que el agua y las soluciones acuosas. Sin embargo el aceite

como medio para temple posee algunas cualidades: una pequeña velocidad de enfriamiento en el intervalo de temperaturas de transformación martensítica a causa de su elevada temperatura de ebullición (250-300°). La capacidad de temple del aceite varía significativamente con el aumento de su temperatura de 20 a 150°C.

2.5.6. REVENIDO

El revenido es la operación final del tratamiento térmico que se realiza después del temple a fin de disminuir las tensiones internas y obtener estructura de mayor equilibrio

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Los fines que se consiguen con este tratamiento son los siguientes:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Modificar las características mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos:
- Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.
- Aumentar las características de ductilidad; alargamiento, estricción y las de tenacidad; resiliencia.

Los factores que influyen en el revenido son los siguientes: la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su

prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25mm de espesor o diámetro).

El acero templado se vuelve frágil, siendo inútil en estas condiciones, por eso se realiza el revenido. Este tratamiento térmico es para que las tensiones generadas en el acero no tengan tiempo de actuar provocando deformaciones o grietas, haciendo más tenaz y menos quebradizo el acero aunque disminuye algo su dureza.

CAPITULO 3

PREPARACIÓN DE PROBETAS, SELECCIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO Y EQUIPO A UTILIZARSE.

3.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS

Para el inicio del estudio se procedió a construir probetas para metalografía, para ensayos de tracción y charpy tanto para el acero AISI 1045 como para el acero AISI 1070 aunque en éste último el material en condiciones de suministro que se encontró no permitió la construcción de la probeta para el ensayo charpy.

3.1.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS METALGRÁFICAS

La preparación de las probetas metalográficas para los aceros AISI 1045 y AISI 1070 es la misma, con la única diferencia de que el acero AISI 1045 tiene mayor superficie de observación que el AISI 1070 puesto que en el mercado ecuatoriano solo se dispone en alambón de 9 mm de diámetro.

Corte del material

La muestra debe tener un tamaño adecuado de tal manera que pueda ser manipulado con facilidad para el pulido y el ataque químico. La muestra ha de mantenerse a temperatura ambiente durante la operación de corte para ello se debe usar un fluido refrigerante colocado correctamente al momento de cortar las probetas.

Desbaste grueso

Este tipo de desbaste permite la remoción de rebabas y todas las rayaduras producidas en el corte, esto se logra ejerciendo una presión uniforme de la probeta sobre el disco de la desbastadora provista de lija número 80. Durante ésta operación se debe regular el caudal de agua para mantener fría la probeta.

Desbaste Fino

En éste tipo de desbaste el objetivo es remover la zona deformada causada por los procesos anteriores, para ello se utilizó el equipo para desbastado fino que contiene lijas número 240, 320, 400, 600 granos/pulg ordenadas de forma secuencial. Para obtener buenos resultados se deslizará la probeta en dirección opuesta al operario de manera que se formen líneas en una sola dirección y que conforme se aumente de número de lija se trate de eliminar las rayaduras aún presentes.

Pulido Grueso

En ésta operación de pulido se utiliza la pulidora de paño en la que se emplea como abrasivo alúmina de 1 micrón en suspensión. El objetivo es remover mediante la abrasión las zonas de metal deformado causado por el desbaste fino.

Pulido Fino

En ésta operación de pulido se utiliza alúmina de 0.3 micrones en suspensión en agua con lo que se obtiene las condiciones de superficie adecuadas para la observación de la microestructura ya que el efecto abrasivo se ha reducido de tal manera que la posibilidad de causar deformaciones en la superficie metalográfica es mínima. El movimiento de la probeta metalográfica en éste tipo de operación deberá ser en forma circular para evitar la formación de colas de cometa y conseguir una excelente apreciación de la microestructura.

Ataque Químico

El objetivo del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal en la muestra metalográfica, el proceso debe permitir observar claramente y diferenciar las partes de la microestructura. Para lograr esto se utiliza un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Las muestras pueden atacarse sumergiéndolas en un recipiente que contenga el reactivo durante el tiempo adecuado para evitar el sobreataque o sino utilizando un gotero que dosifique el reactivo sobre la muestra metalográfica.

3.1.1.1. Equipo para la preparación de probetas metalográficas.

Para la preparación de las probetas metalográficas se utilizan los equipos disponibles en el laboratorio de metalografía de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, que se muestran en las tablas 3.1, 3.2, 3.3.

Desbaste Grueso

Tabla 3. 1. Especificaciones técnicas de la desbastadora de Disco.

	EQUIPO	Desbastadora de disco.
	MARCA	BUEHLER
	MODELO	121-OM-84
	VOLTAJE	110
	POTENCIA (HP)	1
	MEDIO ABRASIVO (granos/pulg)	Lija 80
	MEDIO DE ENFRIAMIENTO	Agua

Desbaste Fino

Tabla 3. 2. Especificaciones técnicas del banco de pulido.

	EQUIPO	Banco de pulido.
	MARCA	BUEHLER
	MODELO	39-1470-AB
	MEDIO ABRASIVO (granos/pulg)	Lijas 240,320,400,600
	MEDIO DE ENFRIAMIENTO	Agua

Pulido Grueso y fino

Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas de la pulidora de paño.

	EQUIPO	Pulidora de paño.
	MARCA	BUEHLER
	MODELO	115-RM-1850
	VOLTAJE	110
	POTENCIA (HP)	1
	MEDIO ABRASIVO (granos/pulg)	Pulido grueso: Alúmina 1 micrón. Pulido Fino: Alúmina 0.3 micrones.
	MEDIO DE ENFRIAMIENTO	Agua

3.1.2. PREPARACIÓN DE PROBETAS DE TRACCIÓN

Es importante describir el proceso de preparación de probetas de tracción, pues se trata de probetas de esmerada fabricación bajo las características de la norma INEN 109 (1973-11), en el presente estudio se fabricaron en el torno universal Nossoti las probetas del acero AISI 1045 mientras que las probetas del Acero AISI 1070 se cortaron a partir del alambroón en condiciones de suministro.

Ver ANEXO C y D.

3.1.2.1. Preparación de probetas de tracción del acero AISI 1045

Para determinar las propiedades de tracción del acero AISI 1045 se maquinaron probetas cilíndricas a partir de un eje de 20 mm, basadas en la norma INEN 109 (1973-11), en sus extremos con cabezales de rosca inglesa UNC de 19mm de diámetro y 10 hilos por pulgada.

En la figura 3.1 se muestra la probeta de tracción según la norma INEN 109 (1973-11).

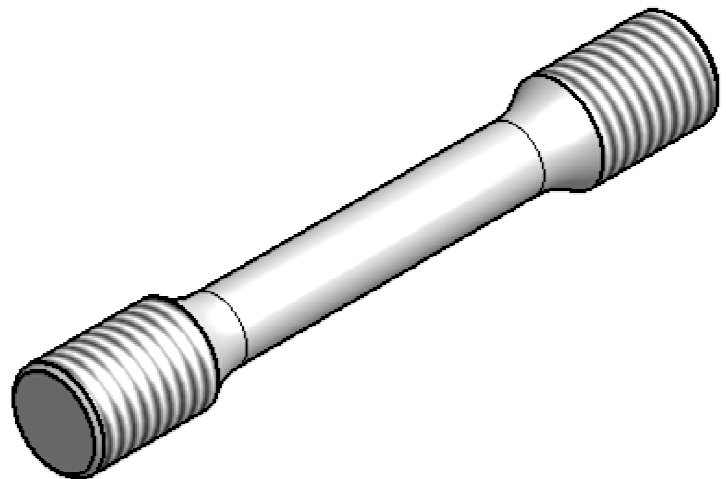
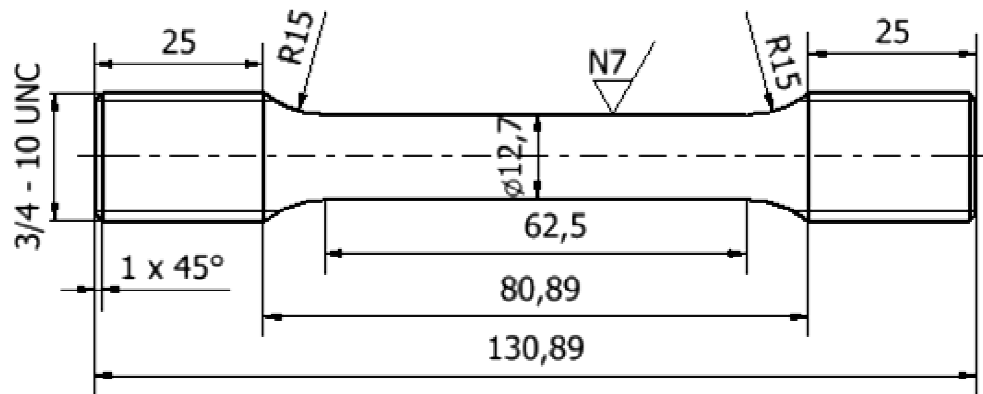




Figura 3. 1 Dimensiones de la probeta de tracción del acero AISI 1045.

Para una descripción más detallada de la preparación de probetas de tracción se presenta la hoja de procesos de la probeta de tracción del acero AISI 1045 en la tabla 3.4

Tabla 3. 4. Hoja de procesos de probeta de tracción AISI 1045.

HOJA DE PROCESOS					TRATAMIENTOS TERMICOS					
Nombre de la unidad: Probeta de tracción					TIEMPO DURACIÓN: 2:05					
POSICIÓN	CANT	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	OBSERVACIÓN					
1	1	PROBETA DE TRACCIÓN	AISI1045	131mmxØ20mm						
FASE	SUBFASE	N°	OPERACIONES	CROQUIS	RPM	ÚTILES		TIEMPOS		
						TRAB	CONTROL	EMPLEADO	MÁXIMO	
T	10	11	Puesta a punto					1	1.5	
		12	Refrentar superficie 1		250	CRE	CAL	5	7	
		13	Realizar agujero de centros en superficie 1		250	BRC		2	3	
O		21	Puesta a punto y colocar contra punto					1	1.5	
		22	Cilindrar superficie 2 hasta Ø19mm		250	CCE	CAL	10	15	
R		23	Cilindrar sup. 3 (25 mm un extremo y 80 mm en el centro) hasta Ø 12.7mm, avance automatico.		250	CCE	CAL	10	15	
		20	24	Dar radio de acuerdo (15 mm) en 4 y 5		250	CCE	CAL	10	12
N		25	Chaflan 1 x 45° en 6		10	CRO		2	3	
		26	Roscar sup. 7 (25 mm) UNC Ø19mm, 10 hilos por pulg.		10	CRO	CAL	15	20	
O		27	Chaflan 1 x 45° en 8		10	CRO		2	3	
		28	Roscar sup. 9 (25mm), rosca UNC Ø19mm, 10 hilos por pulg.		10	CRO	CAL	15	20	

AJUSTAJE	10	11	Cortar la probeta en superficie 10		250	CCE	CAL	5	6
TORNO	10	11	Puesta a punto					2	3
		12	Refrentar superficie 10		250	CCE	CAL	10	15
CODIGO DE UTILES: CRE: Cuchilla para refrentar exteriores. CCE: Cuchilla para cilindrar. CRO: Cuchilla para roscar. BRC: Broca de centro					TRATAMIENTOS TÉRMICOS				
					INGENIERÍA MECÁNICA				
					EPN				

3.1.2.1.1. Equipos para la realización de las probetas de tracción AISI 1045



Figura 3. 2 Sierra mecánica



Figura 3. 3 Torno Nossoti

3.1.2.2. Preparación de probetas de tracción del acero AISI 1070

Para determinar las propiedades de tracción del acero AISI 1070 se cortó el alambroc en segmentos de 300mm de longitud proporcionadas por Ideal Alambroc en diámetro de 9 mm. Basadas en la norma INEN 127 (1975-07), en la que no se deben maquinar sino más bien respetar distancia entre marcas ya establecida en la norma que para éste caso es 90,2 mm. En la Figura 3.4 se muestra la probeta de tracción según la norma INEN 127 (1975-07), ver **ANEXO D**.

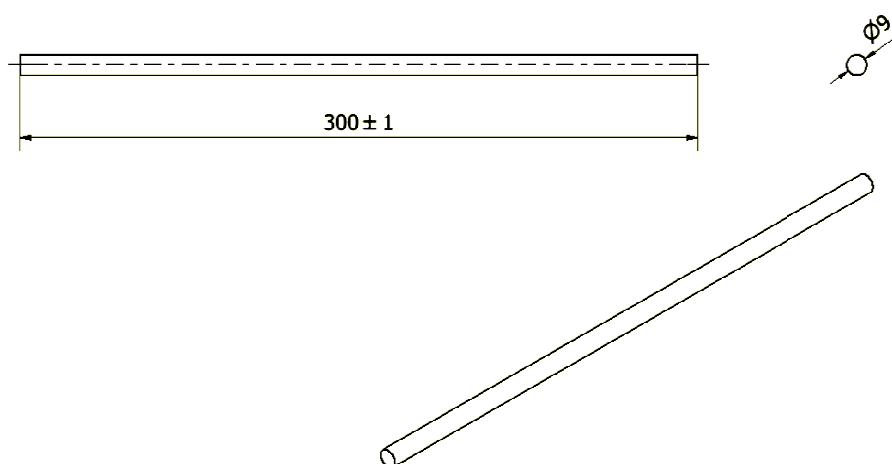


Figura 3. 4 Dimensiones de la probeta de tracción del acero AISI 1070

3.1.3. PREPARACIÓN DE PROBETAS CHARPY

Para determinar la propiedad de tenacidad del acero AISI 1045 se maquinaron probetas cuadrangulares a partir de una barra cuadrada de 12 x 12 x 60 mm con base en la norma INEN 130 (1973-03) con entalle en V, ver **ANEXO E**.

En la figura 3.5 se muestra las dimensiones de la probeta Charpy.

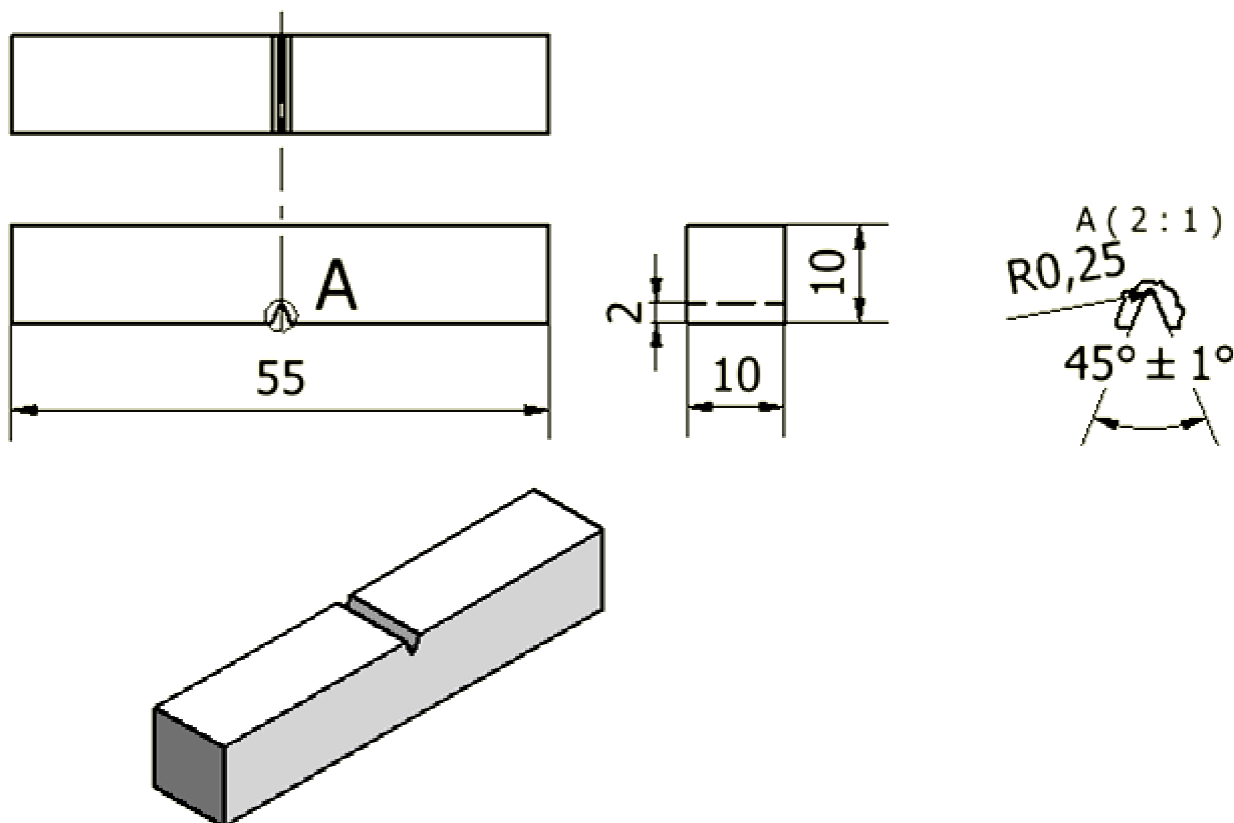




Figura 3.5 Dimensiones de la probeta Charpy según la norma INEN 130 (1973-03).

3.1.3.1. Procedimiento para la preparación de las probetas Charpy del acero AISI 1045.

A continuación en la tabla 3.5 se presenta la hoja de procesos para la construcción de probetas Charpy del acero AISI 1045 a partir del material en condiciones de suministro de dimensiones 12 x 12 x 60 mm.

Tabla 3. 5. Hoja de procesos de probetas charpy AISI 1045

HOJA DE PROCESOS				TRATAMIENTOS TÉRMICOS					
Nombre de la unidad: Probeta Charpy				TIEMPO DURACIÓN:55min					
POSICIÓN	CANT	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	OBSERVACIÓN				
1	1	PROBETA Charpy	AISI1045	60x12x12mm					
FASE	SUBFASE	N°	OPERACIONES	CROQUIS	Avan/min	ÚTILES		TIEMPOS	
						TRAB	CONTROL	EMPLEADO	MÁXIMO
L I M A D O R A	10	10	Puesta a punto		20	CRE	CAL	2	3
		11	Limar en superficie 1						
	20	21	Dar la vuelta y puesta a punto		20	CRE	CAL	3	4
		22	Limar en superficie 2 hasta longitud 55mm						
	30	31	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	3	4
		32	Limar en superficie 3						
	40	41	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	3	4
		42	Limar en superficie 4						
	50	51	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	4	5
		52	Limar en superficie 5 hasta 10.5 mm						
	60	61	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	4	5
		62	Limar en superficie 6 hasta 10.5 mm						
R E C T I F I C A D O R A	10	11	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	3	4
		12	Rectificar en superficie 3						
	20	21	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	3	4
		22	Rectificar en superficie 4						
30	31	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	4	5	
	32	Rectificar en superficie 5 hasta 10 mm							
40	41	Girar la pieza y puesta a punto.		20	CRE	CAL	4	5	
	42	Rectificar en superficie 6 hasta 10 mm							

AJUSTAJE	10	11	Dividir la probeta charpy en la mitad		20	CRE	CAL	3	4
		12	Trazar una línea en la mitad de la probeta						
LIMADOR A	10	11	Puesta a punto		20	CCE	CAL	5	8
		12	Crear entalle U en 7, exactamente en la mitad hasta 2mm de profundidad.						
CODIGO DE UTILES: CRE: Cuchilla para refrentar exteriores. CCE: Cuchilla para entalle en V. CAL: Calibrador.					TRATAMIENTOS TÉRMICOS				
					INGENIERÍA MECÁNICA				
					EPN				

3.1.3.2. Equipos para la preparación de probetas charpy



Figura 3. 6 Limadora.



Figura 3. 7 Rectificadora.

3.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN ESTADO DE SUMINISTRO (PROBETA TESTIGO)

En el presente estudio se consideró importante establecer las propiedades del material utilizado, para asegurarse de que se iba a trabajar precisamente con aceros AISI 1045 y AISI 1070 que eran los que estaban propuestos en el tema de tesis.

3.2.1. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO AISI

Para éste primer análisis del material se fabricó probetas de tracción, charpy y metalografía las mismas que no fueron tratadas térmicamente sino ensayadas a partir de las condiciones de suministro del material.

3.2.1.1. Composición Química del acero AISI 1045

Este análisis fue realizado en el laboratorio de espectrofotometría de la compañía FUNDIRECICLAR S.A. Los valores de todos los elementos obtenidos por composición química se encuentran detallados en el **Anexo F**.

Tabla 3. 6. Composición química del acero AISI1045 según la norma ASTM A 108(Anexo G).

Porcentaje de cada elemento (%)			
Carbono	Manganeso	Fosforo (máx.)	Azufre (máx.)
0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05

Tabla 3. 7. Composición química del acero AISI 1045 utilizado.

Porcentaje de cada elemento (%)			
Carbono	Manganeso	Fosforo (máx.)	Azufre (máx.)
0.43	0.472	0.0017	0.0062

Con este resultado se comprueba que el material de estudio es un acero AISI 1045.

3.2.1.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 1045

Es importante determinar las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 en condiciones de suministro para ello se realizaron los diferentes ensayos mecánicos cuyos resultados se presentan en las tablas a continuación.

Tabla 3. 8. Ensayo de Dureza

Probeta	Dureza HRB					Promedio
	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 4	Dureza 5	
Suministro	84	83	84	85	84	84

Tabla 3. 9. Ensayo charpy

Probeta	Tenacidad	
	Lbf.pie	N.m
Suministro	30	41

Tabla 3. 10. Ensayo de tracción

Probeta	Diámetro (mm)	Carga Máxima (lbf)		Resistencia a la tracción		Esfuerzo de fluencia		Elongación en 50mm (%)
		lbf	N	Ksi	N/mm ²	Ksi	Mpa	
Suministro	12,53	19290	85806	101	696	61,3	423	28,3

3.2.1.3. Metalografía del acero AISI 1045

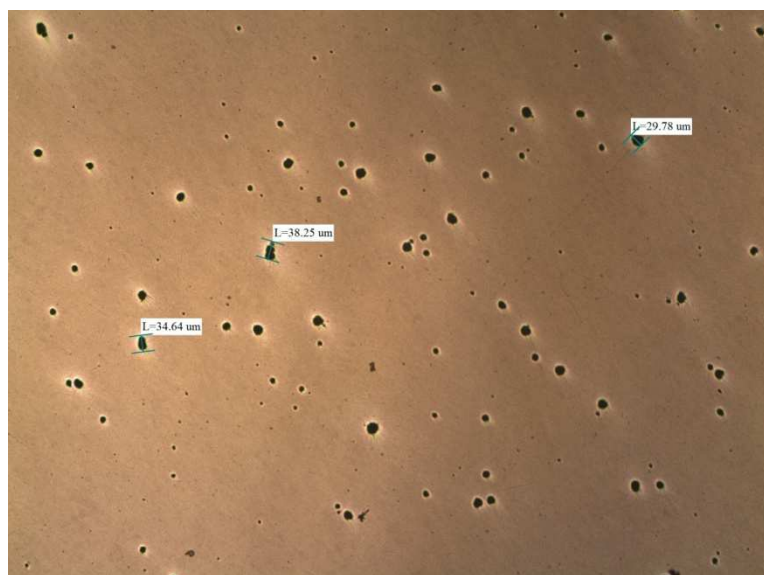


Figura 3. 8 Acero AISI 1045. Probeta en condiciones de suministro. Se muestra una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 38,25 μm . 100X



Figura 3.9 Acero AISI 1045. Probeta en condiciones de suministro. Acero ferrítico-perlítico de contenido medio de Carbono. Se observan inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 8. 100X.

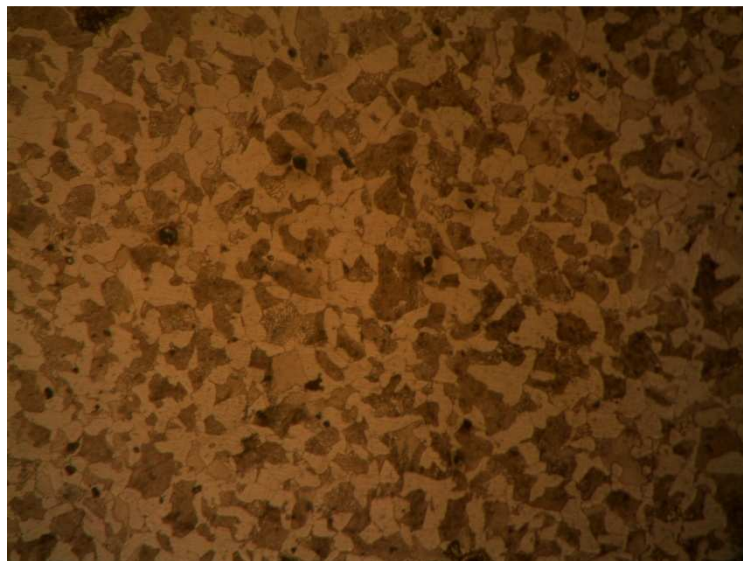


Figura 3.10 Acero AISI 1045. Probeta en condiciones de suministro. Acero de matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observan inclusiones tipo silicato. 500X.

De acuerdo a éste primer análisis metalográfico se puede concluir que se trata de un acero ferrítico-perlítico con un gran número de inclusiones.

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO AISI 1070

Se procedió al igual que el acero AISI 1045 a determinar las propiedades del acero que se va a estudiar, primero analizando su composición química y luego sus propiedades mecánicas a excepción del ensayo de tenacidad por la dificultad de las dimensiones del material para construir la probeta charpy.

3.2.2.1. Composición Química del acero AISI 1070

Este análisis fue proporcionado por la compañía ACINDAR de acuerdo a la colada N° 25773 que corresponde al acero tomado para el estudio. Los valores de todos los elementos obtenidos por composición química se encuentran detallados en el **Anexo B**.

En la tabla 3.11 se muestran los elementos que fueron tomados del **Anexo G**, según los estándares de calidad de la compañía ACINDAR para realizar la comparación de los elementos. En la tabla 3.12 se muestran los elementos que se utilizaron para realizar la comparación, según el ensayo de espectrofotometría.

Tabla 3. 11 Composición química del acero AISI 1070 según estándares de calidad.

Porcentaje de cada elemento (%)				
Carbono	Manganeso	Fosforo (máx.)	Azufre (máx.)	Si
0.68-0.75	0.60-0.90	0.035	0.04	0.15-0.35

Tabla 3. 12 Composición química del acero AISI 1070.

Porcentaje de cada elemento (%)				
Carbono	Manganeso	Fosforo	Azufre	Si
0.70	0.76	0.011	0.015	0.24

Con este resultado se comprueba que el material de estudio es un acero AISI 1070.

3.2.2.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 1070

Las propiedades mecánicas que se presentan a continuación son el resultado de los ensayos mecánicos realizados al material en condiciones de suministro, con la aclaración de que el ensayo de tenacidad no se pudo realizar por las dimensiones del material.

Tabla 3. 13. Ensayo de Dureza

Probeta	Dureza HRB					Promedio
	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 4	Dureza 5	
Suministro	89	90	89	91	90	90

Tabla 3. 14. Ensayo de tracción

Probeta	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Fuerza Máxima (N)	Resistencia Máxima (N/mm ²)	Fuerza de fluencia (N)	Resistencia de fluencia (N/mm ²)
Suministro	9	63.62	68951	1084	61152	961

3.2.2.3. Metalografía del acero AISI 1070

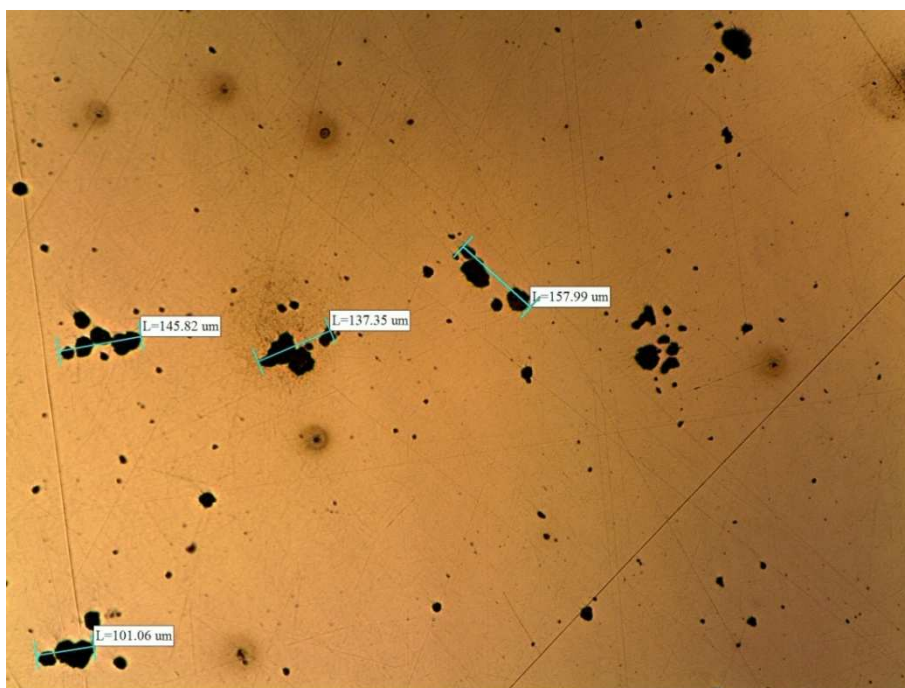


Figura 3.11 Acero AISI 1070. Probeta en condiciones de suministro. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 101,06 mm. 100X

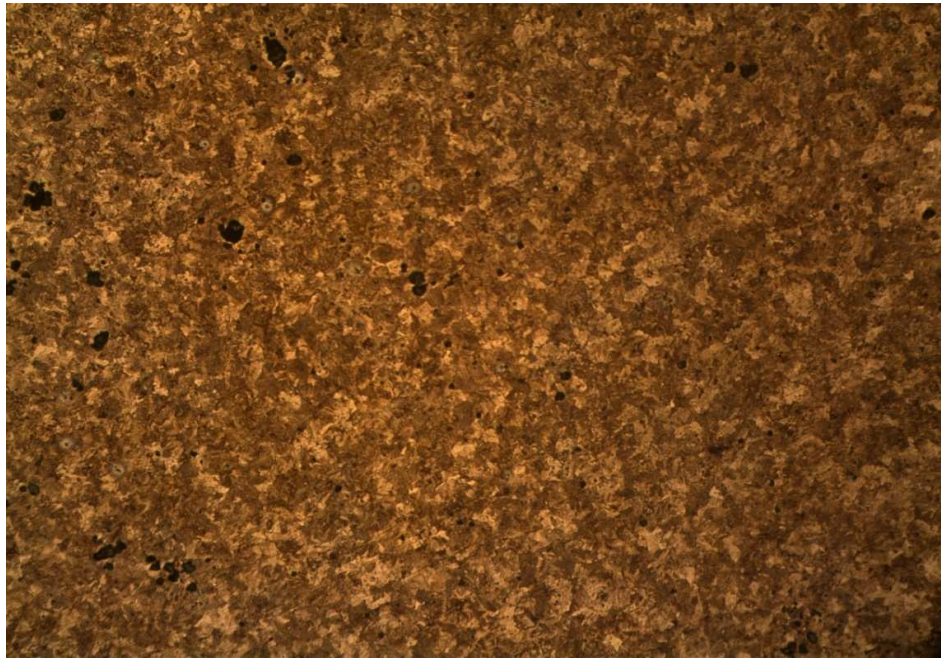


Figura 3.12 Acero AISI 1070. Probeta en condiciones de suministro. Acero ferrítico-perlítico de alto contenido de Carbono. Se observan inclusiones tipo silicato. 100X

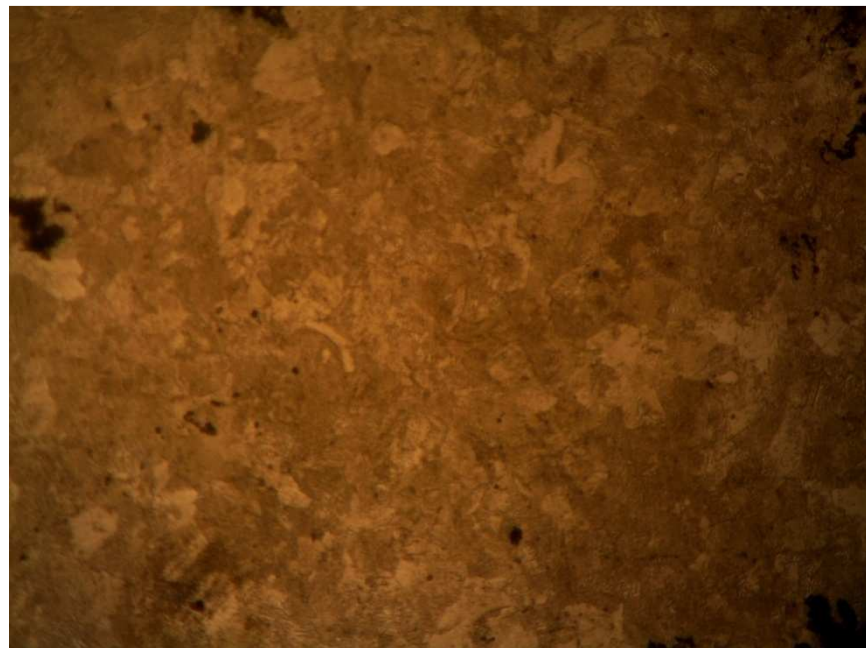


Figura 3.13 Acero AISI 1070. Probeta en condiciones de suministro. Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observan inclusiones tipo silicato. 500X

3.3. CODIFICACIÓN DE LAS PROBETAS

Previamente a la realización de los tratamientos térmicos sobre las probetas es conveniente codificarlas.

El proceso de codificación ha sido realizado teniendo en cuenta el tratamiento que se va a realizar es decir considerando la T° de enfriamiento y el medio.

La codificación a utilizar para el análisis de resultados se observa en la Tabla 3.15.

Tabla 3. 15 Codificación de las probetas para el estudio.

	Suministro	600°C	500°C	380°C	200°C	En Aceite	En Agua	Al Aire
AISI 1045	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
AISI 1070	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7

3.4. SELECCIÓN DEL RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO A UTILIZARSE EN CADA PROBETA

Para establecer el régimen de tratamiento térmico para los dos aceros se escogió una temperatura de austenización adecuada según el diagrama Fe – C, en el caso de la temperatura de precalentamiento y tiempo de permanencia fueron datos proporcionados por un técnico de Boehler quien facilitó sus instalaciones para los tratamientos térmicos del presente estudio. Es necesario decir que las temperaturas a las que se permitió realizar en el enfriamiento fueron establecidas por la empresa ya mencionada por lo que no se tuvo la posibilidad de una mayor variedad de temperaturas.

3.4.1. RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI 1045

En la etapa de calentamiento se procede a llevar la pieza hasta una temperatura de precalentamiento a 500 °C, para luego calentar la pieza hasta la temperatura de austenización de 850°C en donde se mantendrá un tiempo de permanencia establecido de 20 min para finalmente proceder a realizar los enfriamientos a

diferentes temperaturas y utilizando diferentes medios de enfriamiento, todo éste proceso de precalentamiento y calentamiento aproximadamente en un tiempo de 1 hora y veinte minutos. En la figura 3.13 se observa el proceso realizado para la etapa de calentamiento y tiempo de permanencia del material.

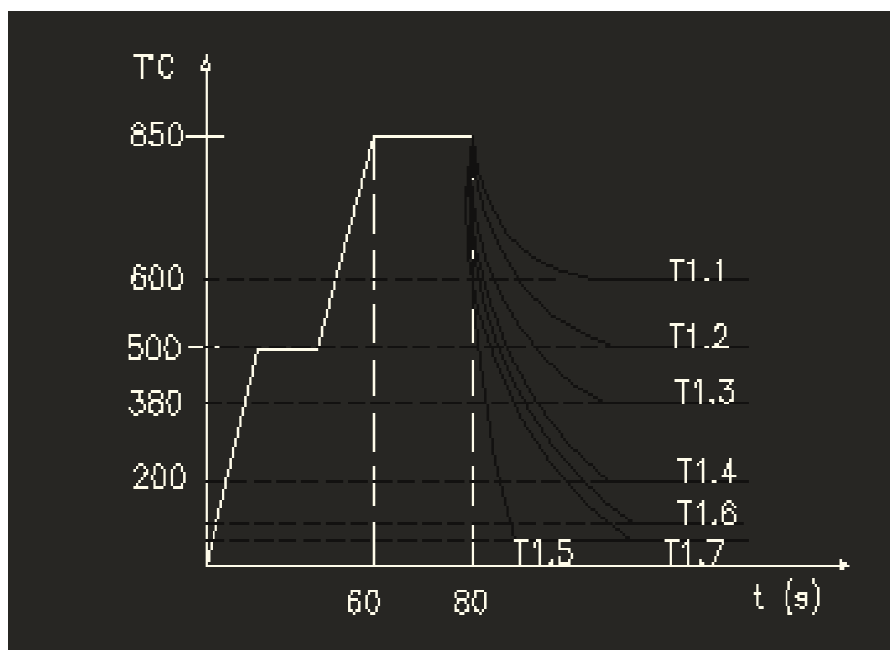


Figura 3.14 Etapa de calentamiento y tiempo de permanencia del acero AISI 1045.

3.4.2. RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI 1070

El régimen de tratamiento térmico para el acero AISI 1070 es el mismo que el del acero AISI 1045 con la diferencia de que la T° de austenización es de 790 °C, y que a continuación se muestra.

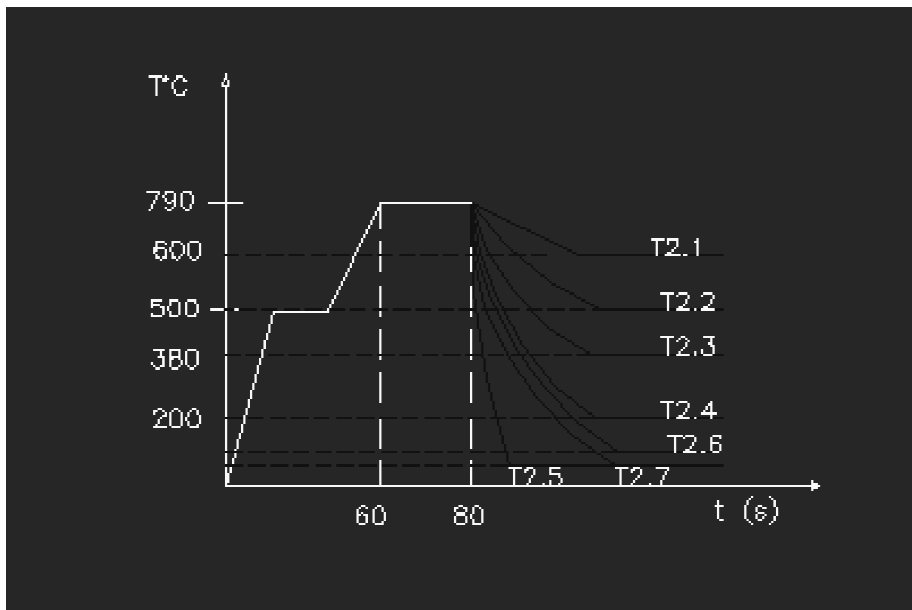


Figura 3.15 Etapa de calentamiento y tiempo de permanencia del acero 1070.

3.5. EQUIPOS UTILIZADOS PARA CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DURANTE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS



Figura 3.16 Horno N°1 para Pre calentamiento.



Figura 3.17 Horno N°3 para calentamiento hasta temperatura de austenización.



Figura 3. 18 Horno N°7 para enfriamiento isotérmico a 600 °C.



Figura 3. 19 Horno N5 para enfriamiento isotérmico a 500°



Figura 3. 20 Horno N5 para enfriamiento isotérmico a 380°C.



Figura 3. 21 Horno N°2 para enfriamiento isotérmico a 200°C.



Figura 3. 22 Contenedor N°1 para enfriamiento en agua.



Figura 3. 23 Contenedor N°2 para enfriamiento en ac eite.

CAPITULO 4

ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS LUEGO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.

4.1. ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro, existe una gran variedad de pruebas de dureza pero las más usadas son Rockwell y Brinell. En el ensayo de dureza Brinell, una esfera de acero duro se oprime sobre la superficie del material. Se mide el diámetro de la huella causada y se calcula el índice de dureza a partir de una ecuación. En cambio el ensayo de dureza Rockwell utiliza una pequeña bola de acero para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros. En la figura 4.1 se muestra las dos pruebas de dureza.



Figura 4.1 Ensayos de Dureza Rockwell y Brinell.³⁰

4.1.1. EQUIPO PARA ENSAYO DE DUREZA

Para la determinación de la dureza en la escala HRB se utilizó el equipo Hardrocker provisto por el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. En la tabla 4.1 se observa el Durómetro del laboratorio que ha sido utilizado.

Tabla 4. 1 Especificaciones técnicas del Durómetro.

	EQUIPO	Durómetro
	MARCA	Hardrocker
	MODELO	150-A
	CARGA MÍNIMA (Kgf)	10
	CARGA MAXIMA (Kgf)	60,100, 150
	Aplicación de la carga de prueba.	Sistema de amortiguador hidráulico
	DISPLAY	Análogo
	INDENTADOR	De punta de acero Ø1/16 pulg.

4.1.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE DUREZA

- Colocar la pieza en el apoyo de la máquina.
- Seleccionar la escala en la que se desea medir.
- Mover lentamente el volante para poner en contacto el indentador con la superficie.
- Encerar el durómetro
- Seguir levantando el disco portaobjetos hasta que se quede una referencia marcada.
- Aplicar la carga adicional mediante la elevación de la palanca de carga y descarga según la escala.
- Dejar que actúe la carga aproximadamente 10-15 segundo.
- Eliminar la carga adicional regresando la palanca a su posición inicial.
- Tomar lectura según la escala, eliminar la lectura más alta y más baja, luego realizar el promedio de dureza

4.1.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA DEL ACERO AISI 1045 Y AISI 1070

Tabla 4. 2. Ensayo de dureza Acero AISI 1045

Temperatura de enfriamiento °C	Muestra	Dureza HRC					Promedio
		d1	d2	d3	d4	d5	
600	1.1	19	18	19	17	16	18
500	1.2	22	21	22	21	22	22
380	1.3	25	26	27	26	25	26
200	1.4	44	45	44	45	46	45
20/Aceite	1.5	50	50	49	51	50	50
20/Agua	1.6	58	57	59	58	58	58
Aire	1.7	13	15	14	13	15	14

Tabla 4. 3. Ensayo de dureza Acero AISI 1070

Temperatura de enfriamiento °C	Muestra	Dureza HRC					Promedio
		d1	d2	d3	d4	d5	
600	2.1	22	23	22	21	22	22
500	2.2	26	27	25	26	26	26
380	2.3	29	28	29	27	29	28
200	2.4	56	55	56	56	57	56
20/Aceite	2.5	58	57	58	59	57	58
20/Agua	2.6	63	62	64	63	64	63
Aire	2.7	15	16	15	14	15	15

4.2. ENSAYO CHARPY

El ensayo charpy permite analizar la fragilidad o resiliencia de un material, al someter una muestra o probeta a un golpe o impacto súbito a gran velocidad. Dicha probeta debe tener un entalle en V normalizado, la misma que se fija entre

dos soportes de la máquina de ensayos de tal modo que la arista precursora del péndulo incida en el corte.

4.2.1. EQUIPO PARA EL ENSAYO CHARPY

Las probetas charpy fueron ensayadas en la máquina universal de ensayos de impacto manual, provisto por el laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. En la tabla 4.4 se muestra el equipo para el ensayo charpy.

Tabla 4. 4. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos de impacto.

	EQUIPO	Máquina universal de ensayos de imp.
	MARCA	Tinius-Olsen
	ENSAYOS	Impacto
	DISPLAY	Análogo
	CAPACIDAD MAXIMA(lb.pie)	140
	PRESIÓN (lb.pie)	2

4.2.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE IMPACTO

- Mecanizar las probetas según la norma INEN 130 (1973-03).
- Encerar la máquina ubicando el péndulo en su posición inicial a la altura establecida por el equipo
- Ubicar la probeta en la pinza porta probetas y posicionar sobre el yunque.
- Dejar caer el péndulo que contiene el martillo.
- Tomar lectura de los resultados.

4.2.3. RESULTADO DEL ENSAYO CHARPY DEL ACERO AISI 1045

Tabla 4. 5. Ensayo charpy del Acero AISI 1045

Muestra	Tenacidad	
	Lbf.pie	N.m
1.1	35	46
1.2	32	43
1.3	11	15
1.4	8	11
1.5	4	5
1.6	2	2,7
1.7	31	42

4.3. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción se realizó por separado en el caso de los dos aceros estudiados debido a que las probetas de los aceros eran diferentes por lo tanto el procedimiento, el equipo con el que se hizo los ensayos son distintos.

4.3.1. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AISI 1045

- Mecanizar las probetas según la Norma INEN 109 (1973-11).
- Marcar la longitud inicial en cada probeta utilizando el equipo para marcación. La medida en este caso es de 50 mm.
- Medir el diámetro de la probeta con el calibrador en tres puntos diferentes.
- Colocar la probeta en la máquina de ensayo en los dispositivos de fijación.
- Encerar y ubicar la escala de carga según el material a ensayar.
- Regular la velocidad del ensayo.
- Accionar la máquina de ensayo.
- Tomar los datos que la maquina proporciona al final del ensayo.
- Retirar la probeta ensayada de los dispositivos de fijación.

4.3.2. EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AISI 1045

Las probetas de tracción del acero AISI 1045 fueron ensayadas en la máquina hidráulica universal de ensayos mecánicos provista por el laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Este equipo cuenta con un software denominado Navigator de Tinius Olsen el cual cuenta con plantillas para diferentes tipos de ensayos. En la tabla 4.6 se muestra el equipo para ensayos mecánicos.

Tabla 4. 6. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos mecánicos.

	EQUIPO	Máquina universal de ensayos.
MARCA	Tinius Olsen	
MODELO	Trebel	
CAPACIDAD MAXIMA	132000N	
APLICACIÓN DE CARGA	Sistema Hidráulico	
DISPLAY	Digital	
RECOLECCIÓN DE DATOS	Software Navigator	

4.3.3. EQUIPOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AISI 1070

Las probetas de tracción del acero AISI 1070 fueron ensayadas en la máquina hidráulica universal de ensayos mecánicos provista por el laboratorio de análisis de esfuerzos de la empresa Ideal Alambrec. Este equipo cuenta con un software denominado Navigator de Tinius Olsen el cual cuenta con plantillas para diferentes tipos de ensayos. En la tabla 4.7 se muestra el equipo para ensayos mecánicos.

Tabla 4. 7. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos mecánicos.

	EQUIPO	Máquina universal de ensayos.
	MARCA	Schenck
	MODELO	Trebel
	CAPACIDAD MAXIMA	120000N
	APLICACIÓN DE CARGA	Sistema Hidráulico
	DISPLAY	Digital
	RECOLECCIÓN DE DATOS	Software Navigator

4.3.4. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA EL ACERO AISI 1070

- Preparar las probetas de tracción según la norma INEN 127 (1975-07).
- Marcar la longitud inicial de la probeta utilizando el equipo de marcación. La medida para éste caso es de 50 mm
- Medir el diámetro de la probeta con un calibrador en tres lugares diferentes.
- Colocar la probeta en la máquina universal de ensayos.
- Encerar la máquina.
- Ubicar la escala de carga según el material a ensayar.
- Regular la velocidad del ensayo.
- Accionar la máquina de ensayo.
- Tomar los datos de la máquina obtenidos al final del ensayo (proporcionados por el software).
- Retirar la probeta ensayada.

4.3.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DE LOS ACEROS AISI 1045 Y AISI 1070

Tabla 4. 8. Ensayo de tracción del acero AISI 1045

Probeta	Diámetro (mm)	Carga Máxima (lbf)		Resistencia a la tracción		Esfuerzo de fluencia		Elongación en 50mm (%)
		lbf	N	ksi	N/mm ²	Ksi	N/mm ²	
1.1	12,65	22600	100530	115.9	799	72,2	498	18.8
1.2	12,3	21200	94302	115,1	794	84,1	580	21.6
1.3	12,38	23900	106313	127.9	883	101,5	700	18
1.4	12,68	39800	177039	203.2	1402			7,73
1.5	12,34	44400	197501	239.3	1651	176,3	1216	10,25
1.6	12,56	33100	147236	172,1	2107			5
1.7	12,18	19420	86384	107,6	742	63,3	437	28,4

En el caso de las probeta 1.6 templada en agua no se pudo terminar el ensayo de tracción debido a que la resistencia a la tracción es demasiado alta, lo que pondría en riesgo la funcionalidad de la máquina y que fue advertido por el encargado del laboratorio, debido a éste motivo se suspendió el ensayo en el valor registrado de 1188 N/mm². A partir de la dureza se toma el valor de la resistencia a la tracción que es 2107 N/mm². Tomado del catálogo de BOHLER ver **ANEXO H**.

Tabla 4. 9. Ensayo de tracción del acero AISI 1070

Probeta	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Fuerza Máxima (N)	Resistencia Máxima (N/mm ²)	Fuerza de fluencia (N)	Resistencia de fluencia (N/mm ²)
2.1	9	63.62	65533	1030	55759	876
2.2	9	63.62	69036	1085	59232	931
2.3	9	63.62	72283	1136	63620	1000
2.4	9	63.62		2011.05		
2.5	9	63.62		2109.15		
2.6	9	63.62		2432.88		
2.7	9	63.62	61432	966	55759	876

En el caso de las probetas 4, 5 y 6 para el enfriamiento a 200°C, temple en agua y temple en aceite respectivamente del acero AISI 1070, el ensayo de tracción no se pudo realizar con éxito puesto que las probetas al momento de ser colocadas

en la máquina de ensayos se rompieron a la mínima aplicación de carga, evidenciándose fragilidad debido a los valores de durezas alcanzados durante los tratamientos térmicos.

4.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

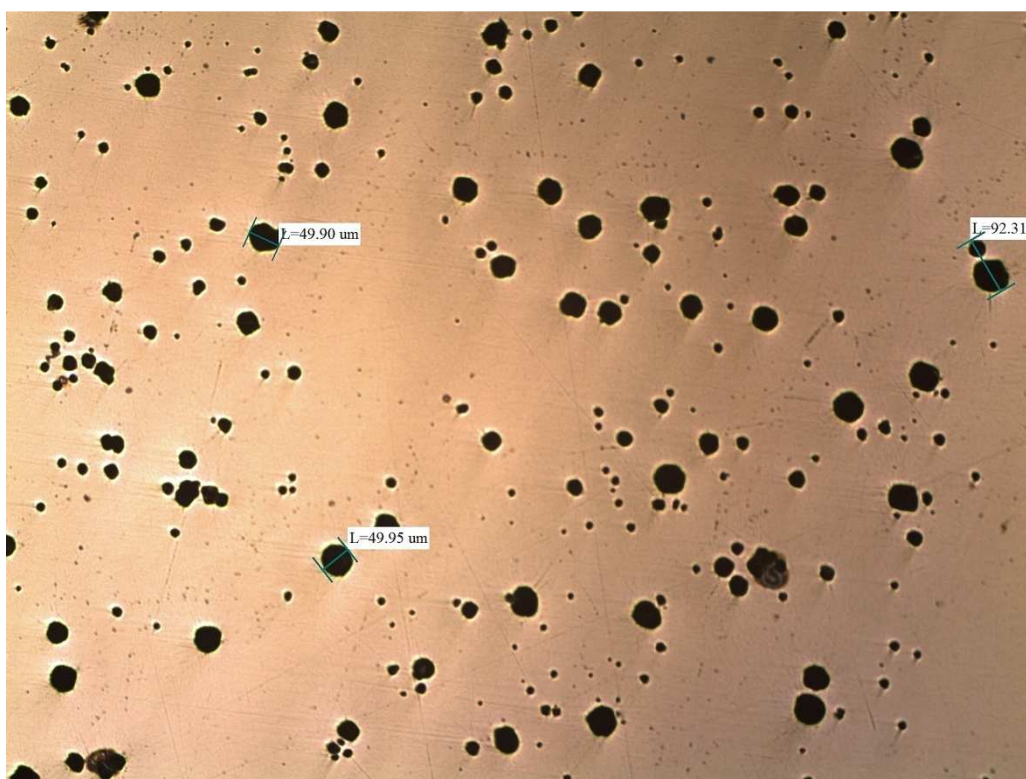


Figura 4.2 Acero AISI 1045, probeta 1.1 enfriada a 600° C. Se muestra una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 49,95 μm . 100X

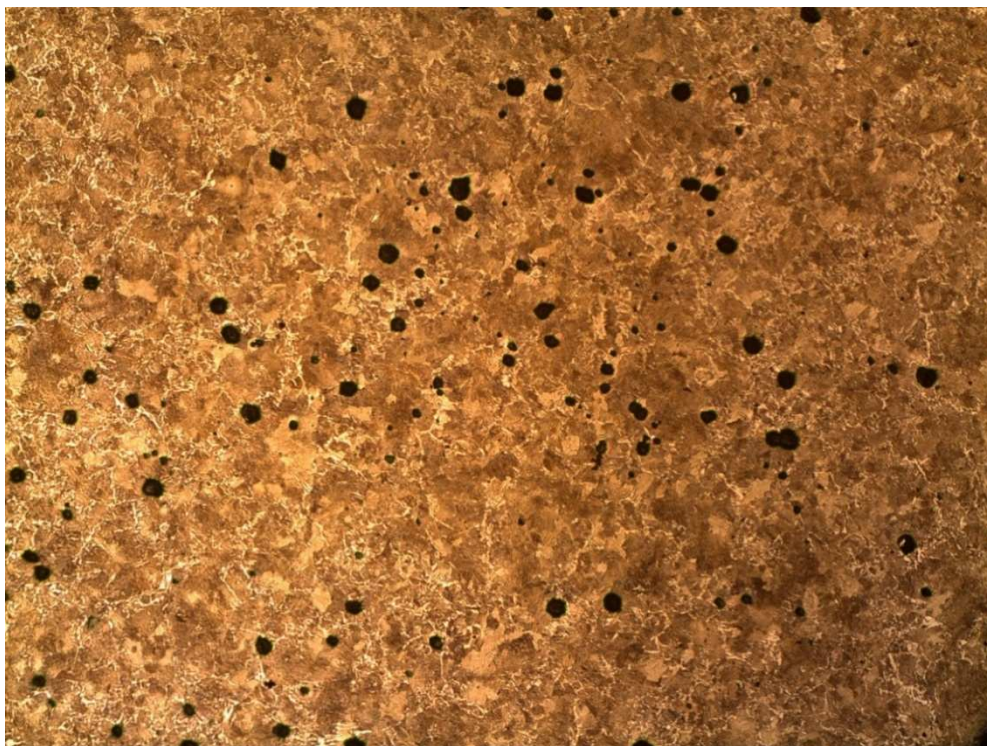


Figura 4.3 Acero AISI 1045, probeta 1.1 enfriada a 600° C. Acero ferrítico-perlítico de contenido medio de Carbono, tratado térmicamente. Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

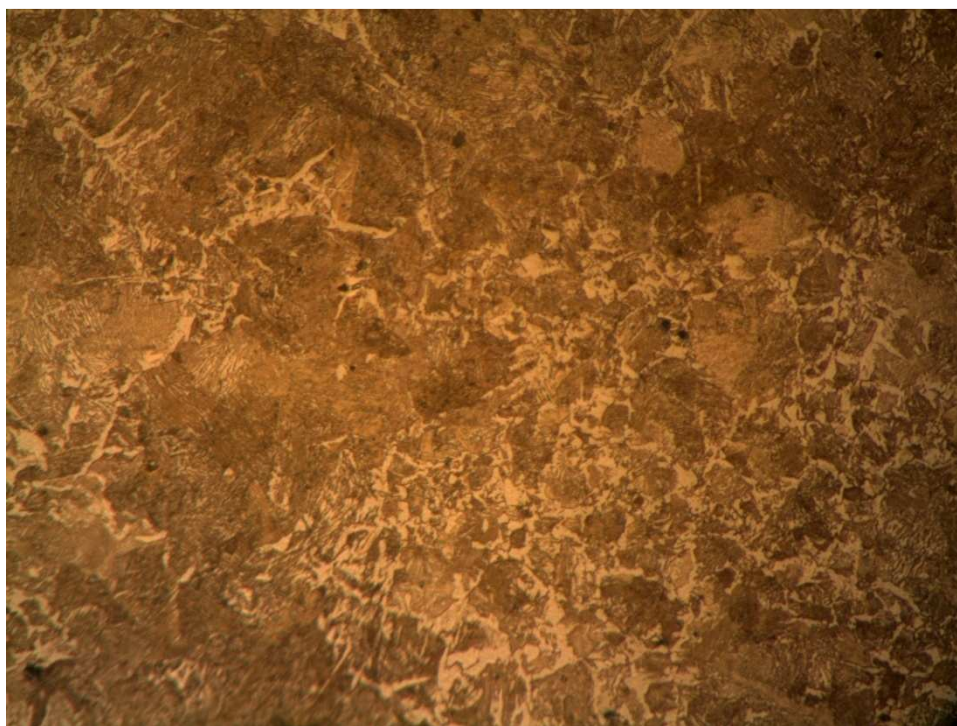


Figura 4.4 Acero AISI 1045, probeta 1.1 enfriada a 600° C. Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observa la presencia de perlita fina y ferrita acicular precipitada al borde de grano, con zonas de perlita laminar. 500X

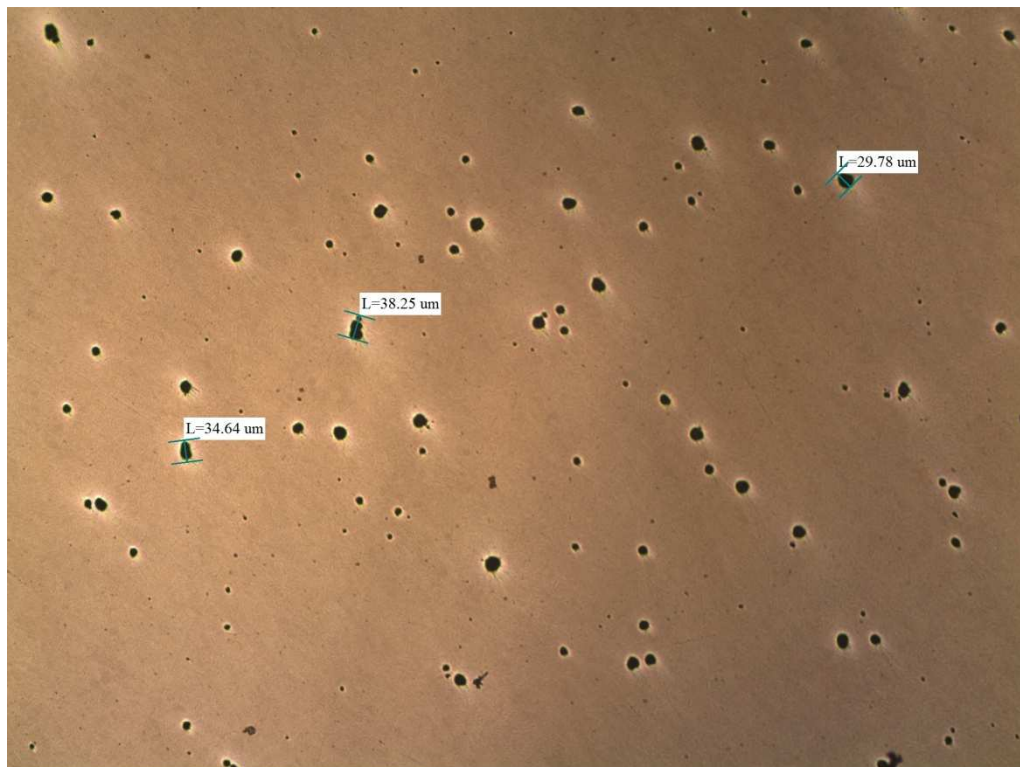


Figura 4.5 Acero AISI 1045, probeta 1.2 enfriada a 500° C. Se muestra una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 38,25 μm. 100X

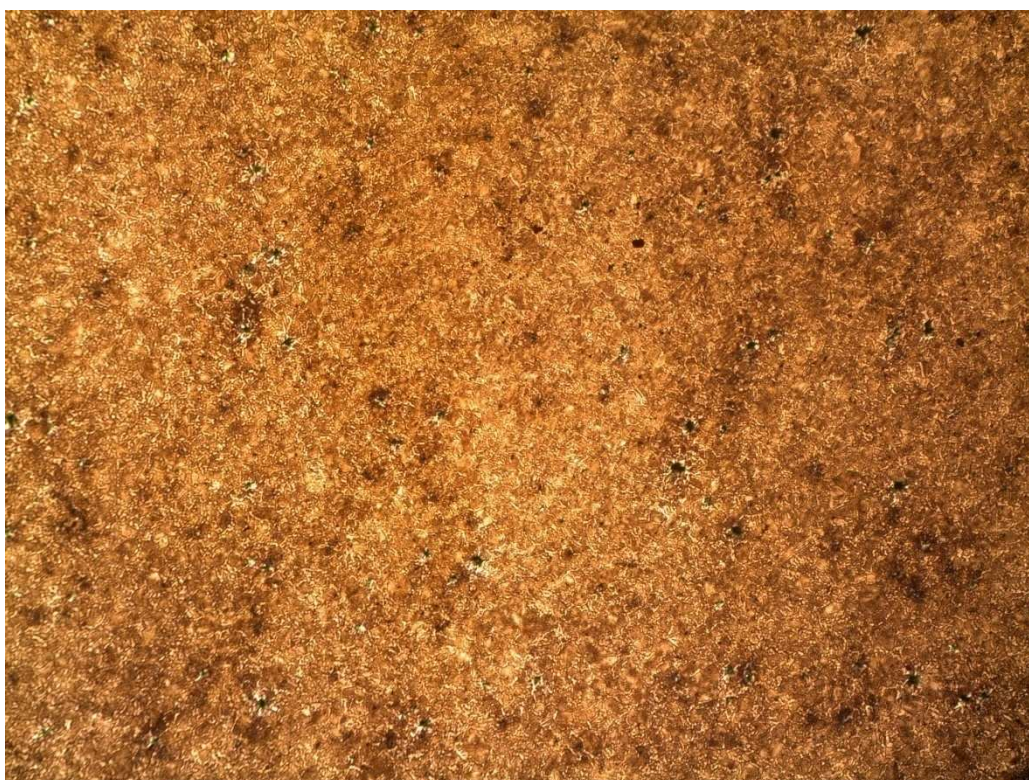


Figura 4.6 Acero AISI 1045, probeta 1.2 enfriada a 500° C. Acero ferrítico-perlítico de contenido medio de Carbono, tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato. 100X



Figura 4.7 Acero AISI 1045, probeta 1.2 enfriada a 500° C. Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observa la presencia de perlita fina y sulfuros de Manganeso. 500X

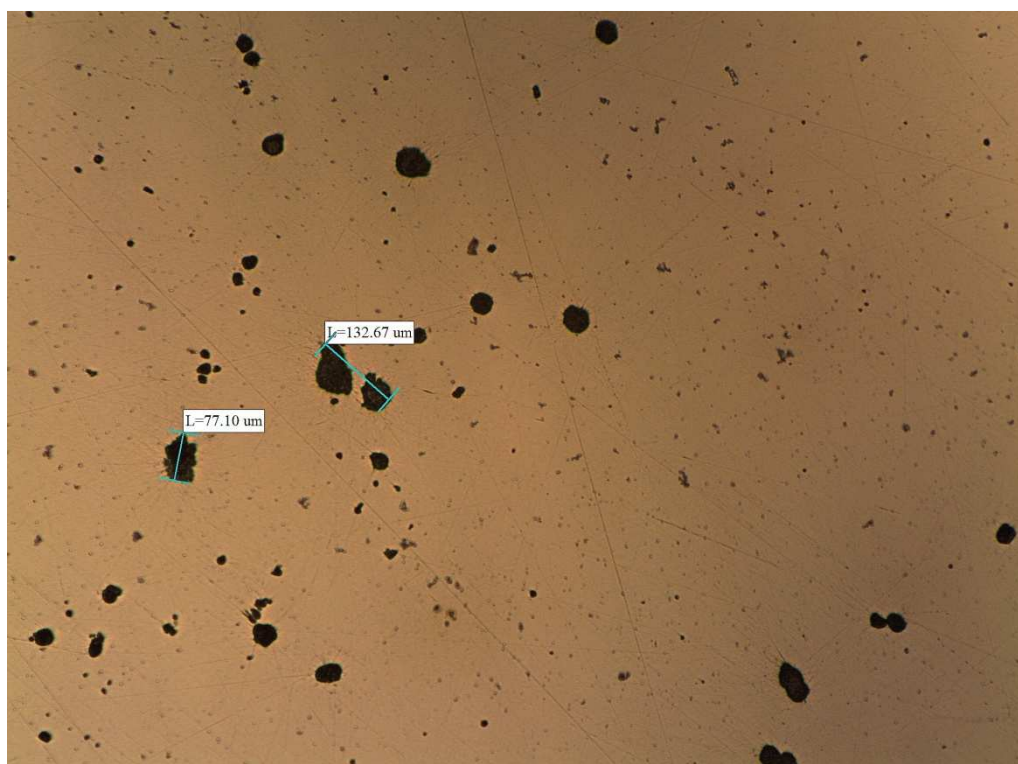


Figura 4.8 Acero AISI 1045, probeta 1.3 enfriada a 380° C. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 77,10 μm . 100X

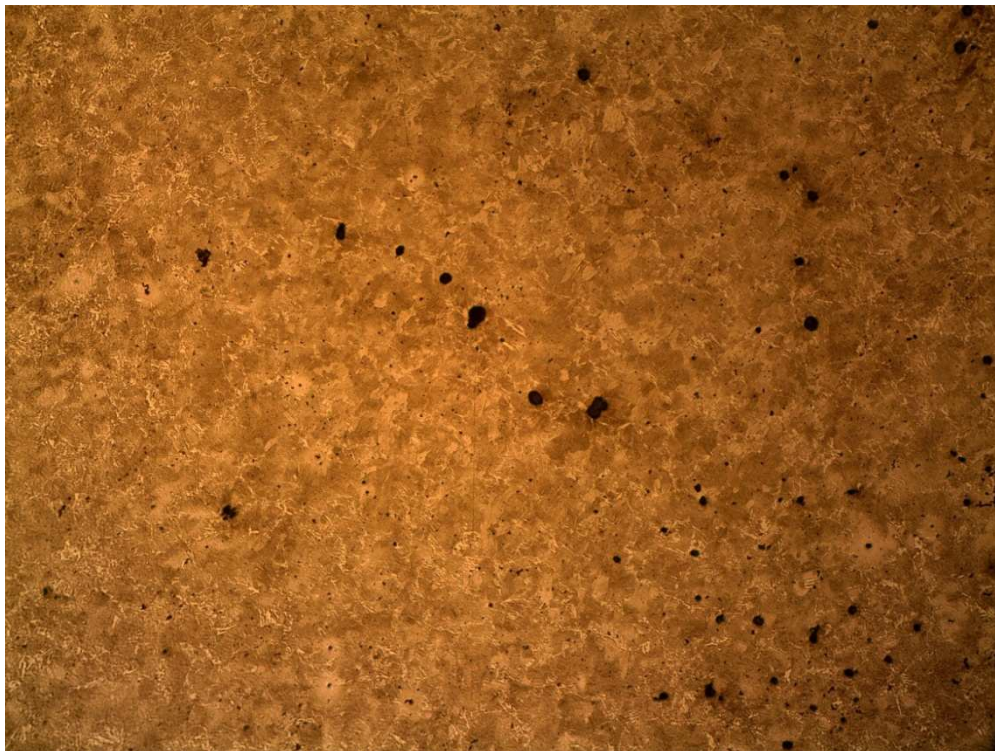


Figura 4.9 Acero AISI 1045, probeta 1.3 enfriada a 380°C . Acero ferrítico-perlítico tratado térmicamente, de contenido medio de Carbono. Se observan inclusiones tipo silicato. 100X

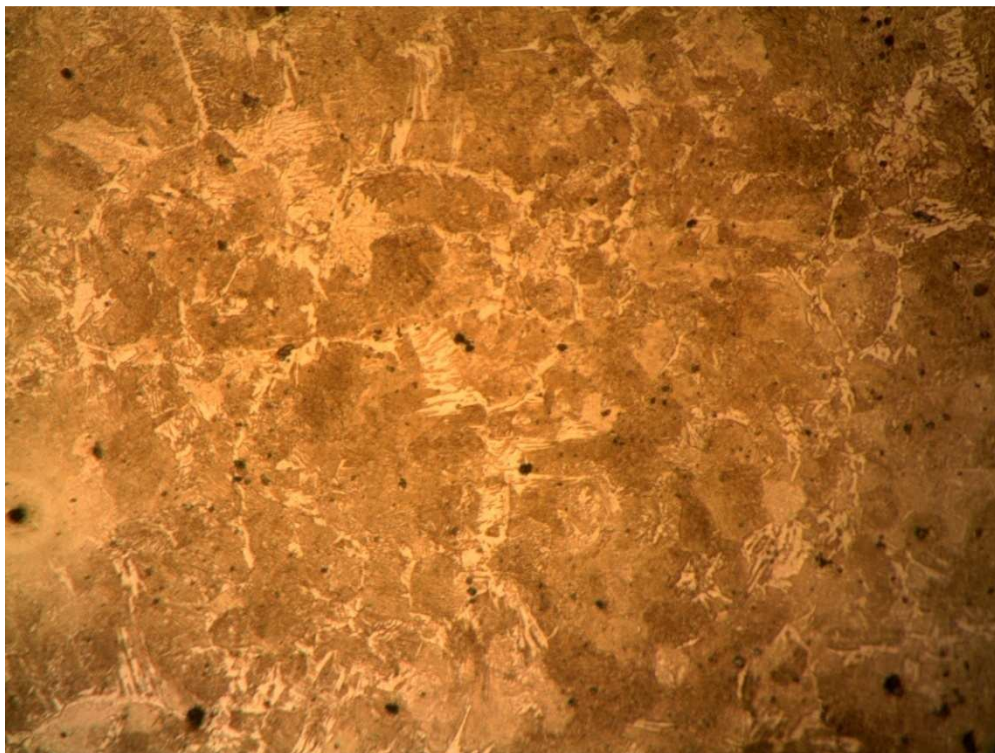


Figura 4.10 Acero AISI 1045, probeta 1.3 enfriada a 380°C . Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observa la presencia de perlita fina, ferrita acicular al borde de grano y bainita superior. 500X

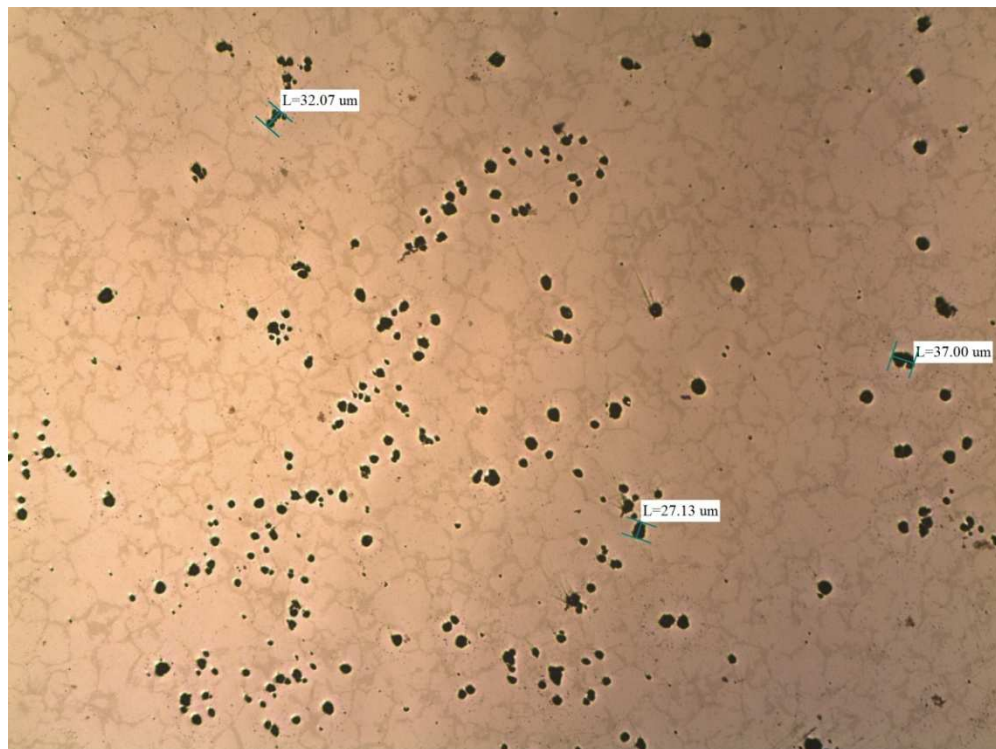


Figura 4.11 Acero AISI 1045, probeta 1.4 enfriada 200° C. Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 37,00 μm. 100X



Figura 4.12 Acero AISI 1045, probeta 1.4 enfriada 200° C. Acero bainítico tratado térmicamente, con Carburos de Cromo precipitados al borde de grano. Se observan inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

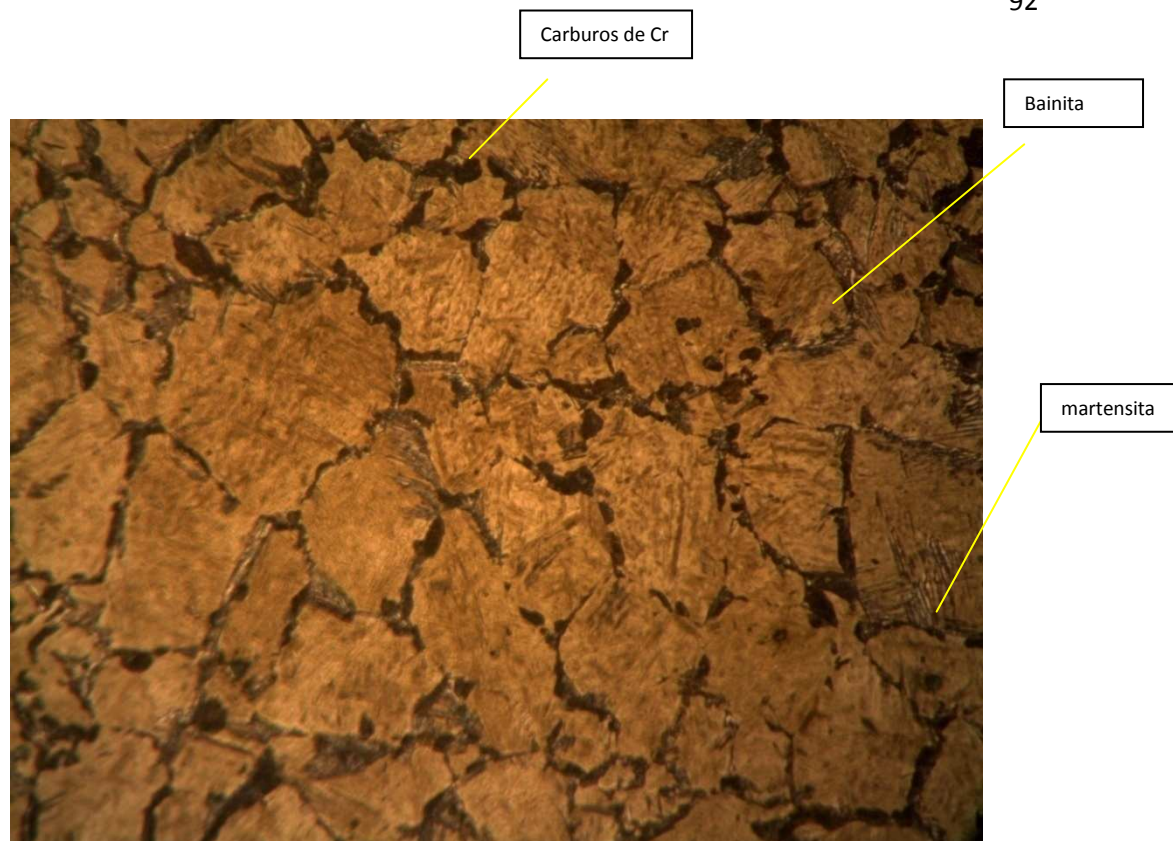


Figura 4.13 Acero AISI 1045, probeta 1.4 enfriada 200°C . Matriz metálica bainítica con carburos de Cromo precipitados al borde de grano. La microestructura muestra también zonas con martensita. 500X

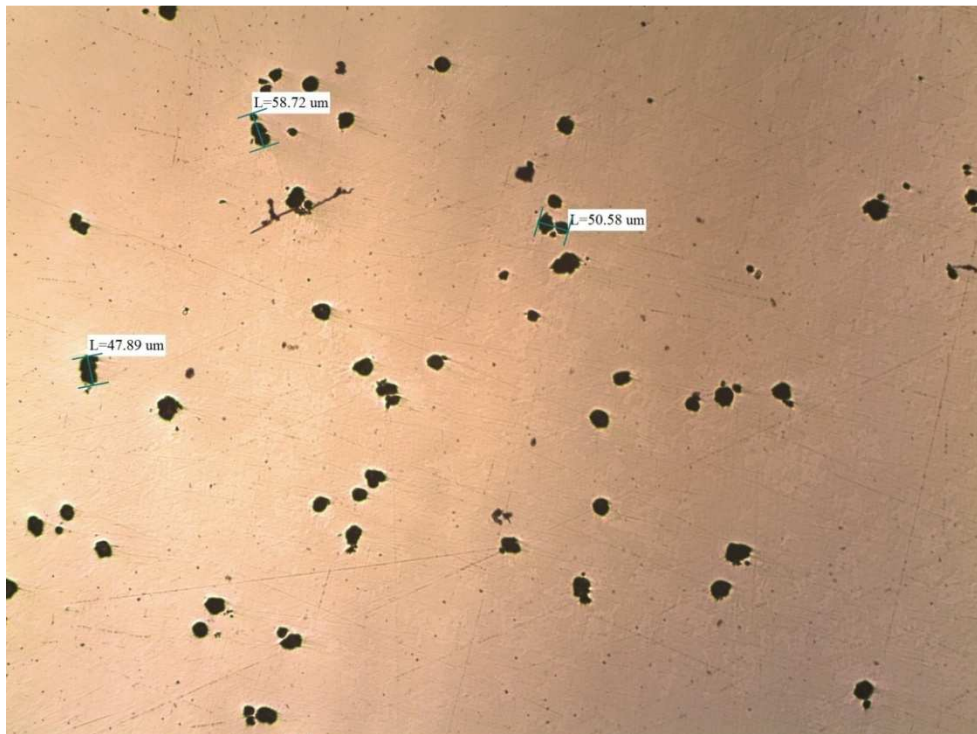


Figura 4.14 Acero AISI 1045, probeta 1.5 enfriada en ACEITE. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de $47,89\ \mu\text{m}$. 100X

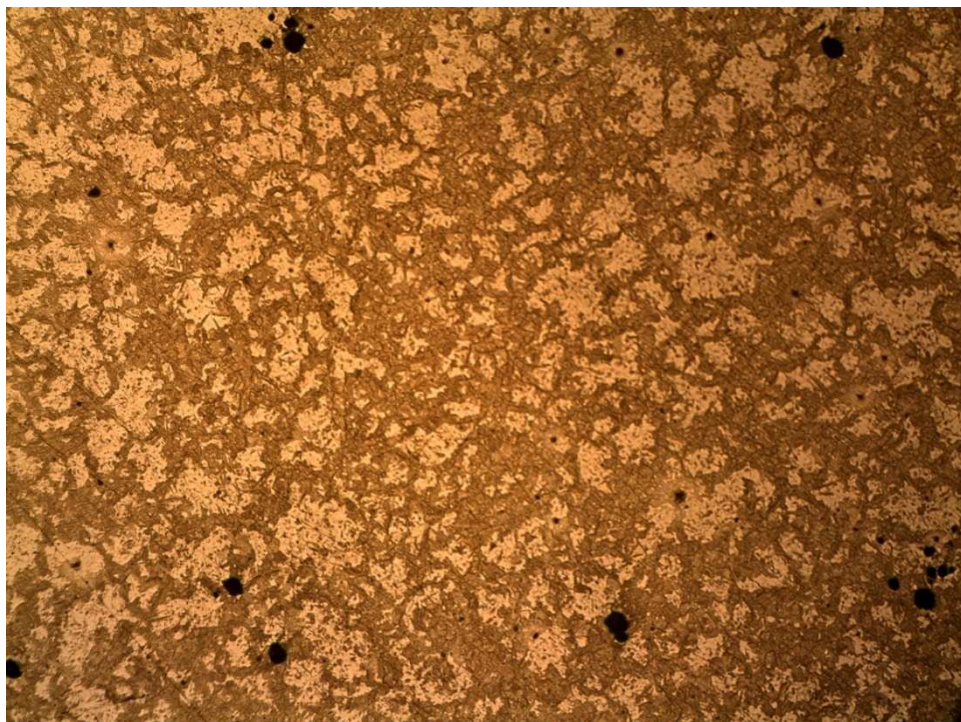


Figura 4.15 Acero AISI 1045, probeta 1.5 enfriada en ACEITE. Acero ferrítico-perlítico tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato. 100X

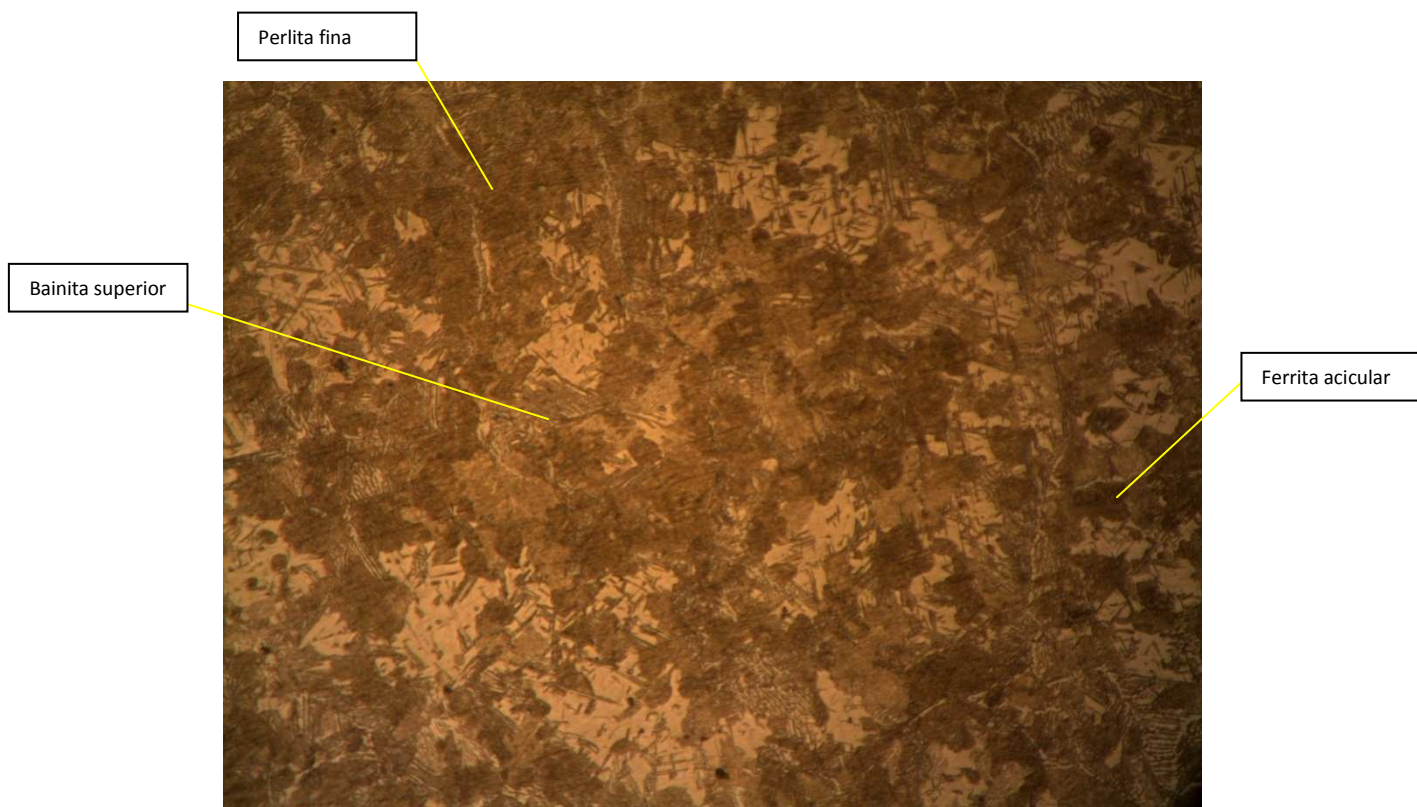


Figura 4.16 Acero AISI 1045, probeta 1.5 enfriada en ACEITE. Matriz metálica ferrítica-perlítica con bainita superior y perlita fina. Se observa austenita retenida. 500X

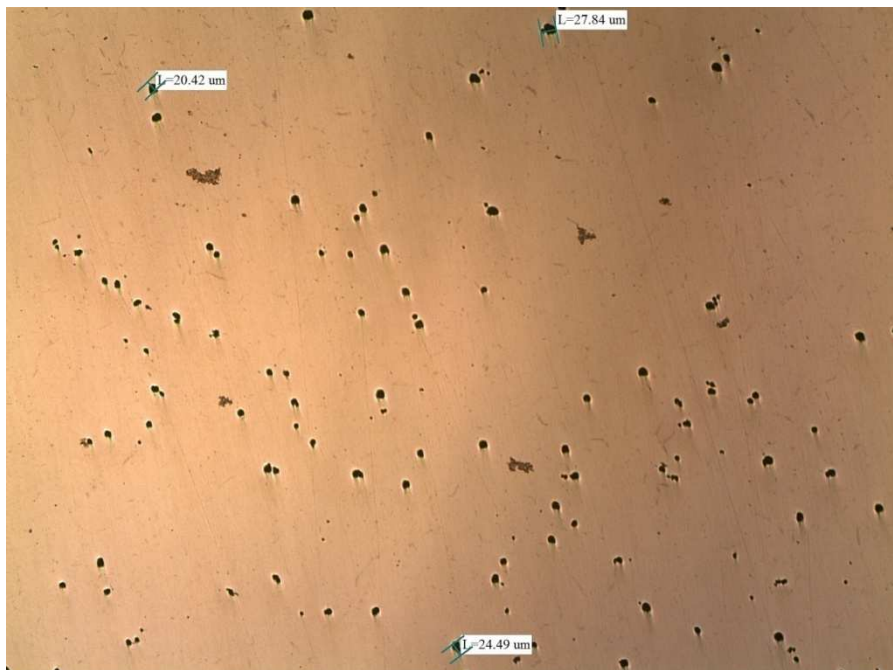


Figura 4.17 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfiada en AGUA. Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 27,84 μm . 100X

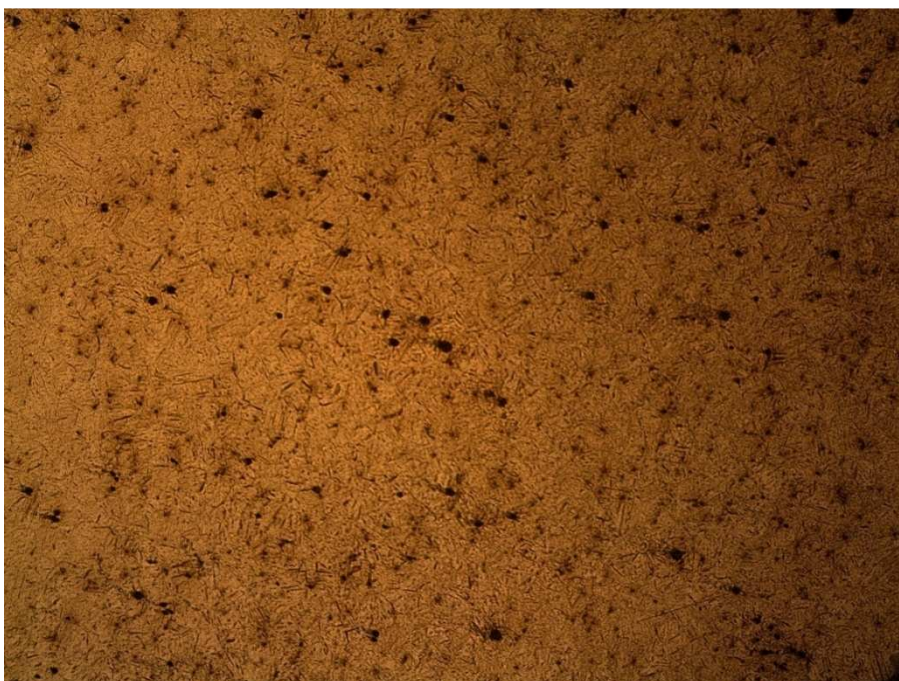


Figura 4.18 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfiada en AGUA. Acero martensítico tratado térmicamente. Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato. 100X

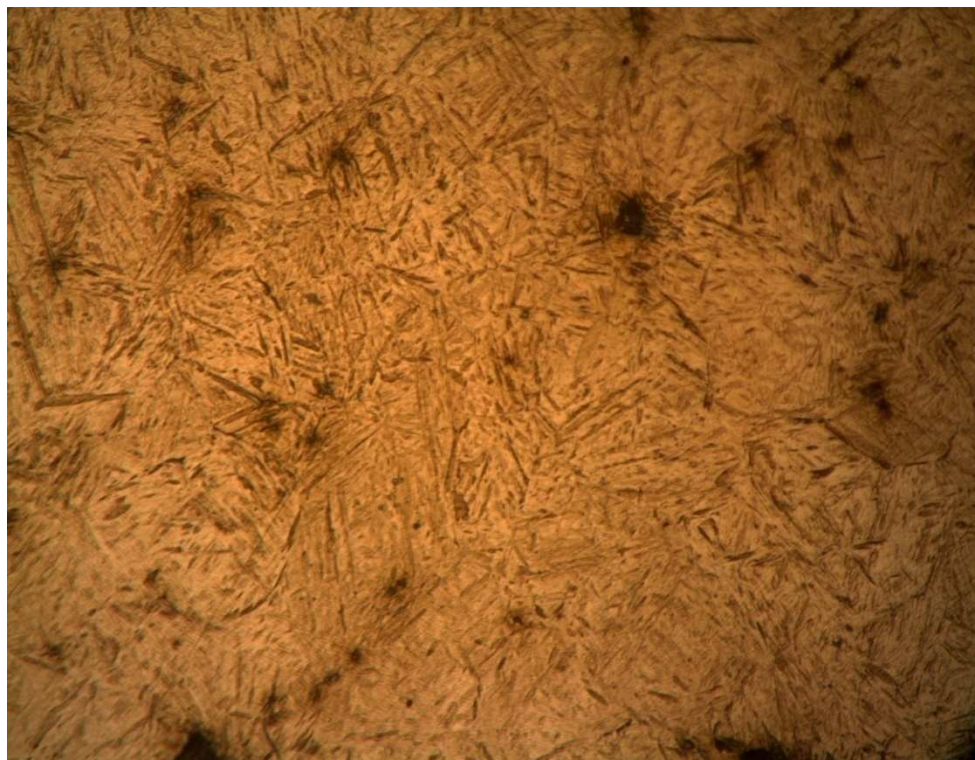


Figura 4.19 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfriada en AGUA. Matriz metálica martensítica.
500X



Austenita residual

Figura 4.20 Acero AISI 1045, probeta 1.6 enfriada en AGUA. Se observan las agujas martensíticas y austenita residual.
1000X

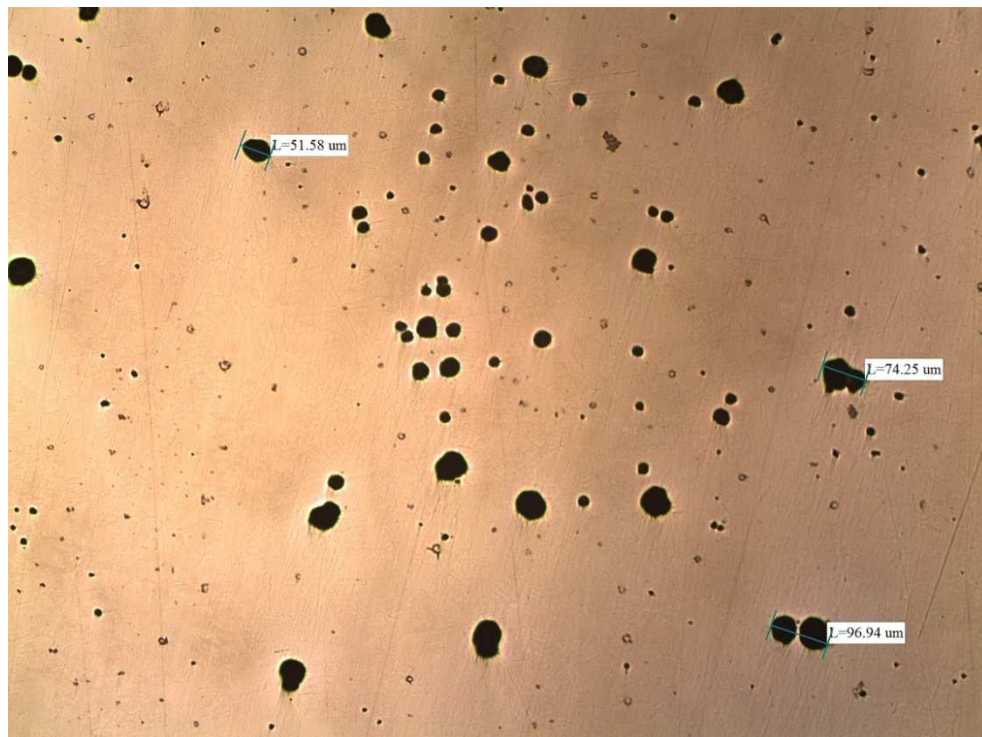


Figura 4.21 Acero AISI 1045, probeta 1.7 enfriada en AIRE. Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 74,24 μm. 100X

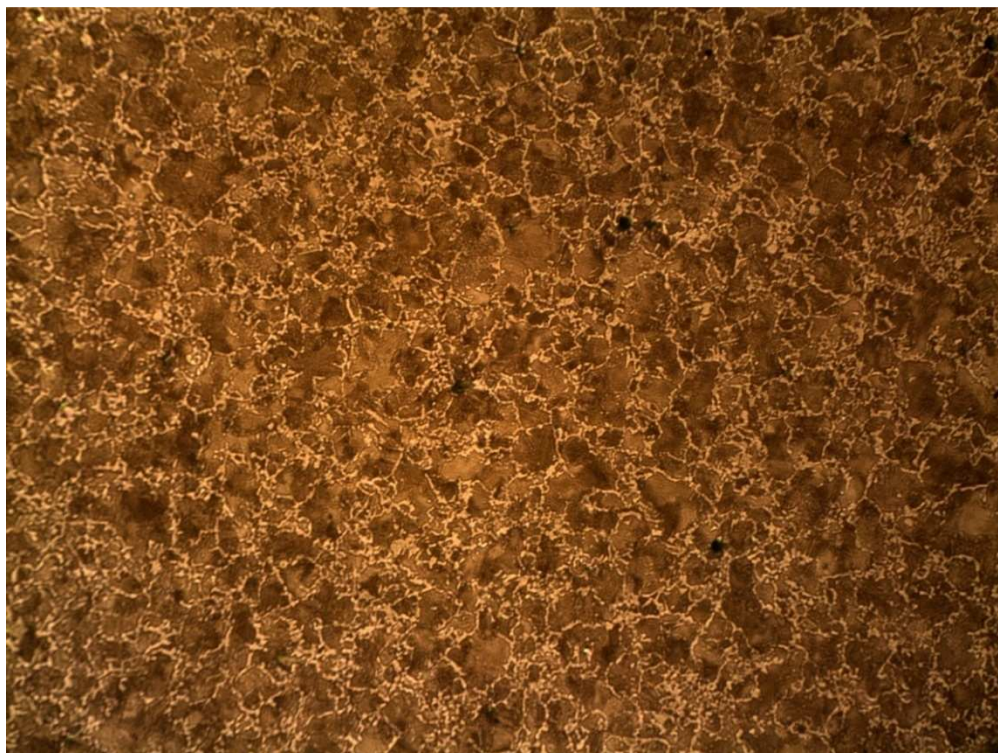


Figura 4.22 Acero AISI 1045, probeta 1.7 enfriada en AIRE. Acero ferrítico-perlítico tratado térmicamente. Se muestra ferrita acicular precipitada al borde de grano y una gran cantidad de inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

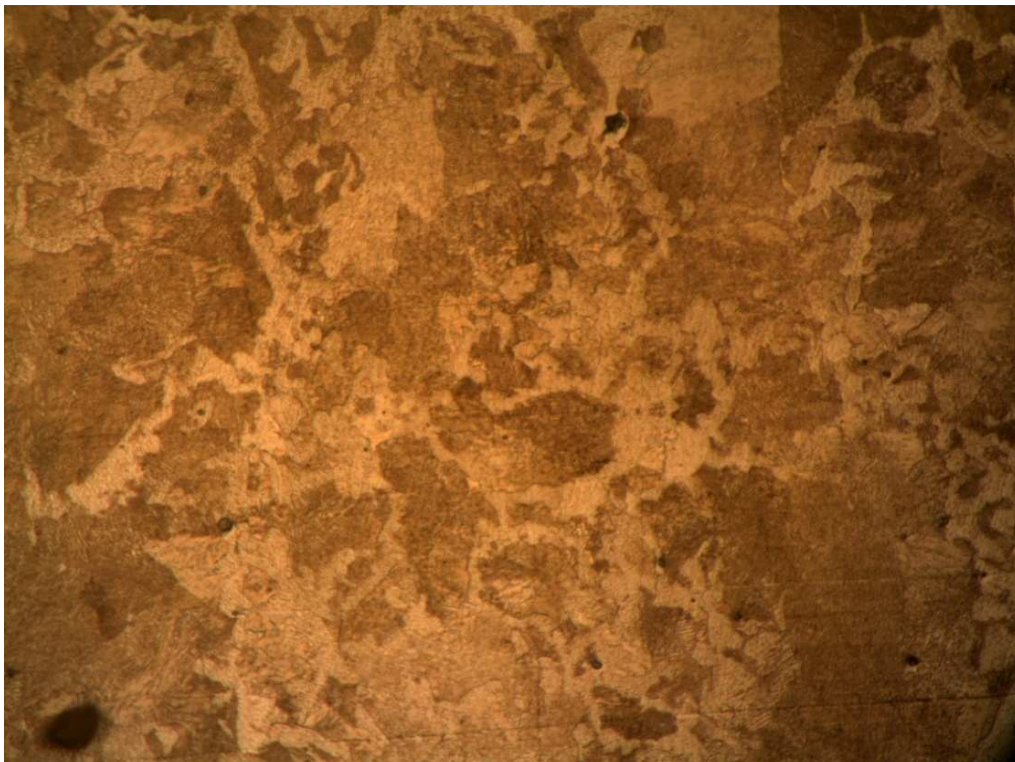


Figura 4.23 Acero AISI 1045, probeta 1.7 enfriada en AIRE. Matriz metálica ferrítica-perlítica. Se observa perlita fina y ferrita acicular. 500X

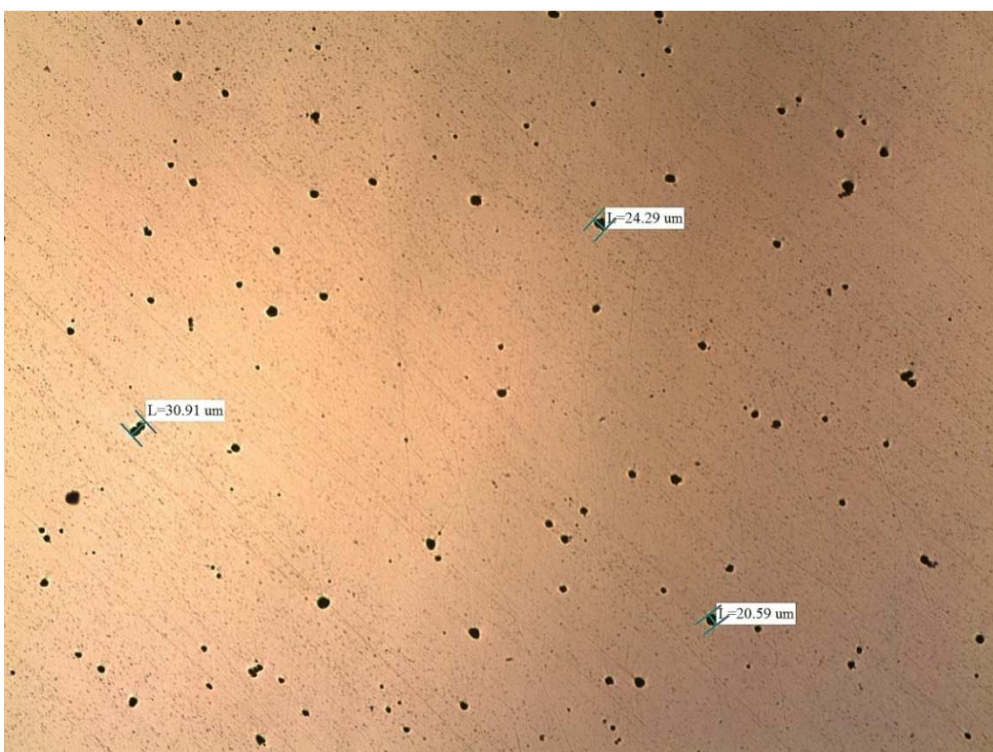


Figura 4.24 Acero AISI 1070, probeta 2.1 enfriada a 600° C. Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 30,91 μm. 100X.



Figura 4.25 Acero AISI 1070, probeta 2.1 enfriada a 600° C. Acero perlítico, tratado térmicamente. Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

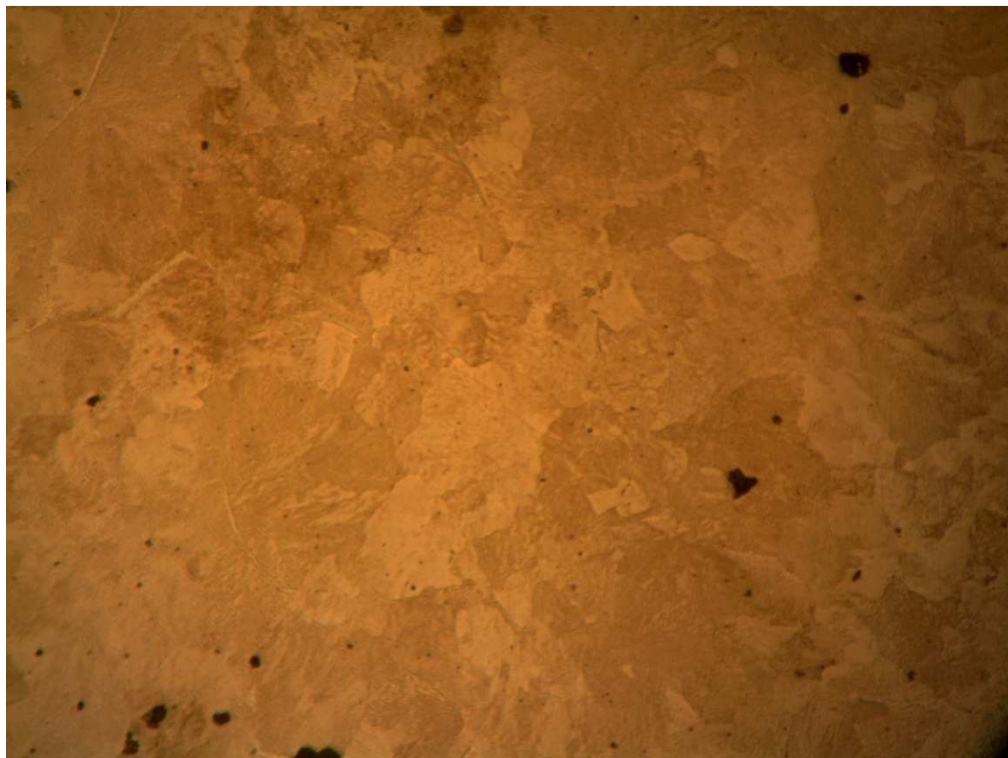


Figura 4. 26 Acero AISI 1070, probeta 2.1 enfriada a 600° C. Matriz metálica perlítica. Se observa perlita fina e inclusiones tipo silicato. 500X

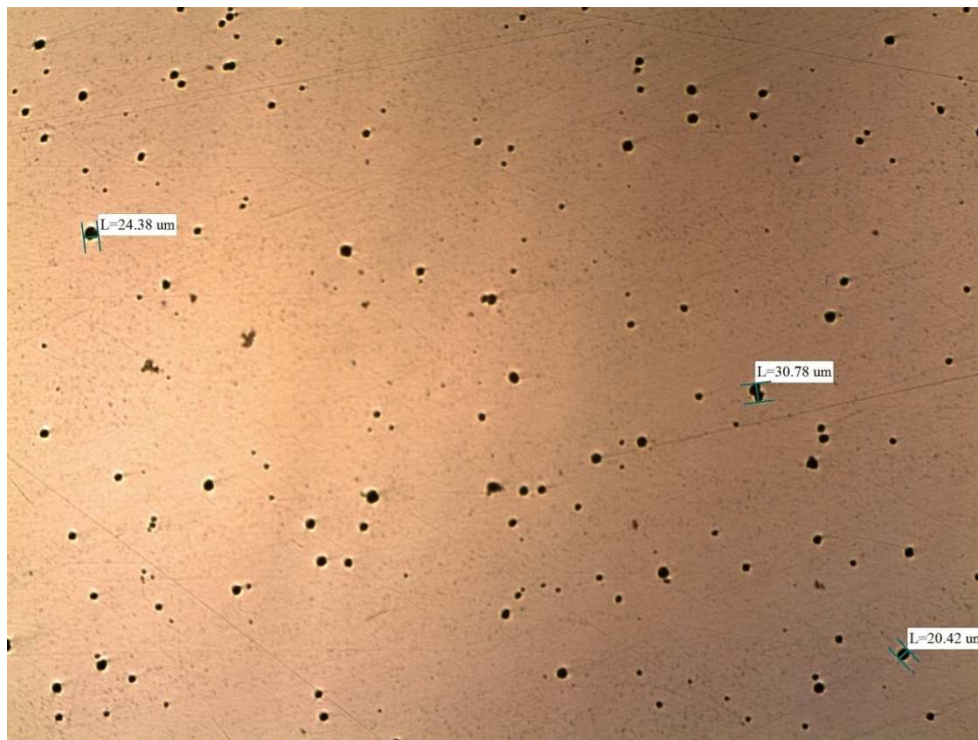


Figura 4.27 Acero AISI 1070, probeta 2.2 enfriada a 500° C. Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 30,78 μm. 100X

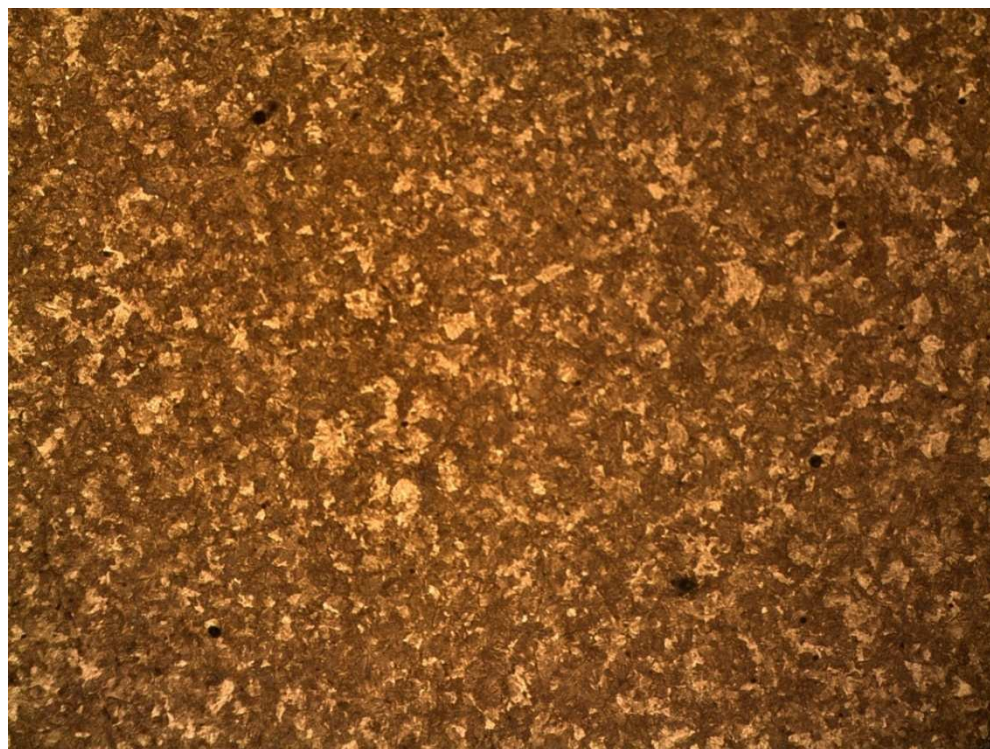


Figura 4.28 Acero AISI 1070, probeta 2.2 enfriada a 500° C. Acero perlítico, tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

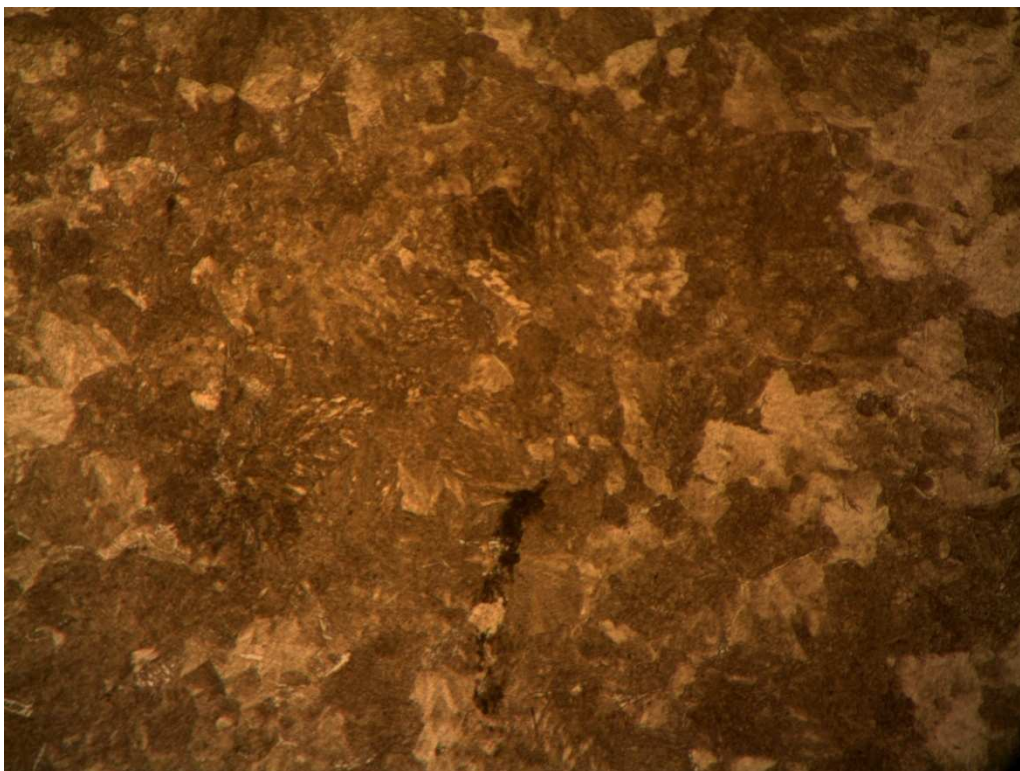


Figura 4. 29 Acero AISI 1070, probeta 2.2 enfriada a 500° C. Matriz metálica perlítica. Se observa perlita fina e inclusiones tipo silicato. 500X

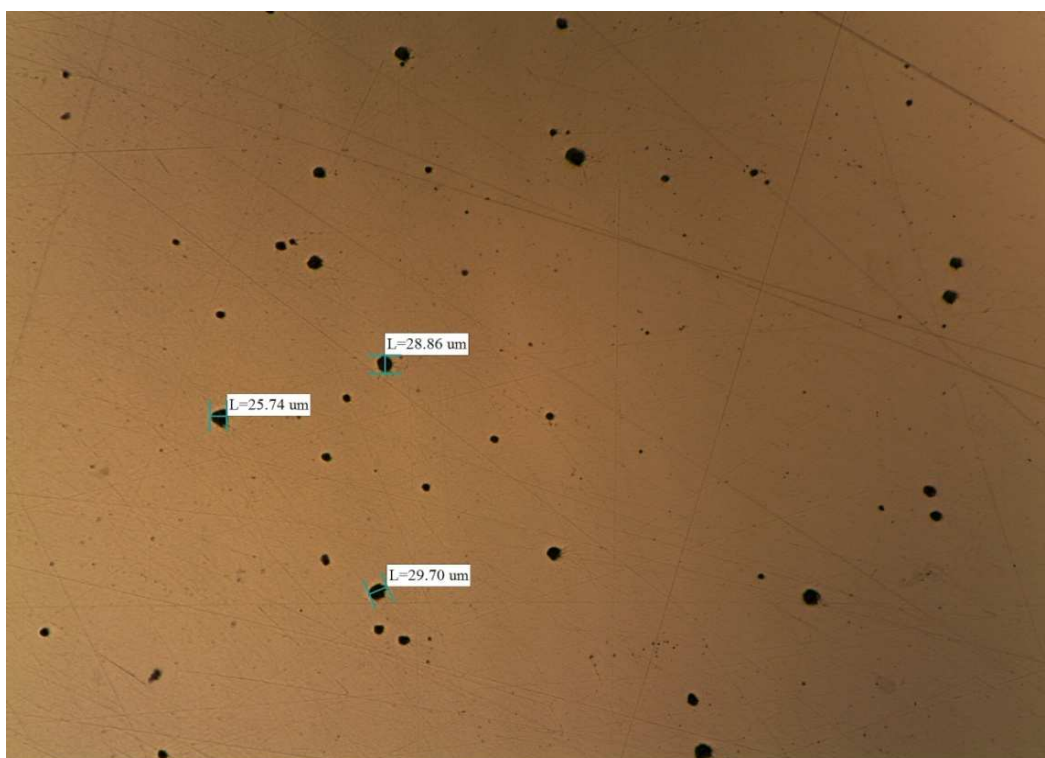


Figura 4. 30 Acero AISI 1070, probeta 2.3 enfriada 380°C. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 29,70 μm . 100X



Figura 4. 31 Acero AISI 1070, probeta 2.3 enfriada 380° . Acero perlítico, tratado térmicamente. Se observan zonas bainíticas y segregación de segundas fases. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

Bainita superior

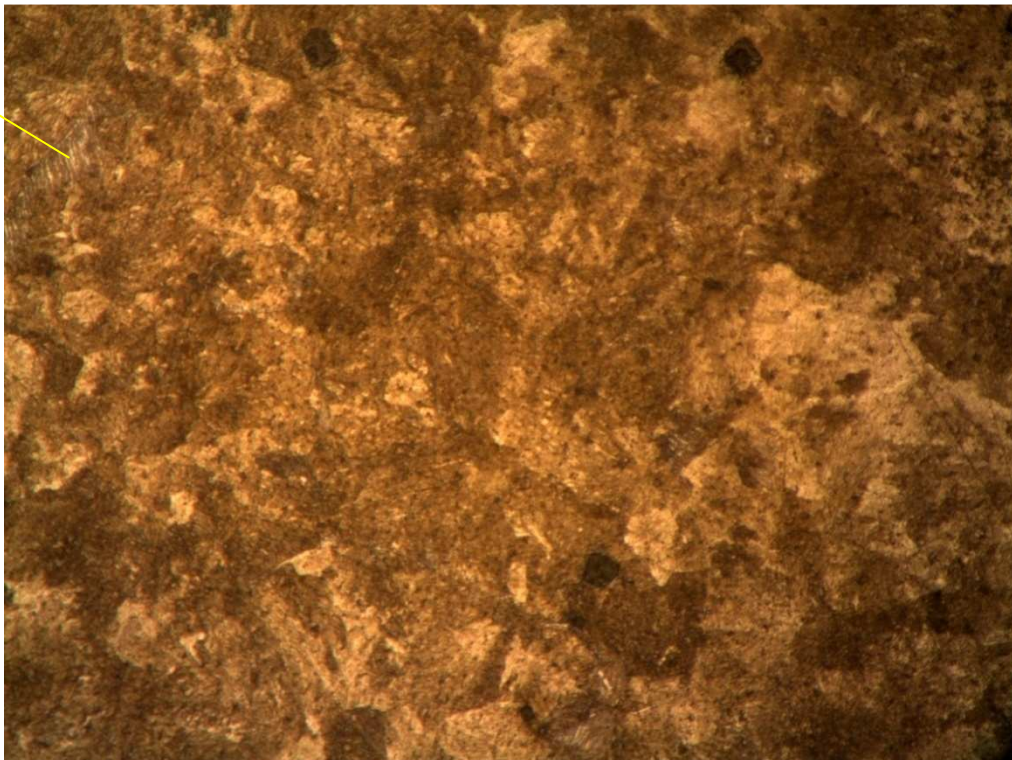


Figura 4.32 Acero AISI 1070, probeta 2.3 enfriada 380° . Matriz metálica perlítica. Se observan zonas de bainita superior y perlita fina. 500X

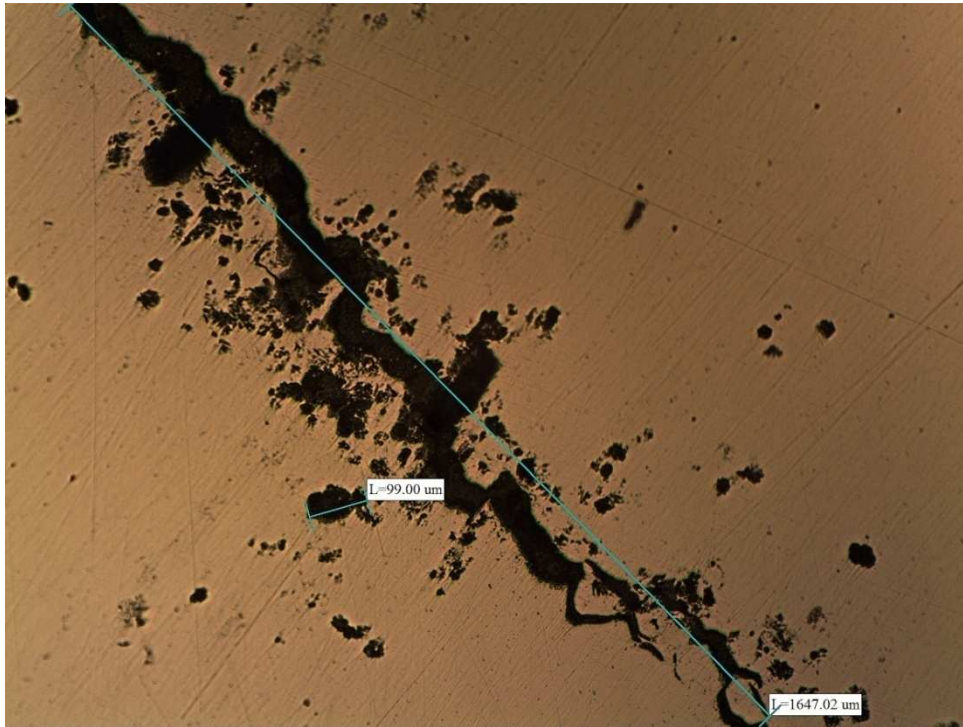


Figura 4. 33 Acero AISI 1070, probeta 2.4, enfriada a 200° C. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 99 μm. 100X



Figura 4.34 Acero AISI 1070, probeta 2.4, enfriada a 200° C. Acero bainítico, tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato. 100X

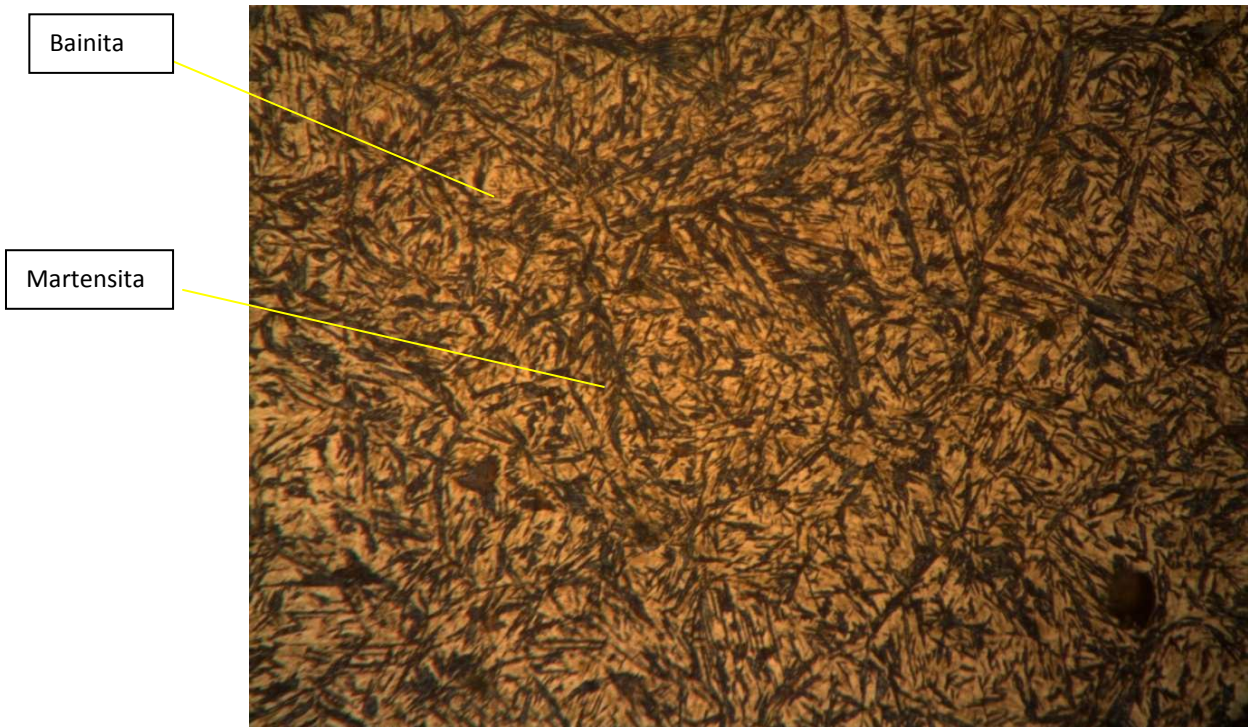


Figura 4. 35 Acero AISI 1070, probeta 2.4, enfriada a 200° C. Matriz metálica bainítica. Se observa bainita en la parte interior y martensita en la zona exterior. 500X

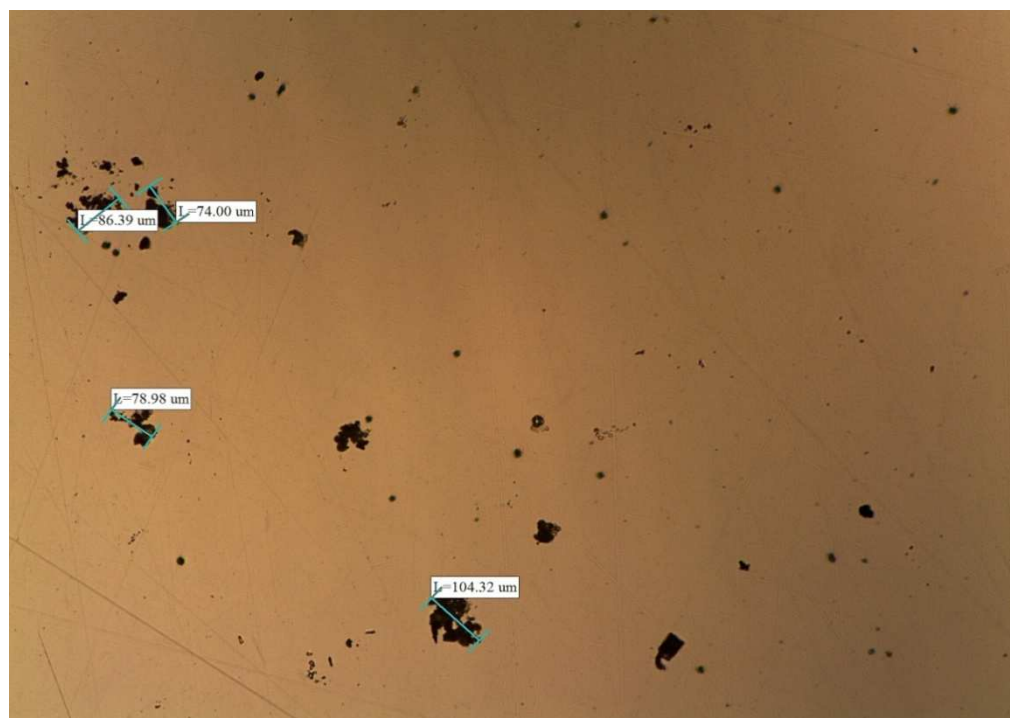


Figura 4. 36 Acero AISI 1070, probeta 2.5 enfriada en ACEITE. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 104,32 µm. 100X

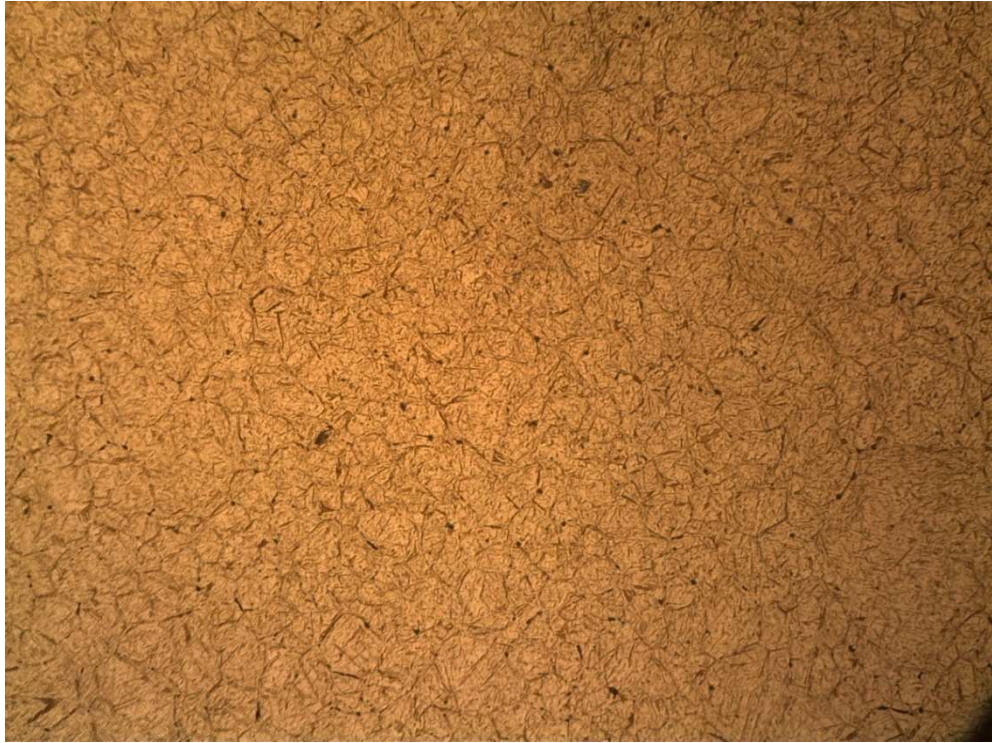


Figura 4.37 Acero AISI 1070, probeta 2.5 enfriada en ACEITE. Acero bainítico, tratado térmicamente. Se observan segregación de segundas fases. 100X

Placas de martensita



Figura 4. 38 Acero AISI 1070, probeta 2.5 enfriada en ACEITE. Acero de matriz metálica bainítica con placas de martensita. Se observa inclusiones tipo silicato. 500x

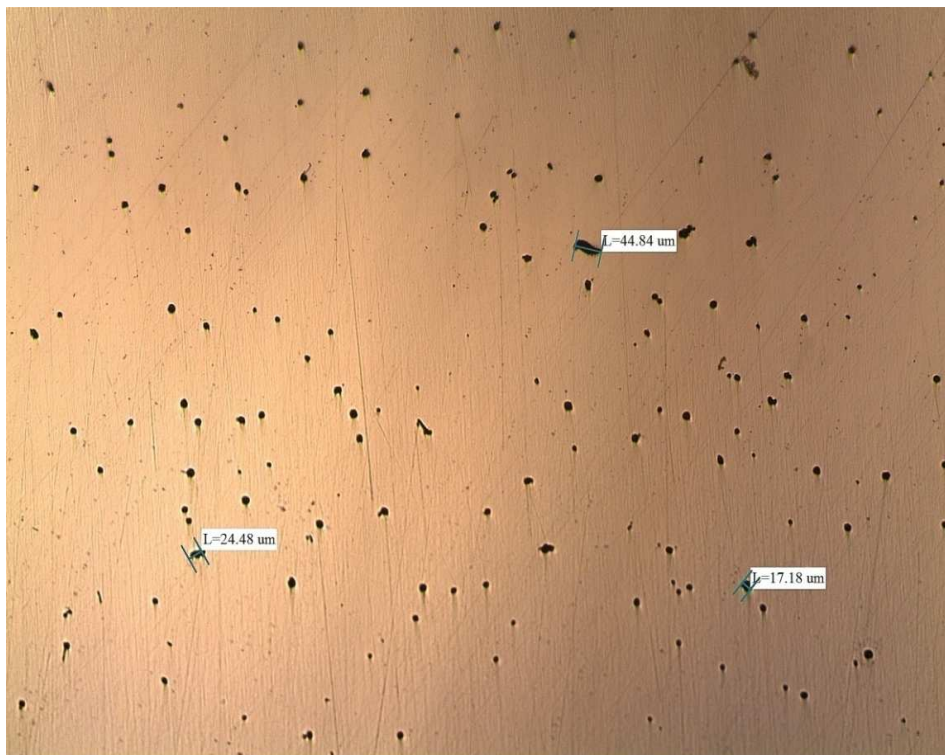


Figura 4.39 Acero AISI 1070, probeta 2.6 enfiada en AGUA. Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 44,84 μm . 100X

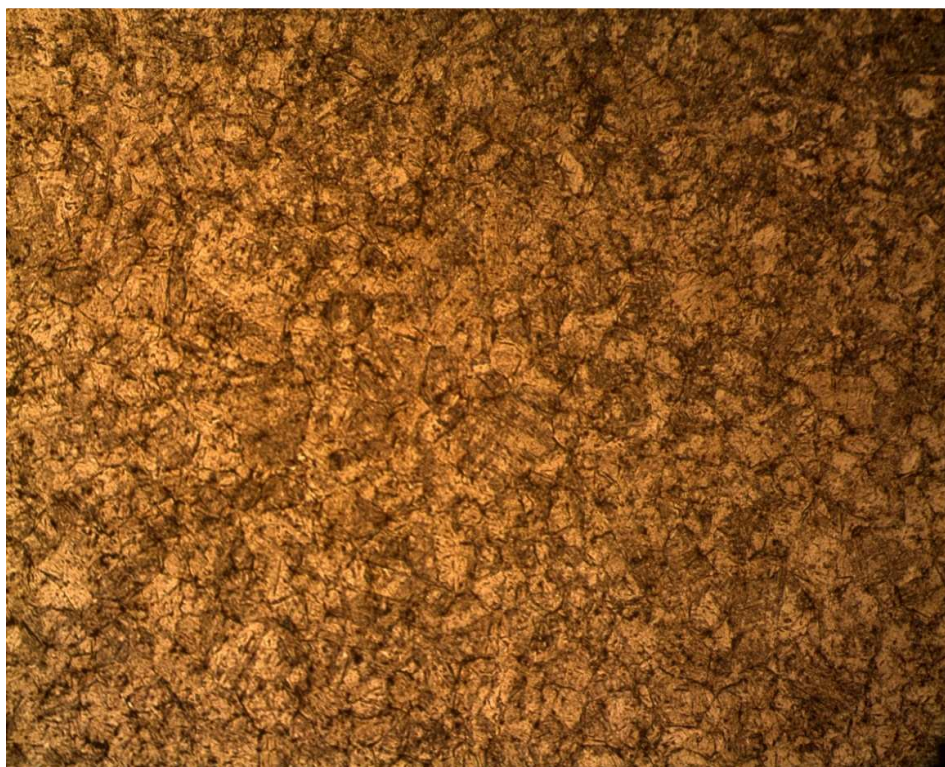


Figura 4.40 Acero AISI 1070, probeta 2.6 enfiada en AGUA. Acero martensítico, tratado térmicamente. 100X

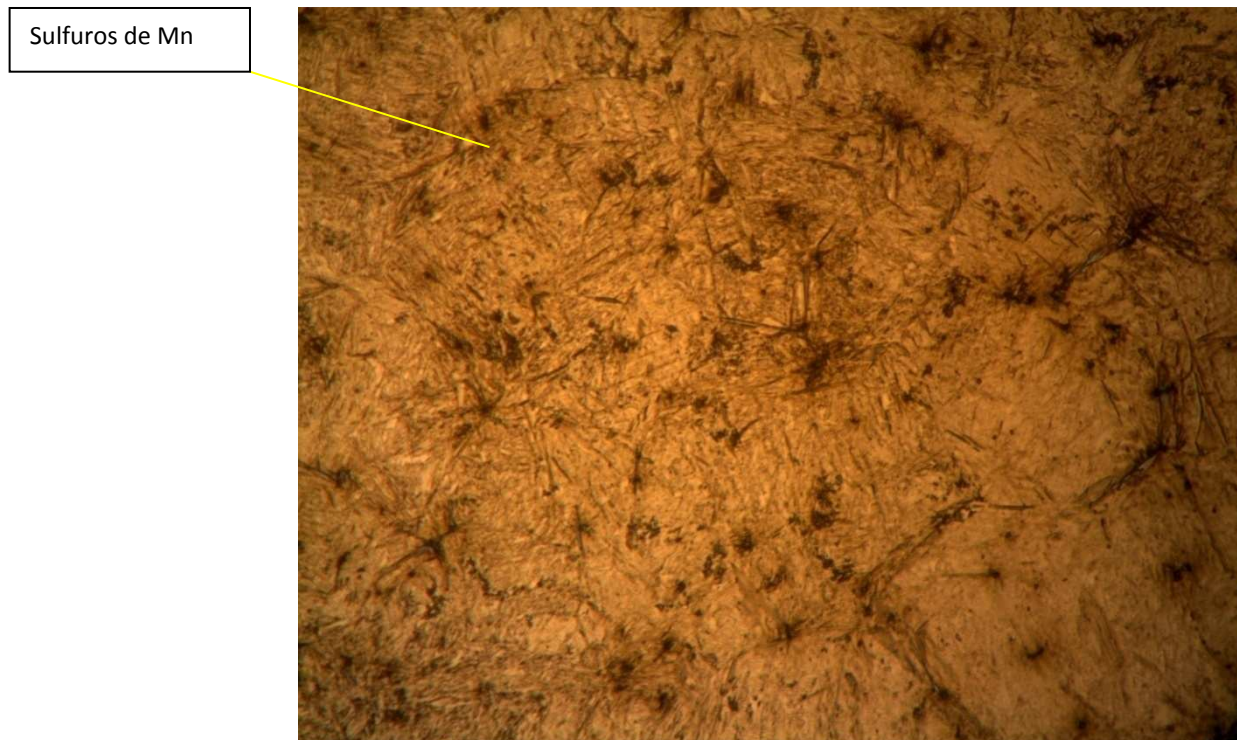


Figura 4.41 Acero AISI 1070, probeta 2.6 enfriada en AGUA. Acero de matriz metálica martensítica. Se observa la presencia de Sulfuros de Manganeso. 500X



Figura 4. 42 Acero AISI 1070 probeta 2.7 enfriada en AIRE. Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 125,43 μm. 100X



Figura 4.43 Acero AISI 1070 probeta 2.7 enfriada en AIRE. Acero ferrítico-perlítico, tratado térmicamente. Se observa la presencia de inclusiones tipo Silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 100X

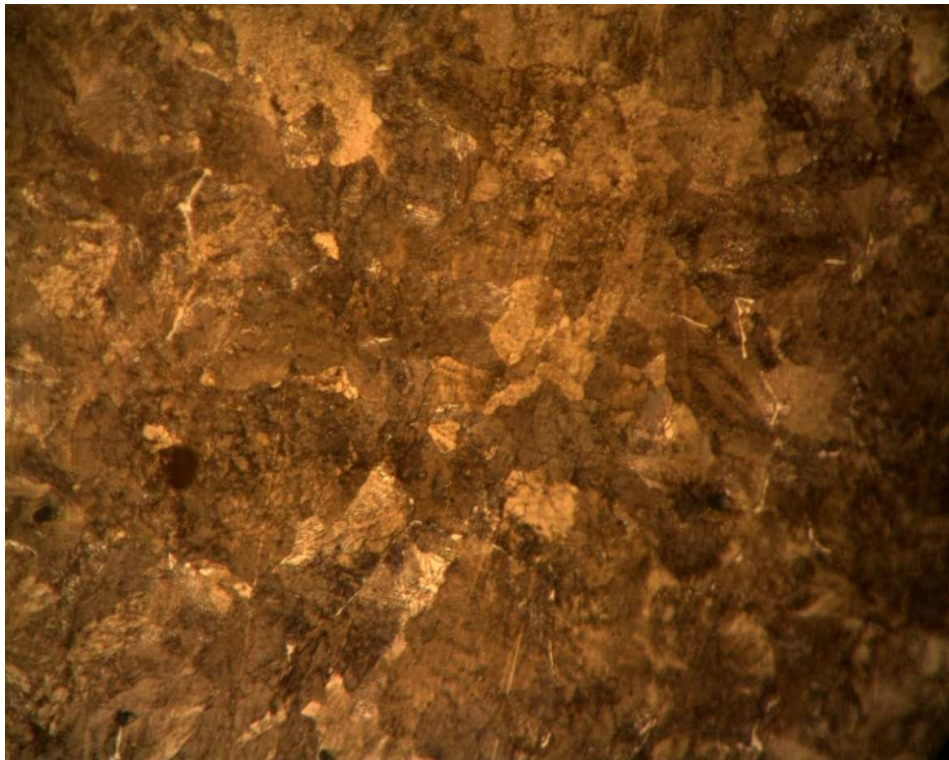


Figura 4.44 Acero AISI 1070 probeta 2.7 enfriada en AIRE. Acero de matriz ferrítico-perlítico, Presencia de ferrita acicular precipitada al borde de grano y perlita fina. 500X

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En los procesos de fabricación o de transformación del acero, el tratamiento térmico puede ser un paso intermedio o el último que se realiza, en cualquier caso su razón de ser se encuentra en su capacidad de producir transformación de fase en el material, que redundará en cambios importantes en las propiedades del acero.

En el presente trabajo se ha utilizado para el estudio dos tipos de acero al carbono; el AISI 1045 y el AISI 1070, que son los que se pueden conseguir en el mercado local, bajo ésta premisa, para realizar los diferentes tratamientos térmicos se ha utilizado el diagrama Fe-C, el cual indica los diferentes constituyentes y estructuras de fase que tiene el acero, en dependencia del porcentaje de carbono. Las estructuras de fase varían durante el calentamiento que sufre el acero por efecto del tratamiento térmico y de seguir el calentamiento se llega al estado líquido. En la práctica al utilizar el diagrama Fe-C, se logró determinar la temperatura de austenización de acuerdo al porcentaje de carbono, para luego en el enfriamiento obtener una variedad de estructuras de fase en función de la temperatura de enfriamiento utilizado.

El objetivo del presente proyecto de titulación es la determinación del efecto causado por las temperaturas de enfriamiento utilizada durante los diversos tratamientos térmicos realizados, en las propiedades de los aceros tratados, por ello, el análisis de los resultados obtenidos se inicia haciendo una descripción de los fundamentos teóricos (diagramas Fe-C) que describen los resultados que se deberían alcanzar al utilizar determinados regímenes de tratamiento térmico como se muestra en la figura 5.1

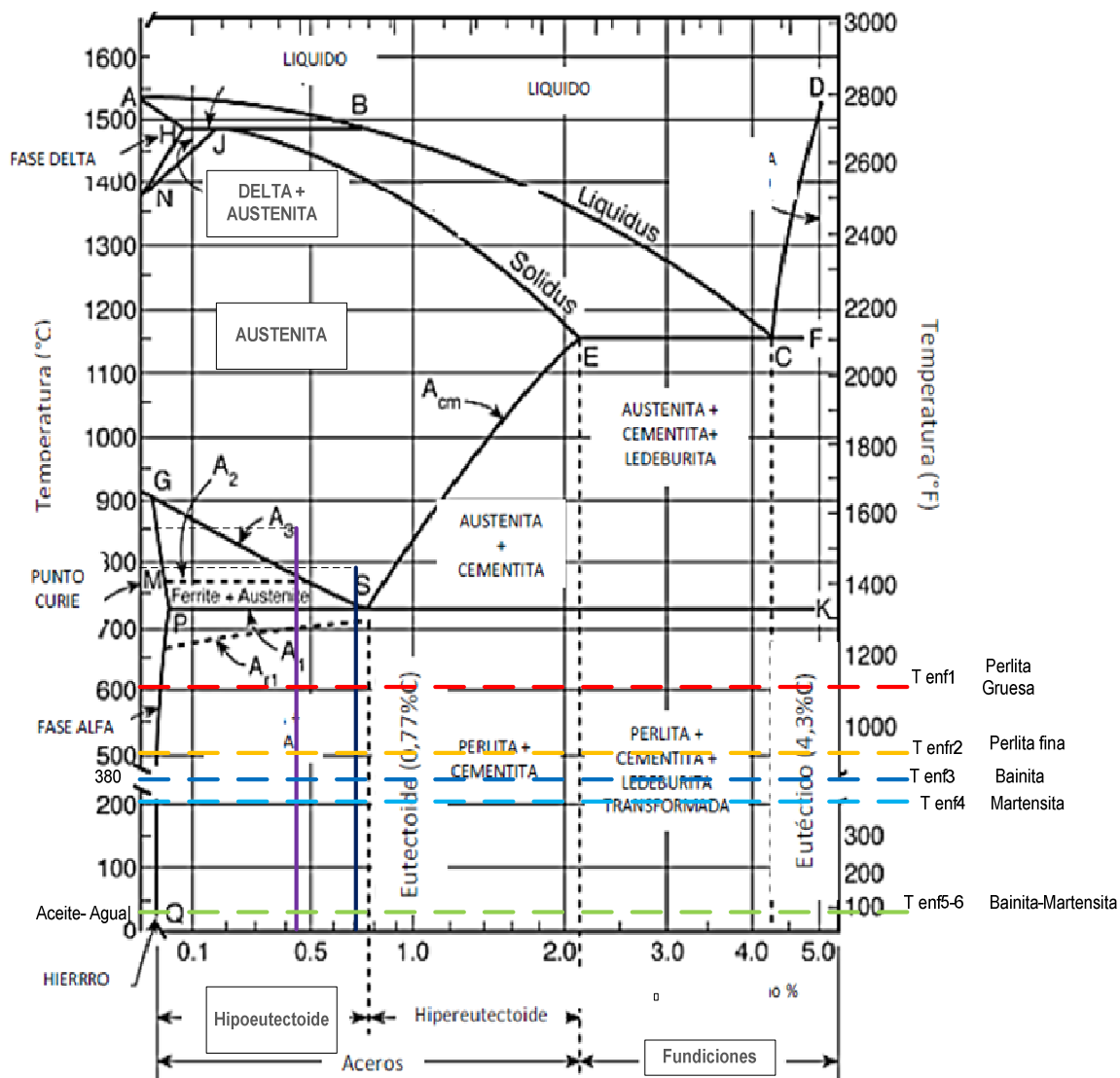


Figura 5.1 Diagrama Fe-C con resultados que se deberían alcanzar al utilizar determinados regímenes de tratamiento térmico.

De acuerdo a la teoría de los tratamientos térmicos y utilizando el diagrama Fe-C, durante el proceso de transformación isotérmica de la austenita, debería presentar las siguientes estructuras de fases: Acero AISI 1045, es un acero hipoeutectoide al ser enfriado a temperaturas :





- De 723°C a 650°C , Ferrita + Perлита de grano grueso.
- De 650°C a 550°C, Ferrita + Perлита de grano fino (sorbita).
- De 550°C a 400°C, ferrita + perlita de grano muy fino (trostita).
- De 400°C a T° de inicio de transformación martensítica.
- Cuando el enfriamiento es brusco (agua), se obtendrá martensita.





En el caso del acero AISI 1070, las estructuras de fase serían similares sin embargo al tener éste acero mayor porcentaje de carbono, se tendrá mayor proporción de perlita que en el acero AISI 1045.

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO METALOGRAFICO DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI 1045 TRATADAS TÉRMICAMENTE.

En la tabla 5.1 se muestra el resumen del análisis metalográfico para el acero AISI 1045

Tabla 5. 1. Resumen del análisis metalográfico para el acero AISI 1045.

Probeta	T. Enfriam °C	Descripción de metalografías(Resultado práctico)	Result. Teórico	Metalografía del resultado Práctico
1	Suministro	100x: Se muestra una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 38,25 µm 100x: Acero ferrítico-perlítico de contenido medio de Carbono. Se observan inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 8. 500x: Acero de matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observan inclusiones tipo silicato.	Acero Ferrítico-perlítico.	
1.1	600°C	100x: Se muestra una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 49,95 µm. 100x: Acero ferrítico-perlítico de contenido medio de Carbono, tratado térmicamente. Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9. 500x: Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observa la presencia de perlita fina y ferrita acicular precipitada al borde de grano, con zonas	Ferrita +perlita gruesa.	
1.2	500°C	100x: Se muestra una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 38,25 µm. 100x: Acero ferrítico-perlítico de contenido medio de Carbono, tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato. 500x: Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observa la presencia de perlita fina y sulfuros de Manganeso.	Ferrita+ perlita fina.	
1.3	380°C	100x: Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 77,10 µm. 100x: Acero ferrítico-perlítico tratado térmicamente, de contenido medio de Carbono. Se observan inclusiones tipo silicato 500x: Matriz metálica ferrítico-perlítica. Se observa la presencia de perlita fina, ferrita acicular al borde de grano y bainita superior.	Ferrita + bainita.	

1.4	200°C	<p>100x: Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 37,00 μm.</p> <p>100x: Acero bainítico tratado térmicamente, con Carburos de Cromo precipitados al borde de grano. Se observan inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9</p> <p>500x: Matriz metálica bainítica con carburos de Cromo precipitados al</p>	Martensita	
1.5	En ACEITE	<p>100x: Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 47,89 μm</p> <p>100x: Acero ferrítico-perlítico tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato.</p> <p>500x: Matriz metálica ferrítica-perlítica con bainita superior, perlita</p>	Bainita	
1.6	En AGUA	<p>100x: Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 27,84 μm</p> <p>100x: Acero martensítico tratado térmicamente. Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato</p> <p>500x: Matriz metálica martensítica</p> <p>1000x: Se observan las agujas martensíticas y austenita residual</p>	Martensita	
1.7	Al AIRE	<p>100x: Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 74,24 μm</p> <p>100x: Acero ferrítico-perlítico tratado térmicamente. Se muestra ferrita acicular precipitada al borde de grano y una gran cantidad de inclusiones tipo silicato. Tamaño de grano ASTM No 9</p> <p>500x: Matriz metálica ferrítica-perlítica. Se observa perlita fina y</p>	Ferrita + perlita fina.	

Del análisis metalográfico a las probetas de acero AISI 1045 se determina que:

- El material en estudio corresponde a un acero AISI 1045, cuya matriz metálica es ferrítica–perlítica, de contenido medio de carbono y de tamaño de grano ASTM N°8.
- Todas las probetas muestran la presencia de un gran número de inclusiones de tipo silicato, lo que evidencia la calidad del acero en estudio en el proceso de fabricación.
- El tratamiento térmico realizado al acero consistió en enfriamientos isotérmicos a diferentes temperaturas, normalizado, temple en agua y aceite. Por lo tanto se observan diferentes microestructuras de las cuales se evidencian características notorias, como se muestra en la tabla 5.1
- A Temperatura de 600°C se debería encontrar perlita gruesa mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.1, se observa en la matriz ferrítica perlítica la disolución parcial de la perlita dentro de la matriz, además se observa un grano más pequeño.
- A Temperatura de 500°C se debería encontrar perlita fina mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.2, se encuentra una matriz ferrítica-perlítica en donde se observa perlita más fina, es decir el proceso de la disolución de la perlita continúa por lo tanto el grano se hace más pequeño.
- A Temperatura de 380°C se debería encontrar bainita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.3, se observa una matriz metálica ferrítica-perlítica en menor proporción que la anterior, donde existe la presencia de carburos dentro de la matriz ferrítica lo que se conoce como bainita. Esto se debe a que la temperatura de enfriamiento corresponde a la zona de bainita, y la presencia de ferrita – perlita se atribuye a que una parte de la transformación se produjo mientras ocurría el enfriamiento.
- A Temperatura de 200°C se debería encontrar martensita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.4, se observa la matriz metálica bainítica con zonas de martensita, por lo tanto el enfriamiento a ésta temperatura transformó parte de la matriz en martensita, es decir el


enfriamiento no fue lo suficientemente rápido para que la transformación sea completamente martensítica.





- A Temperatura de enfriamiento en aceite se debería encontrar bainita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.5, la matriz encontrada muestra ferrita, perlita, bainita y martensita. Esto se atribuye a que el enfriamiento en aceite fue demasiado lento, produciéndose la transformación en forma parcial de cada fase.
- A Temperatura de enfriamiento en agua se debería encontrar martensita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.6, se observa una matriz metálica martensítica debido a la gran velocidad de enfriamiento que proporciona el agua.
- A Temperatura de enfriamiento en aire se debería encontrar perlita media mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 1.7, se observa una matriz ferrítica-perlítica con bordes de grano definidos y un tamaño de grano ASTM N⁹, es decir lo que se obtiene es una estructura ferrítica-perlítica con el grano más fino y más uniforme.

5.2.1.1. Resultados obtenidos del ensayo metalográfico del Acero AISI 1070.

En la tabla 5.3 se muestra el resumen del análisis metalográfico para el acero AISI 1070.

Tabla 5. 2. Resumen del análisis metalográfico para el acero AISI 1070.

Probeta	T. Enfriam °C	Descripción de metalográficas(Resultado práctico)	Result. Teórico	Metalografías del resultado práctico.
2	Suministro	<p>100x: Existe la presencia de un gran número de inclusiones en forma de silicato ,la de mayor tamaño mide 101,06 μm.</p> <p>100x: Se trata de una matriz - ferrítica-perlítica , con presencia de inclusiones de diferente tamaño.</p> <p>500x: Se observa en mayor detalle la matriz ferrítico -perlítica con inclusiones tipo</p>	Acero Ferrítico-perlítico.	
2.1	600°C	<p>100x: Se observa un gran número de inclusiones tipo silicato , 30.91 μm.</p> <p>100x:Acero perlítico, se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, tamaño de grano ASTM No 9.</p> <p>500x:Matriz metálica perlítica. Se observa perlita fina e inclusiones tipo silicato.</p>	Perlita Gruesa	
2.2	500°C	<p>100x:Se observa gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 30,78 μm.</p> <p>100x:Acero perlítico, tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato, tamaño de grano ASTM No 9.</p> <p>500X:Matriz metálica perlítica. Se observa perlita fina e inclusiones tipo silicato.</p>	Perlita Fina	
2.3	380°C	<p>100X:Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 29,70 μm.</p> <p>100X: Matriz metálica perlítica. Se observan zonas de bainita superior y perlita fina.</p> <p>500X:Acero perlítico, tratado térmicamente. Se observan zonas bainíticas y tamaño de grano ASTM No 9.</p>	Bainita	

2.4	200°C	<p>100x:Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 99 μm.</p> <p>100x:Acero bainítico, tratado térmicamente. Se observan inclusiones tipo silicato.</p> <p>500x:Matriz metálica bainítica. Se observa bainita en la parte interior y martensita en la zona exterior.</p>	Martensita	
2.5	En ACEITE	<p>100X:Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 104,32 μm.</p> <p>100X:Acero bainítico, tratado térmicamente. Se observan segregación de segundas fases.</p> <p>500X:Acero de matriz metálica bainítica con placas de martensita. Se observa</p>	Bainita	
2.6	En AGUA	<p>100X:Se observa una gran cantidad de inclusiones tipo silicato, la mayor de ellas con una dimensión de 44,84 μm.</p> <p>100X:Acero martensítico, tratado térmicamente.</p> <p>500X:Acero de matriz metálica martensítica. Se observa la presencia de Sulfuros de Manganeso</p>	Martensita	
2.7	Al AIRE	<p>100X:Se observan inclusiones tipo silicato, la mayor una dimensión de 125,43 μm.</p> <p>100X:Acero ferrítico-perlítico, tratado térmicamente. Se observa la presencia de inclusiones tipo Silicato, tamaño de grano ASTM No 9.</p> <p>500X: matriz ferrítico-perlítico, presencia de ferrita acicular precipitada al borde de grano y perlita fina.</p>	Perlita media	

Del análisis metalográfico a las probetas de acero AISI 1070 se determina que:

- El material en estudio corresponde a un acero AISI 1070, cuya matriz metálica es ferrítica – perlítica, de alto contenido de carbono y de tamaño de grano ASTM N°8.
- Todas las probetas muestran la presencia de un gran número de inclusiones de tipo silicato, lo que evidencia la calidad del acero en estudio en el proceso de fabricación.
- El tratamiento térmico realizado al acero consistió en transformaciones isotérmicas de la austenita a diferentes temperaturas, normalizado, temple en agua y aceite. Por lo tanto se observan diferentes microestructuras de las cuales se evidencian características notorias, como se muestra en la tabla 5.2
- A Temperatura de 600°C se debería encontrar perlita gruesa mientras que en la probeta 2.1, se observa perlita de grano grueso como era lo esperado.
- A Temperatura de 500°C se debería encontrar perlita fina mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 2.2, se encuentra una matriz perlítica en donde se observa perlita fina, es decir el grano se hace más pequeño.
- A Temperatura de 380°C se debería encontrar bainita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 2.3, se observa una matriz metálica perlítica, donde se observa la presencia de bainita superior y perlita fina. Esto se debe a que la temperatura de enfriamiento corresponde a la zona de bainita, y la presencia de perlita se atribuye a que una parte de la transformación se produjo mientras ocurría el enfriamiento.
- A Temperatura de 200°C se debería encontrar martensita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 2.4, se observa la matriz metálica bainítica con zonas de martensita en la parte exterior, por lo tanto el enfriamiento a ésta temperatura transformó parte de la matriz en martensita, es decir el enfriamiento no fue lo suficientemente rápido para que la transformación sea completamente martensítica.
- A Temperatura de enfriamiento en aceite se debería encontrar bainita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 2.5 enfriado, se

observa una matriz metálica bainítica con la presencia de placas de martensita. Esto se atribuye a que el enfriamiento en aceite fue adecuado.

- A Temperatura de enfriamiento en agua se debería encontrar martensita mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 2.6, se observa una matriz metálica martensítica debido a la gran velocidad de enfriamiento que proporciona el agua.
- A Temperatura de enfriamiento en aire se debería encontrar perlita media mientras que en el tratamiento térmico de la probeta 2.7, se observa una matriz ferrítica-perlítica con bordes de grano definidos y un tamaño de grano ASTM N⁹, es decir lo que se obtiene es una estructura ferrítica-perlítica con el grano más fino y más uniforme.

5.3. DIAGRAMA TTT RELACIONANDO TEMPERATURA DE ENFRIAMIENTO, TIEMPO DE TRANSFORMACIÓN ISOTERMICA DE LA AUSTENITA.

Utilizando el diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1045 y AISI 1070 se procedió a trazar las curvas de transformación isotérmicas con las diversas temperaturas de enfriamiento utilizadas.

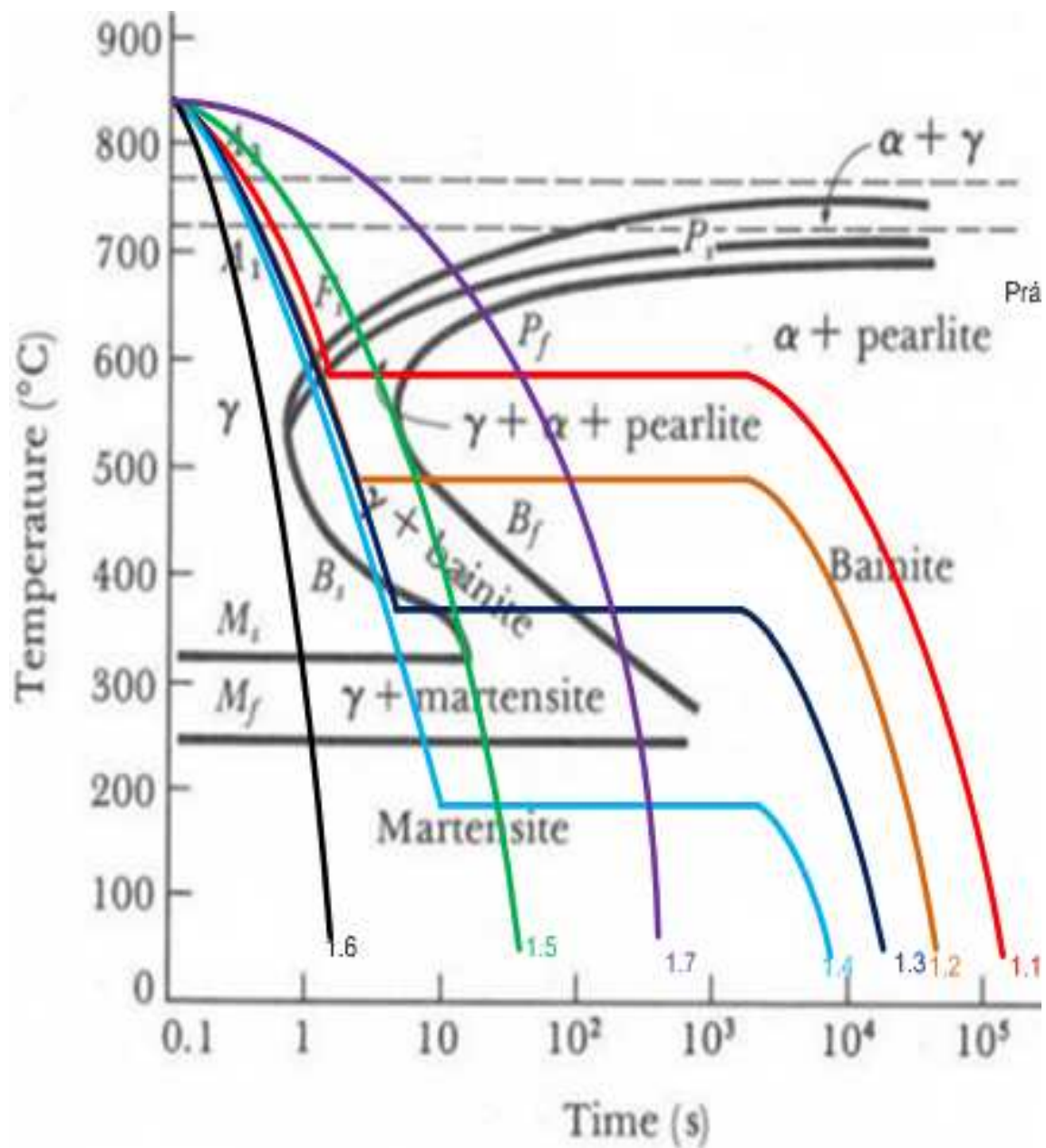


Figura 5. 2 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1045

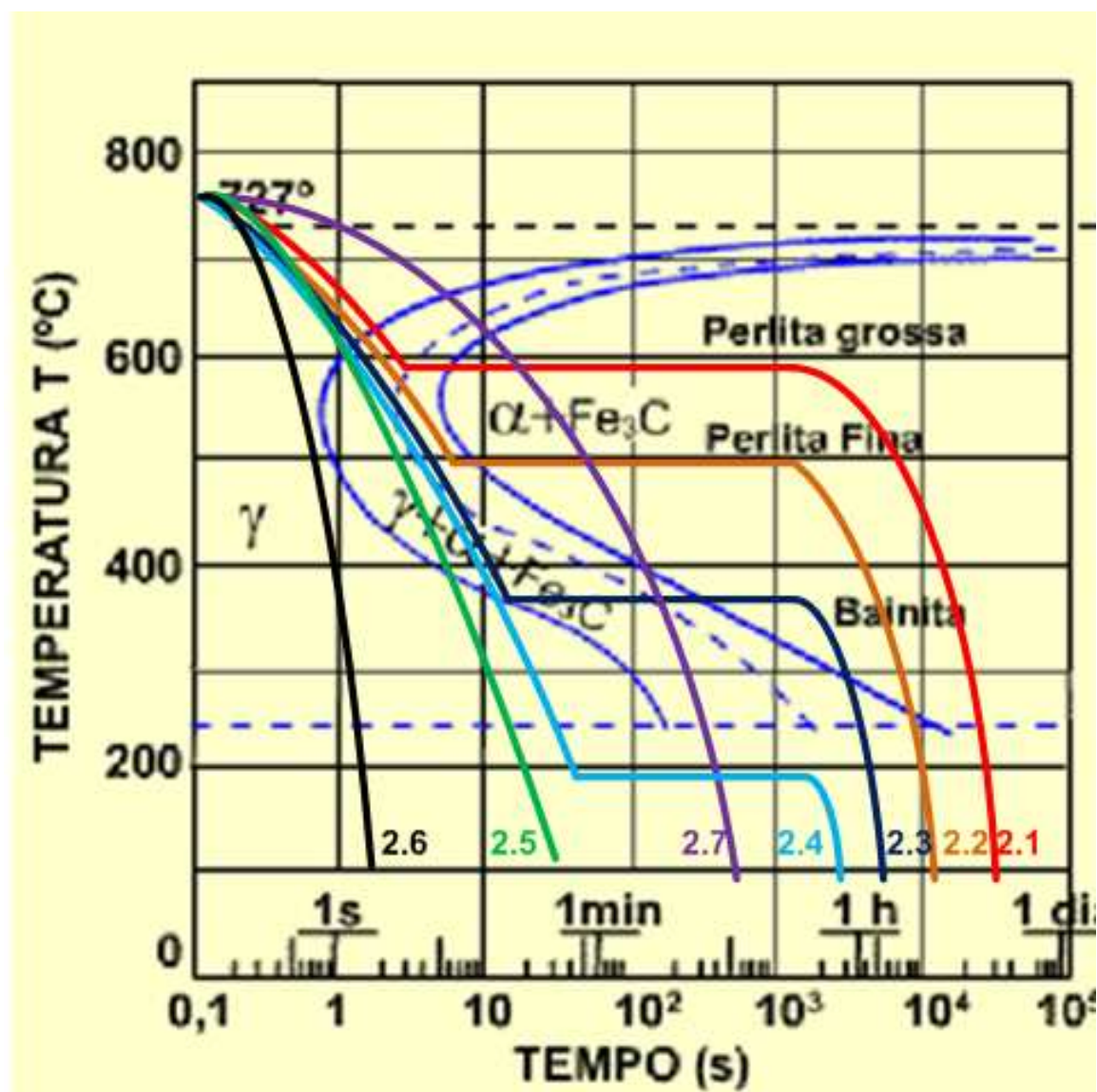


Figura 5. 3 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1070.

5.4. EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE ENFRIAMIENTO EN LAS PROPIEDADES DE LOS ACEROS TRATADOS TÉRMICAMENTE

La temperatura de enfriamiento influye directamente en las propiedades mecánicas de los aceros estudiados como se evidencia en los resultados obtenidos de dureza, tenacidad y resistencia a la tracción.

5.4.1. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE DUREZA

Siendo la dureza una de las propiedades más significativas en el presente estudio es importante su comparación en los distintos tratamientos térmicos.

5.4.1.1. Analizando los resultados del ensayo de dureza del acero AISI 1045 se obtiene que:

- El material base presenta una dureza de 84 HRB.
- Durante los diferentes tratamientos térmicos se evidencia que a medida que disminuye la temperatura de enfriamiento las durezas alcanzadas aumentan, como se muestra en la figura 5.4

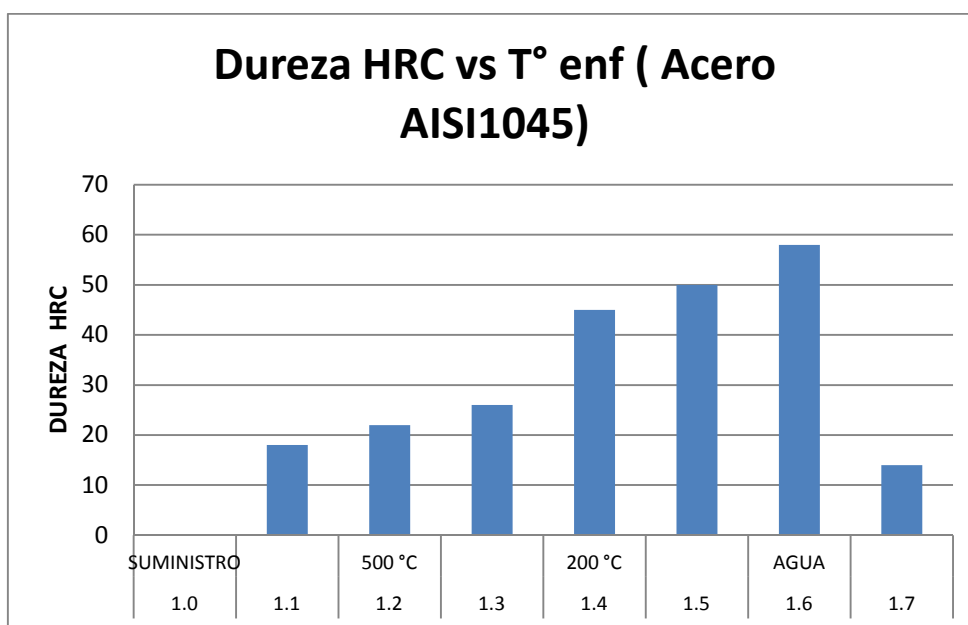


Figura 5.4 Dureza vs temperatura de enfriamiento AISI 1045

- De la figura 5.4 se observa que el valor máximo obtenido de Dureza es 58 HRC cuando el medio de enfriamiento fue en agua. Mientras que los valores de dureza intermedios se incrementaron consecutivamente.

Una vez realizado el análisis de durezas se puede completar el diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1045 con la escala de durezas que determina o que permite comparar sus durezas teóricas y prácticas como se muestra en la figura 5.5

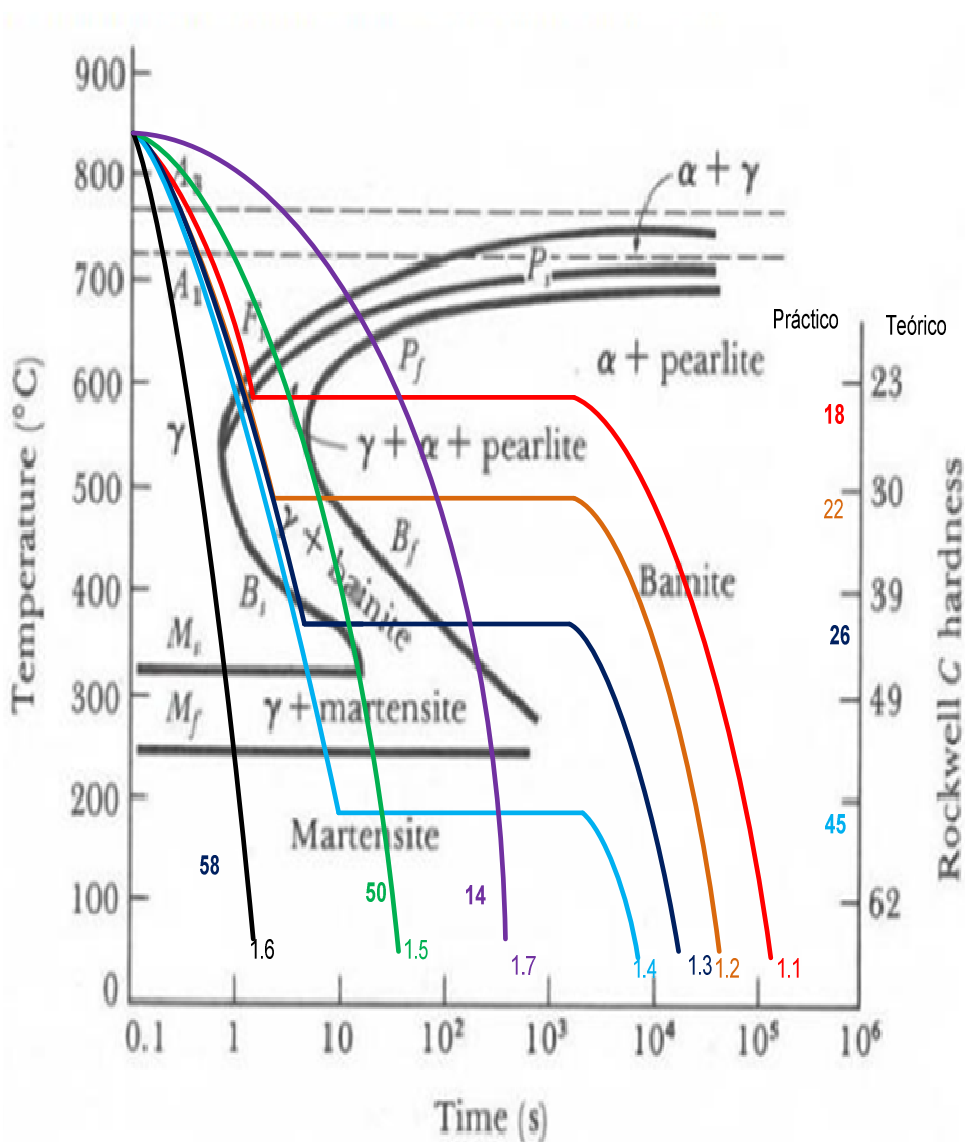


Figura 5. 5 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1045 con la escala de durezas.

5.4.1.2. Analizando los resultados del ensayo de dureza del acero AISI 1070 se obtiene que:

- El material base presenta una dureza de 90 HRB.
- Durante los diferentes tratamientos térmicos se evidencia que a medida que disminuye la temperatura de enfriamiento las durezas alcanzadas aumentan, como se muestra en la figura 5.6

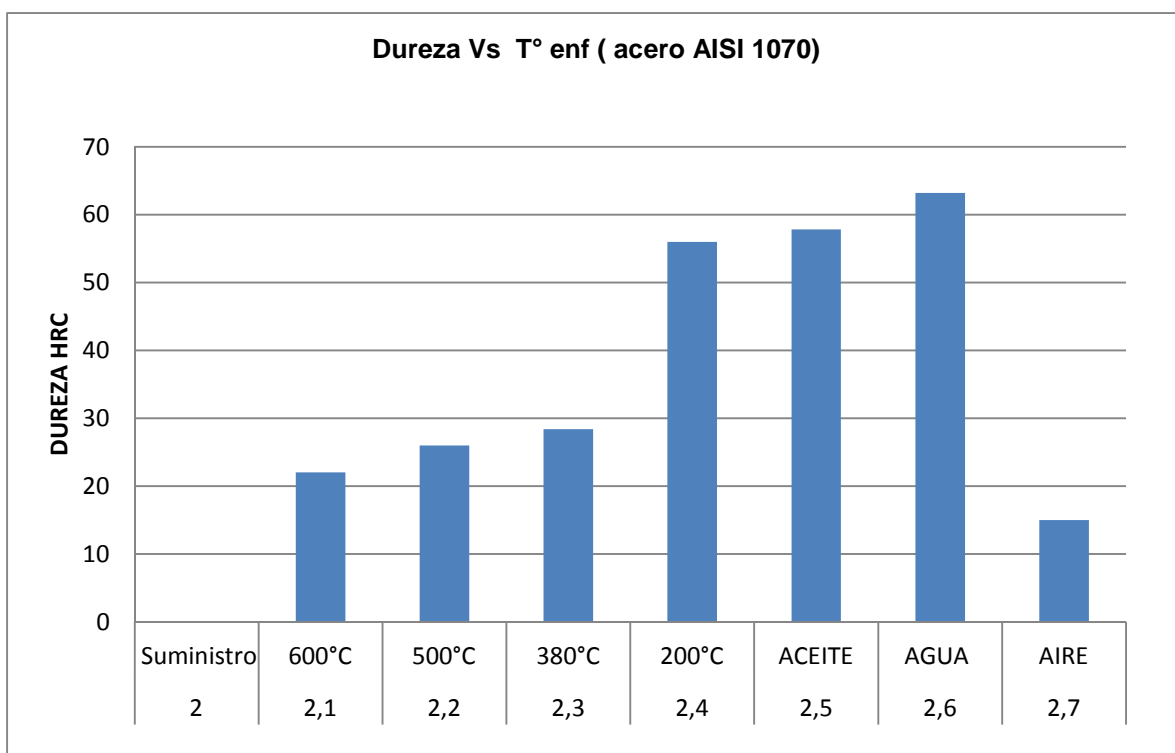


Figura 5.6 Dureza vs temperatura de enfriamiento AISI 1070.

- De la figura 5.6 se observa que el valor máximo obtenido de Dureza es 63 HRC cuando el medio de enfriamiento fue en agua. Mientras que los valores de dureza intermedios se incrementaron consecutivamente.

Una vez realizado el análisis de durezas se puede completar el diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1070 con la escala de durezas que determina o que permite mostrar sus durezas prácticas alcanzadas en los tratamientos térmicos realizados como se muestra en la figura 5.7

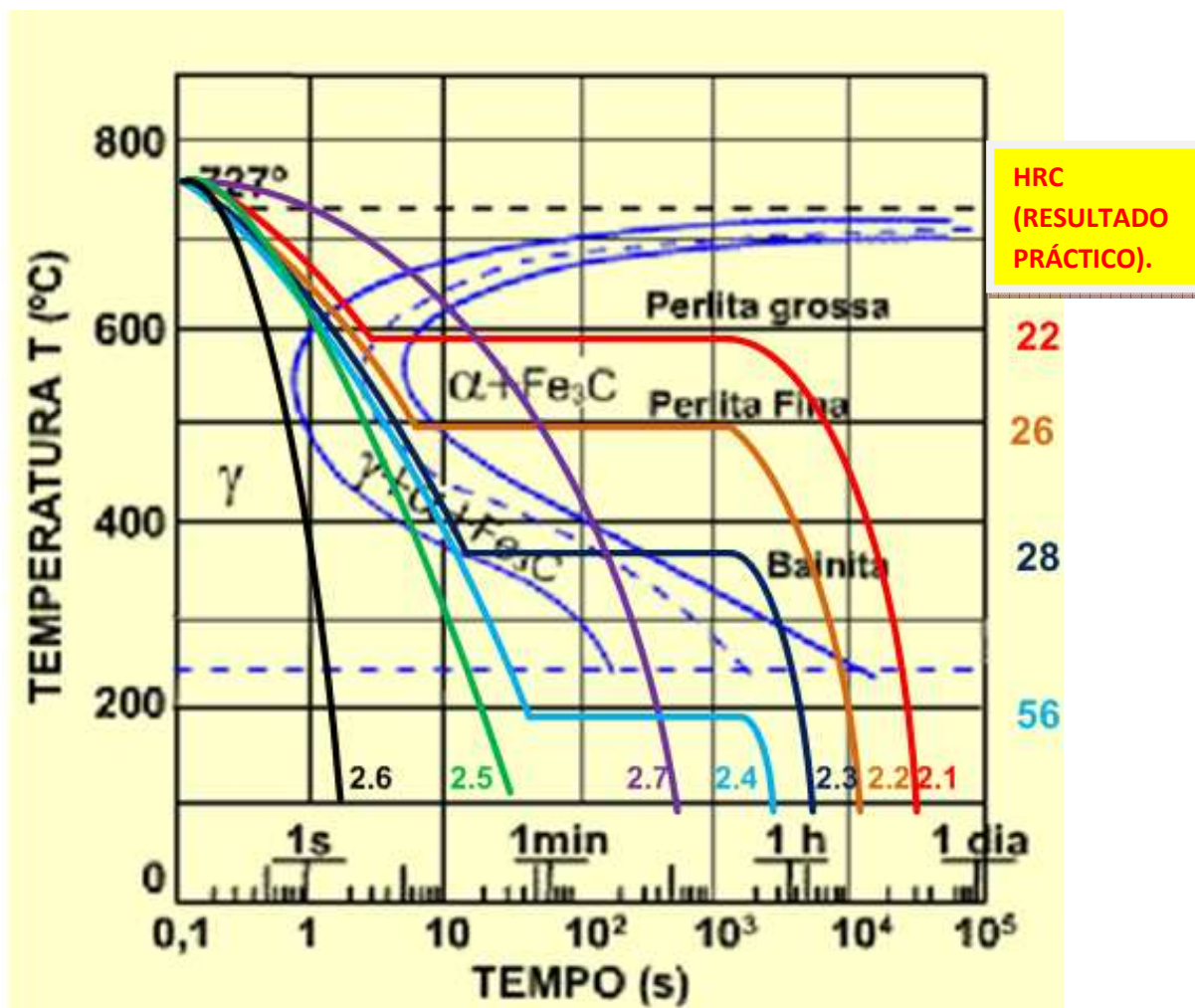


Figura 5. 7 Diagrama de temperatura de enfriamiento, tiempo de transformación isotérmica para el acero AISI 1070 con la escala de durezas.

5.4.2. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO CHARPY

El ensayo charpy se efectuó solo para el acero AISI 1045 puesto que las dimensiones del acero AISI 1070 en condiciones de suministro solo se encontraba en alambrcn de 9mm de diámetro, lo cual no permitió la construcción de las probetas normalizadas para el ensayo charpy.

- El acero AISI 1045 en estado de suministro tiene una resistencia al impacto de 41 N.m.

- Durante los diferentes tratamientos térmicos se evidencia que a medida que disminuye la temperatura de enfriamiento la resistencia al impacto disminuye, como se muestra en la figura 5.8 cuyo resultado es lógico en función de que a medida de que se aumenta la dureza disminuye la capacidad de absorber energía de impacto lo que está de acuerdo con las propiedades de los materiales.

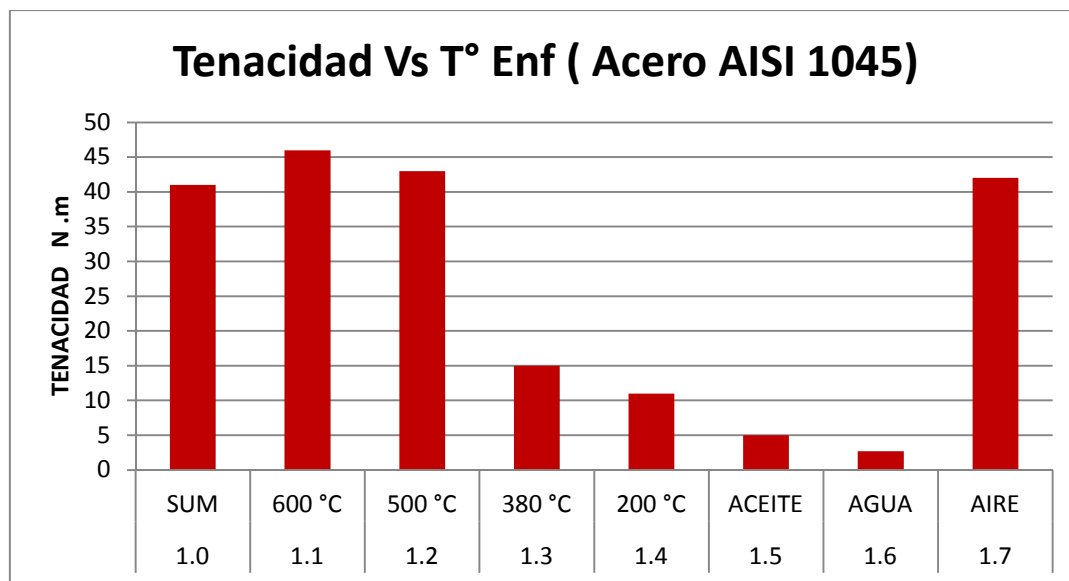


Figura 5. 8 Tenacidad vs T°enfriamiento para el ac ero AISI 1045.

- Según la figura 5.8 la mayor resistencia al impacto que mostró el acero AISI 1045 cuando el enfriamiento se produjo a una temperatura de 600°C, alcanzando 46 N.m.
- El menor valor de resistencia al impacto que se obtuvo en el ensayo de impacto fue 2.5N.m, cuando el temple fue en agua.

-

5.4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio en cuanto a la resistencia a la tracción muestran cierta tendencia que es importante comparar en cada acero y se presenta a continuación.

5.4.3.1. Analizando los resultados del ensayo de tracción del acero AISI 1045 se obtiene que:

- El acero AISI 1045 en estado de suministro tiene una resistencia a la tracción de 696 N/mm².
- Durante los diferentes tratamientos térmicos se evidencia que a medida que disminuye la temperatura de enfriamiento la resistencia a la tracción aumenta, como se muestra en la figura 5.9

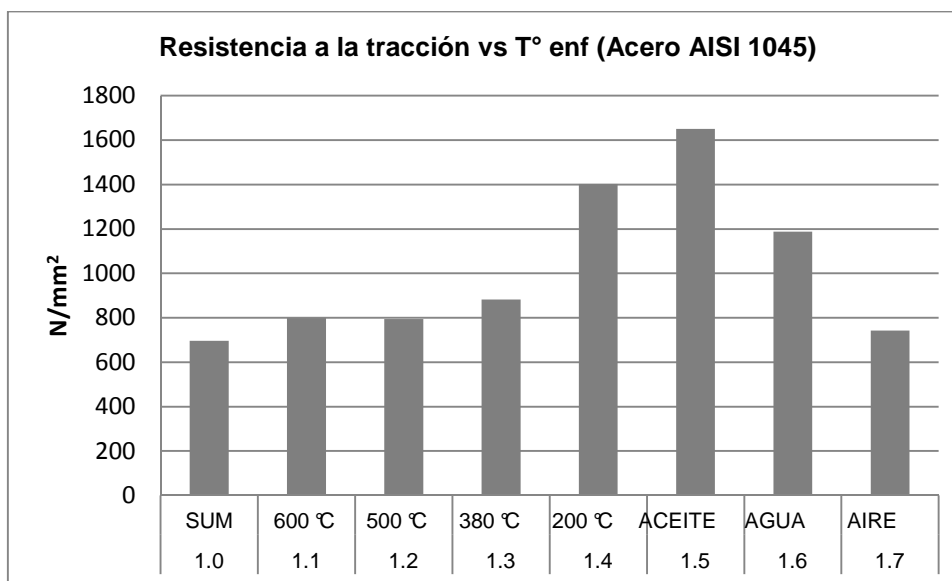


Figura 5.9 Resistencia a la tracción vs Temperatura de enfriamiento.

- Según la figura 5.9 la mayor resistencia a la tracción que mostró el acero AISI 1045 se obtuvo cuando el temple fue en aceite, alcanzando 1651 N/mm². Pero en realidad se habría obtenido un valor mucho más alto en el temple en agua, pero por seguridad fue suspendido el ensayo en 1188 N/mm². Sin embargo, se tomó un valor referencial de tablas que relacionan dureza con resistencia a la tracción cuyo valor es 2107 N/mm² para aceros ver **Anexo H**.
- El menor valor de resistencia a la tracción que se obtuvo fue 742 N/mm², cuando el acero fue normalizado.

5.4.3.2. Analizando los resultados del ensayo de tracción del acero AISI 1070 se obtiene que:

- El acero AISI 1070 en estado de suministro tiene una resistencia a la tracción de 1084 N/mm².
- Durante los diferentes tratamientos térmicos se evidencia que a medida que disminuye la temperatura de enfriamiento la resistencia a la tracción aumenta, como se muestra en la figura 5.10

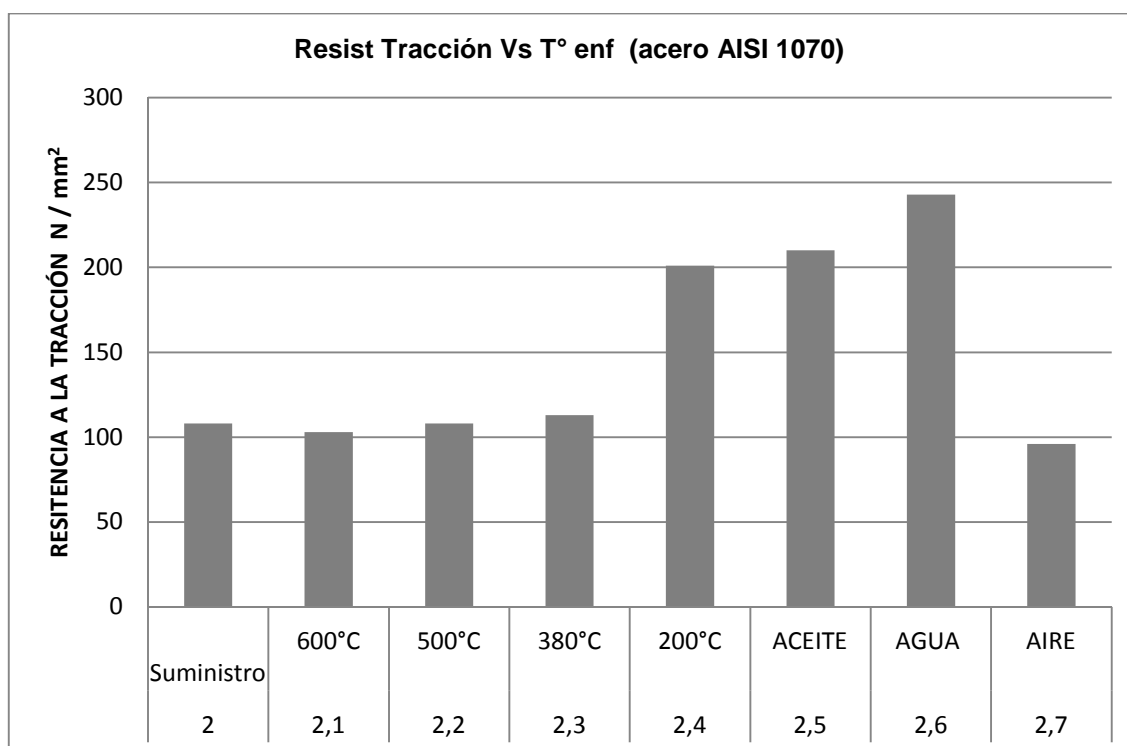


Figura 5.10 Resistencia a la tracción vs Temperatura de enfriamiento.

- Según la figura 5.10 la mayor resistencia a la tracción que mostró el acero AISI 1070 obtenido cuando el temple fue en agua, alcanzando 2432.88 N/mm².
- El menor valor de resistencia a la tracción obtenido fue 966 N/mm², cuando el acero fue normalizado.

5.4.4. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL ACERO AISI 1045

En la figura 5.11 se muestra la comparación de los resultados de la dureza, tenacidad y resistencia a la tracción obtenidos en los tratamientos térmicos para el acero AISI 1045.

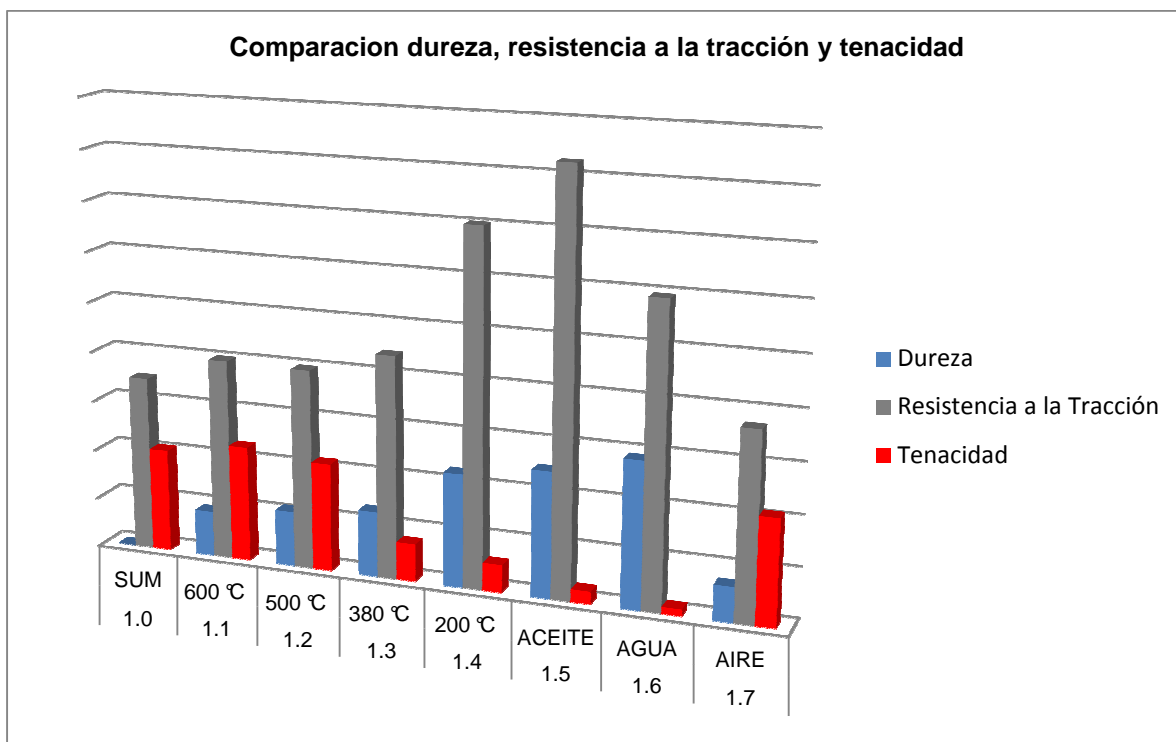


Figura 5.11 Comparación de Propiedades Mecánicas en el Acero AISI 1045

- En la figura 5.11 se observa principalmente que conforme aumenta la dureza del acero AISI 1045 aumenta también la resistencia a la tracción pero existe una disminución de la tenacidad del acero.

5.4.5. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL ACERO AISI 1070

En la figura 5.12 se muestra la comparación de los resultados de la dureza, y resistencia a la tracción obtenidos en los tratamientos térmicos para el acero AISI 1070.

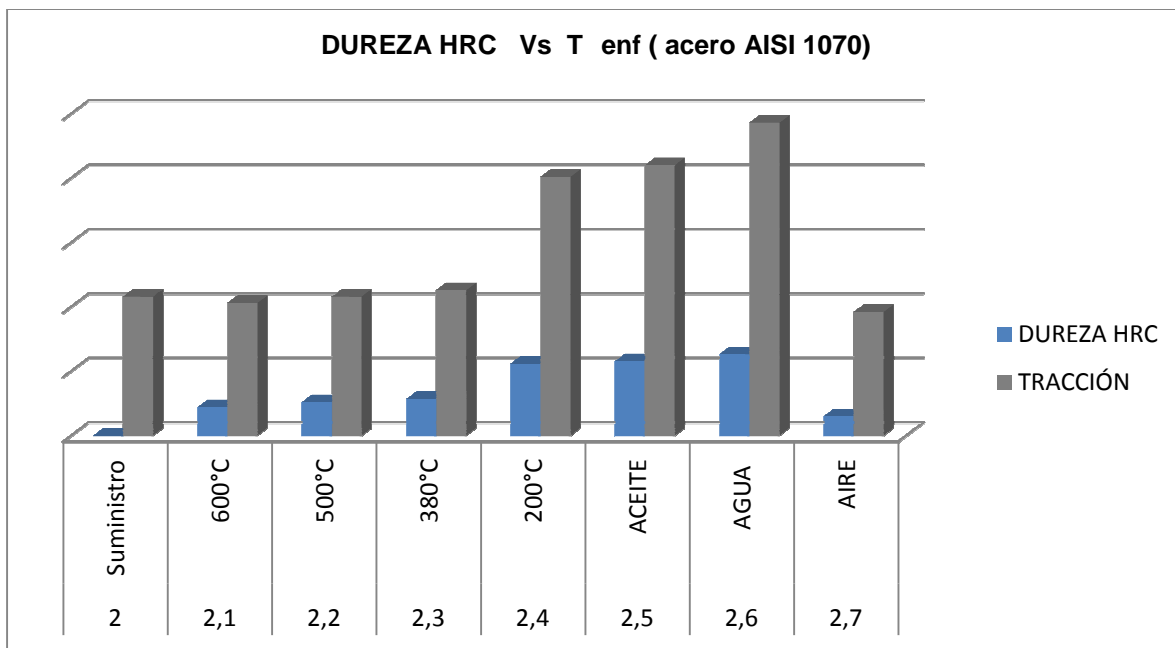


Figura 5.12 Dureza vs T°enfriamiento para el acero AISI 1070

- En la figura 5.12 se observa principalmente que conforme aumenta la dureza del acero AISI 1070 aumenta también la resistencia a la tracción

5.5. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN EN LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Una vez realizado el tratamiento térmico, haber alcanzado las durezas esperadas y haber analizado las metalografías se procede a realizar los ensayos de tracción para entender el comportamiento de los aceros.

5.5.1. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL ACERO AISI 1045

El ensayo de tracción para el acero AISI 1045 fue realizado en el laboratorio de ensayos destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional donde se obtienen los diagramas esfuerzo deformación dada por el software navigator del equipo, que se indican a continuación:

Probeta 1.0

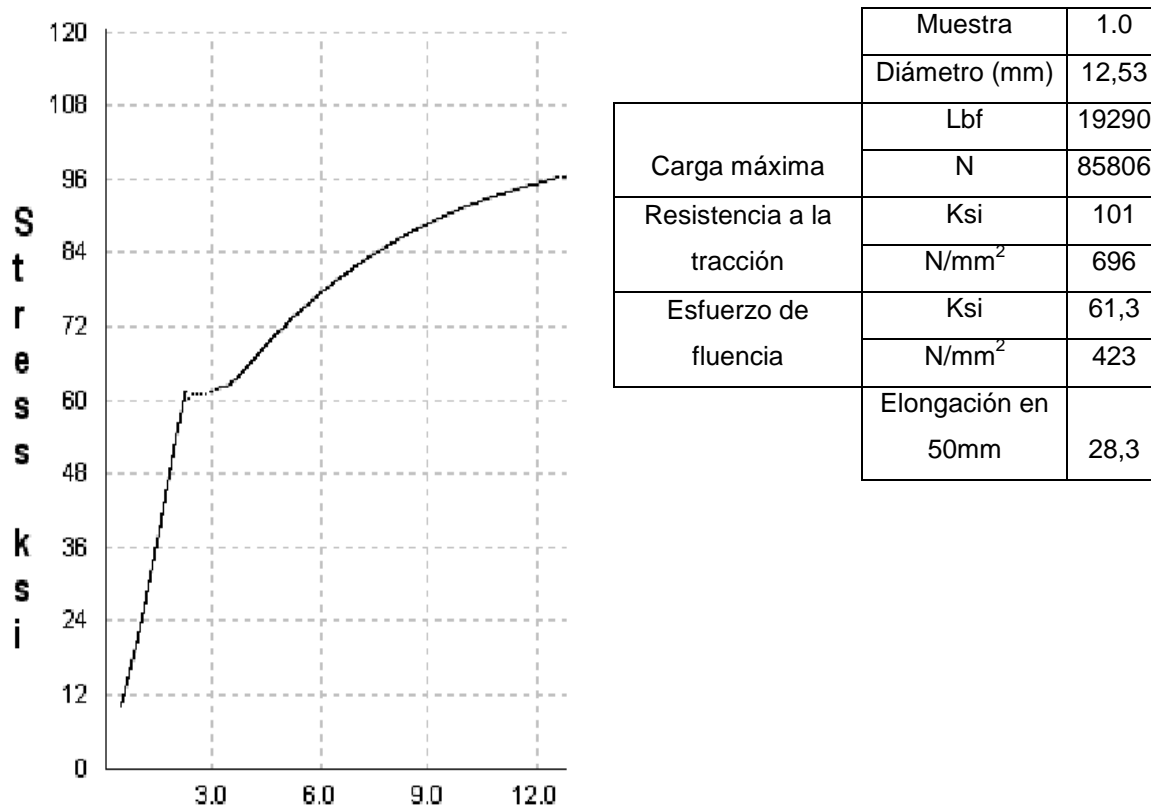
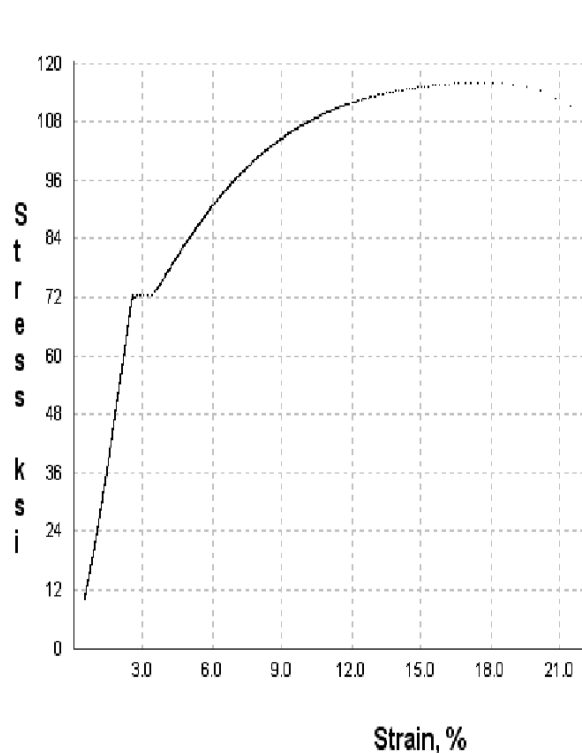


Figura 5.13 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.0 del acero AISI 1045.

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.0 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero dúctil ya que en ella se observa la zona elástica, la zona de fluencia y la zona de endurecimiento por deformación. Presentando un valor del esfuerzo de fluencia de 423 N/mm² y de resistencia a la tracción de 696 N/mm².

Probeta 1.1

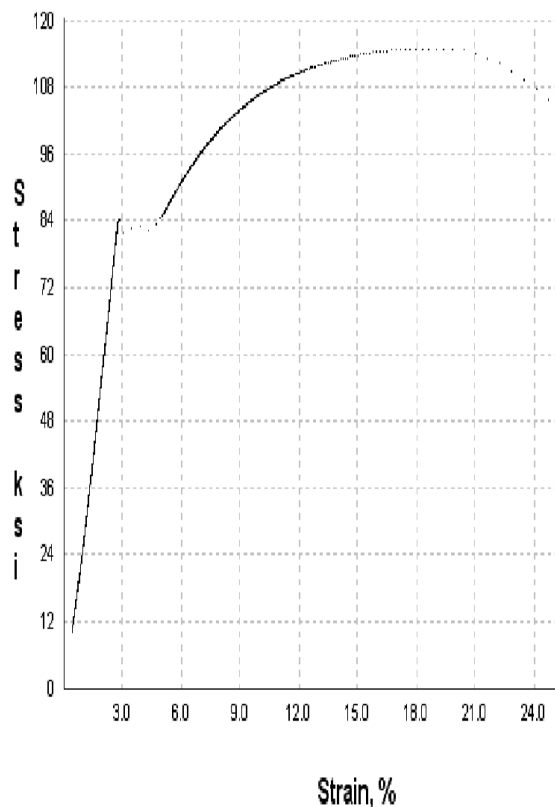


	Muestra	1.1
	Diámetro (mm)	12,53
Carga máxima	lbf	22600
	N	100530
Resistencia a la tracción	Ksi	116
	N/mm ²	794
Esfuerzo de fluencia	Ksi	72,2
	N/mm ²	498
	Elongación en 50mm	23,5

Figura 5.14 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.1 del acero AISI 1045.

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.1 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero dúctil ya que en ella se observa la zona elástica, la zona de fluencia y la zona de endurecimiento por deformación. Presentando un valor del esfuerzo de fluencia de 498 N/mm² y de resistencia a la tracción de 799 N/mm². En esta probeta la zona elástica presenta un ligero incremento en comparación con la probeta 1.0.

Probeta 1.2

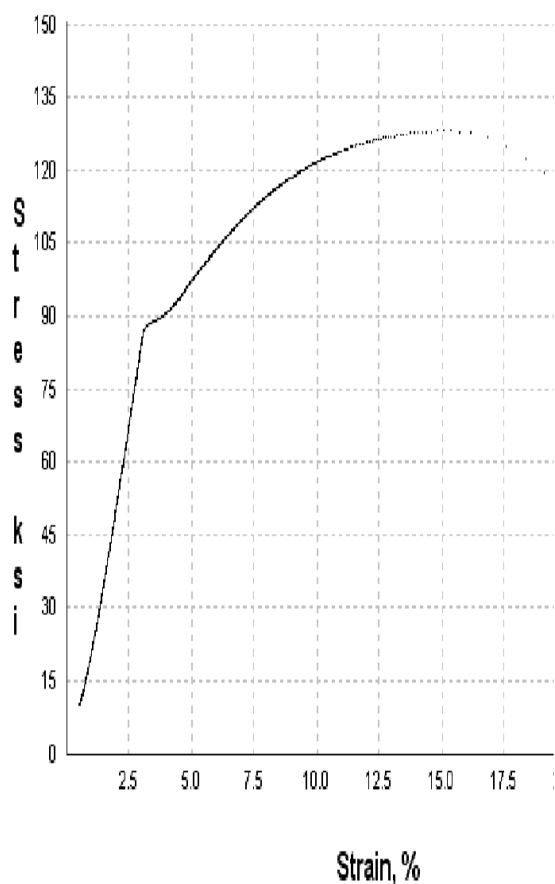


	Muestra	1.2
	Diámetro (mm)	12,53
Carga máxima	lbf	21200
	N	94302
Resistencia a la tracción	Ksi	114,9
	N/mm ²	799
Esfuerzo de fluencia	Ksi	84,1
	N/mm ²	580
	Elongación en 50mm	25,6

Figura 5.15 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.2 del acero AISI 1045.

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.2 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero dúctil ya que en ella se observa la zona elástica, la zona de fluencia y la zona de endurecimiento por deformación. Presentando un valor del esfuerzo de fluencia de 580 N/mm² y de resistencia a la tracción de 799 N/mm². Se observa el incremento de la zona elástica.

Probeta 1.3

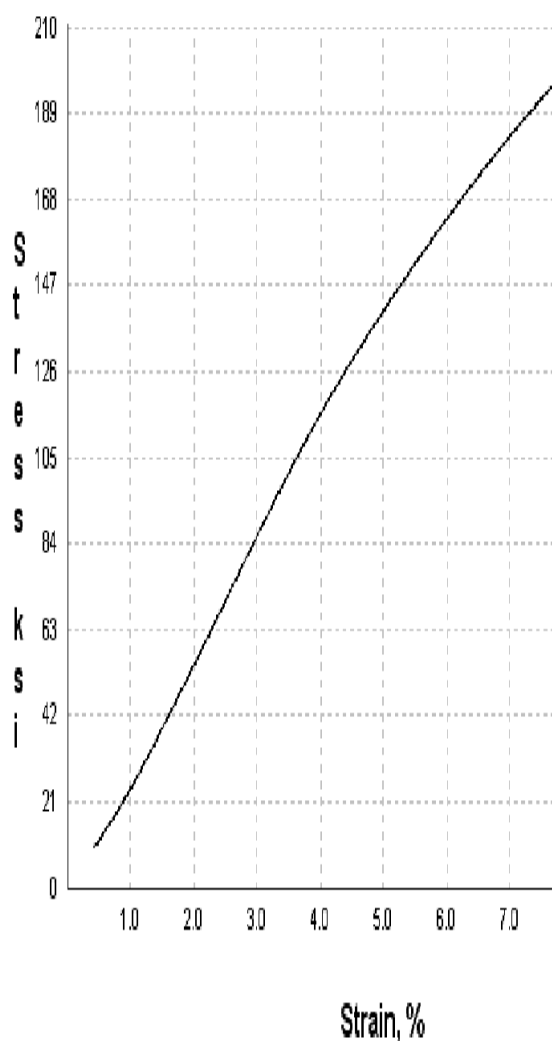


	Muestra	1.3
	Diámetro (mm)	12,38
Carga máxima	lbf	23900
	N	106313
Resistencia a la tracción	Ksi	128
	N/mm ²	883
Esfuerzo de fluencia	Ksi	101,5
	N/mm ²	700
	Elongación en 50mm	22,4

Figura 5.16 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.3 del acero AISI 1045.

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.3 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva moderadamente dúctil en comparación con las anteriores puesto que la zona de fluencia se ha reducido. Presentando un valor del esfuerzo de fluencia de 700 N/mm² y de resistencia a la tracción de 883 N/mm².

Probeta 1.4

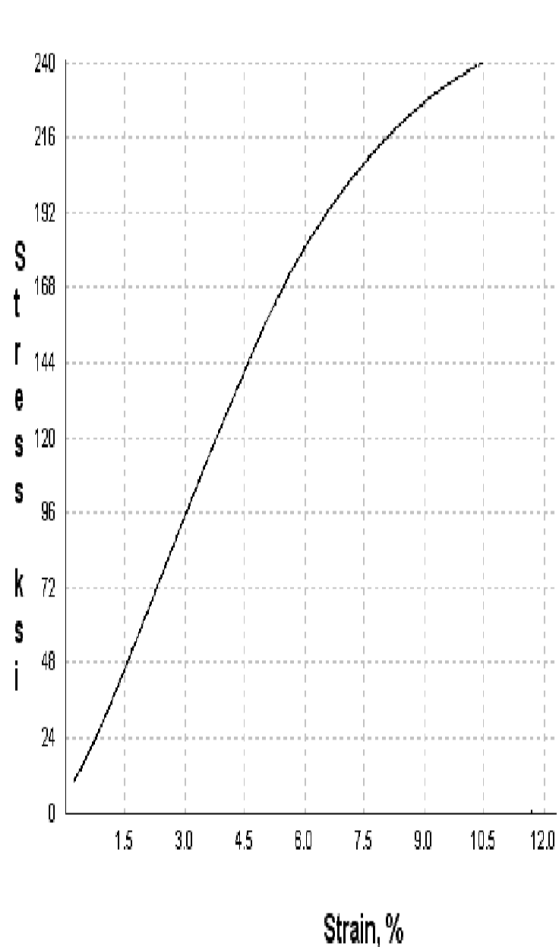


	Muestra	1.4
	Diámetro (mm)	12,68
Carga máxima	lbf	39800
	N	177039
Resistencia a la tracción	Ksi	203
	N/mm ²	1402
Esfuerzo de fluencia	Ksi	
	N/mm ²	
	Elongación en 50mm	7,73

Figura 5.17 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.4 del acero AISI 1045

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.4 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero frágil es decir no hay evidencia de la zona de fluencia debido a que el material se ha endurecido. Presentando un valor de resistencia a la tracción de 1402 N/mm².

Probeta 1.5

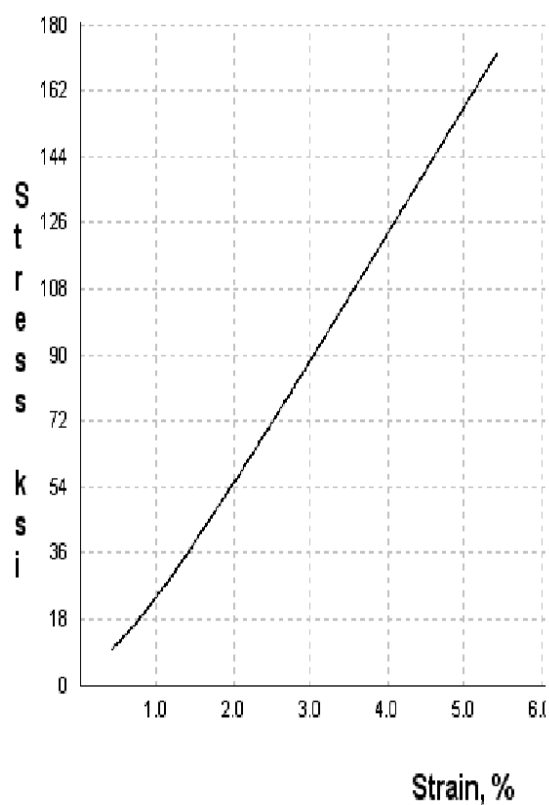


	Muestra	1.5
	Diámetro (mm)	12,34
Carga máxima	lbf	44400
	N	197501
Resistencia a la tracción	Ksi	240
	N/mm ²	1651
Esfuerzo de fluencia	Ksi	176,3
	N/mm ²	1216
	Elongación en 50mm	10,25

Figura 5.18 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.5 del acero AISI 1045.

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.5 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero frágil es decir no hay zona de deformación sino que la ruptura es impredecible. Presentando un valor de resistencia a la tracción de 1651 N/mm².

Probeta 1.6



	Muestra	1.6
	Diámetro (mm)	12,5634
Carga máxima	lbf	33100
	N	147236
Resistencia a la tracción	Ksi	172,1
	N/mm ²	1188
Esfuerzo de fluencia	Ksi	
	N/mm ²	
	Elongación en 50mm	5

Figura 5.19 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.6 del acero AISI 1045.

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.6 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero frágil. No se evidencia ningún tipo de deformación ya que el material es sumamente frágil. Presentando un valor de resistencia a la tracción de 2432.88 N/mm².

Probeta 1.7

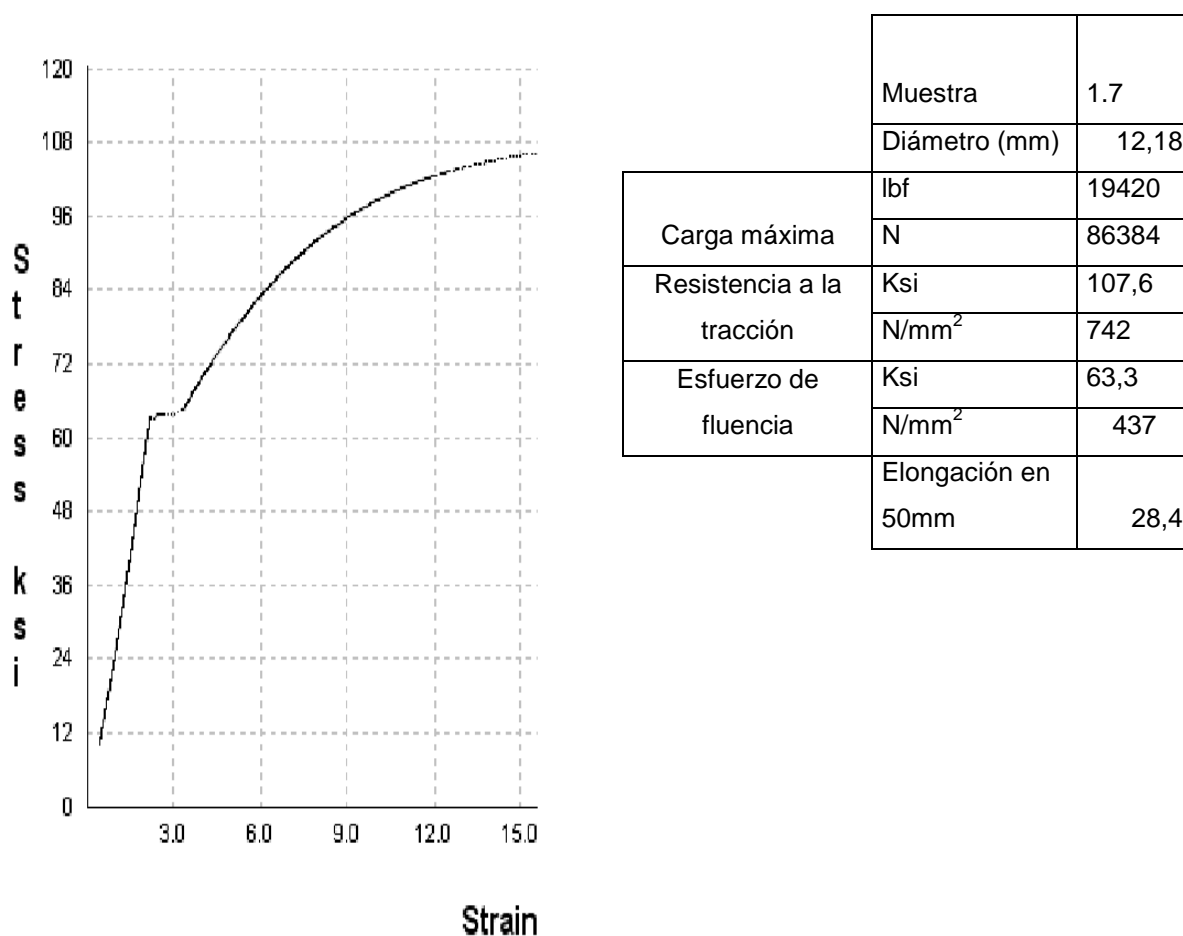


Figura 5.20 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.7 del acero AISI 1045

Al analizar el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 1.7 del acero AISI 1045 se observa que el acero presenta la curva característica de un acero dúctil ya que en ella se observa la zona elástica, la zona de fluencia y la zona de endurecimiento por deformación. Presentando un valor del esfuerzo de fluencia de 437 N/mm² y de

resistencia a la tracción de 742 N/mm². En esta muestra la zona elástica presenta un ligero incremento en comparación con la probeta 1.0

En la tabla 5.3 se muestra como varían las propiedades de las probetas tratadas térmicamente para el acero AISI 1045.

Tabla 5. 3. Propiedades de las probetas del acero AISI1045.

Código de probeta		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	
P R O P I E D A D E S	Dureza							
	Tenacidad							
	Resistencia a la tracción							
	Ductilidad							
	Elasticidad							
	Límite de fluencia							

5.5.2. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL ACERO AISI 1070

El ensayo de tracción fue realizado en el laboratorio de ensayos destructivos de la empresa Ideal Alambrec donde se obtienen los diagramas fuerza-desplazamiento dada por el software del equipo en el cual resulta complicado establecer las diferentes zonas elástica, de fluencia y de endurecimiento por deformación que presenta el material tratado térmicamente.

Probeta 2.0

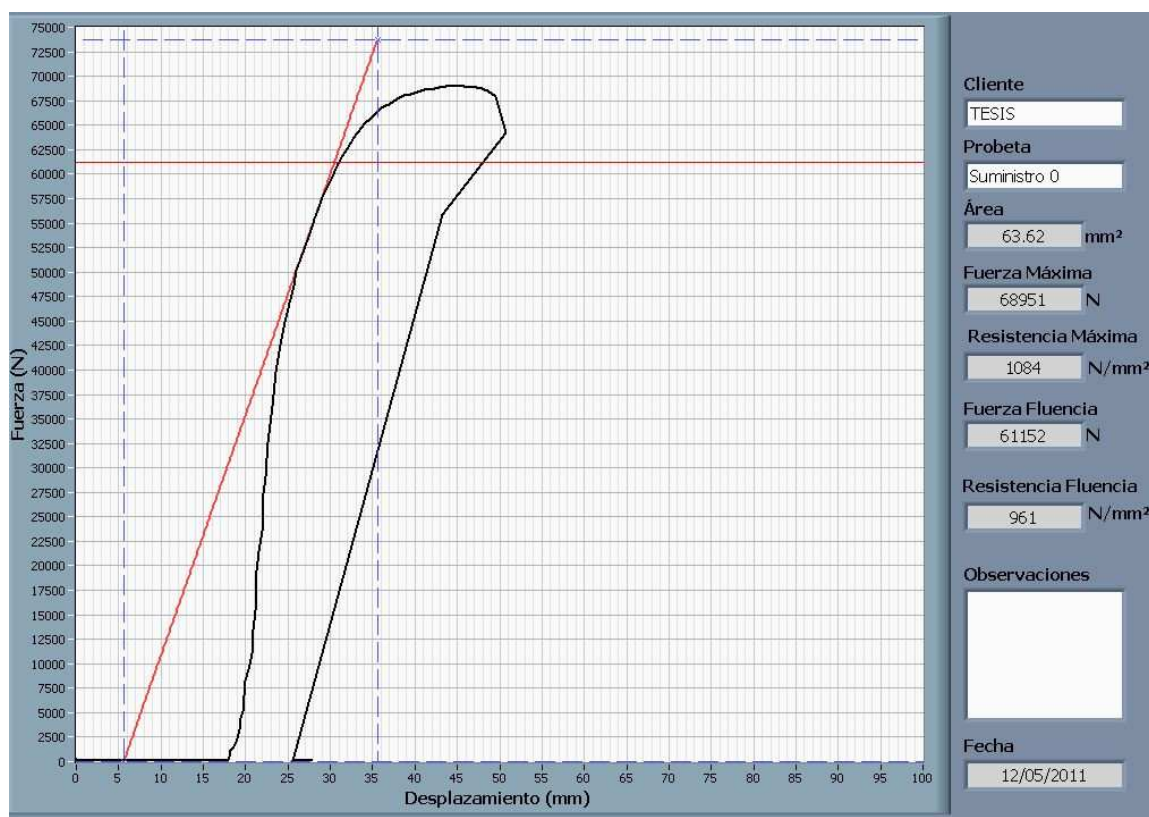


Figura 5. 21 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.0 del acero AISI 1070.

Al analizar el diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.0 del acero AISI 1070. Se observa que presenta un valor de resistencia de fluencia de 961 N/mm² y una resistencia máxima de 1084 N/mm². En esta probeta se tiene un acero dúctil.

Probeta 2.1

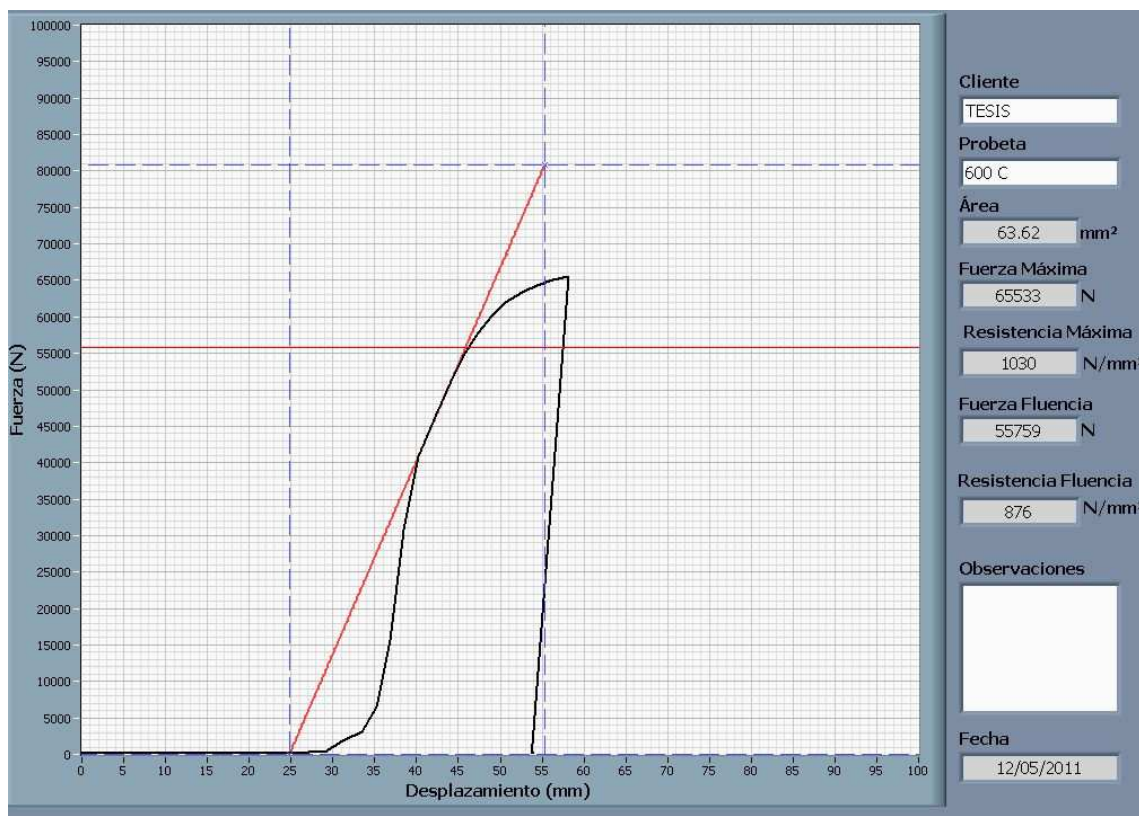


Figura 5.22 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.1 del acero AISI 1070.

Al analizar el diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.1 del acero AISI 1070, se observa que presenta un valor de resistencia de fluencia de 876 N/mm² y una resistencia máxima de 1030 N/mm². Es decir en el material disminuye la elasticidad y el límite de fluencia en comparación con la probeta 2.0 y presenta comportamiento dúctil.

Probeta 2.2

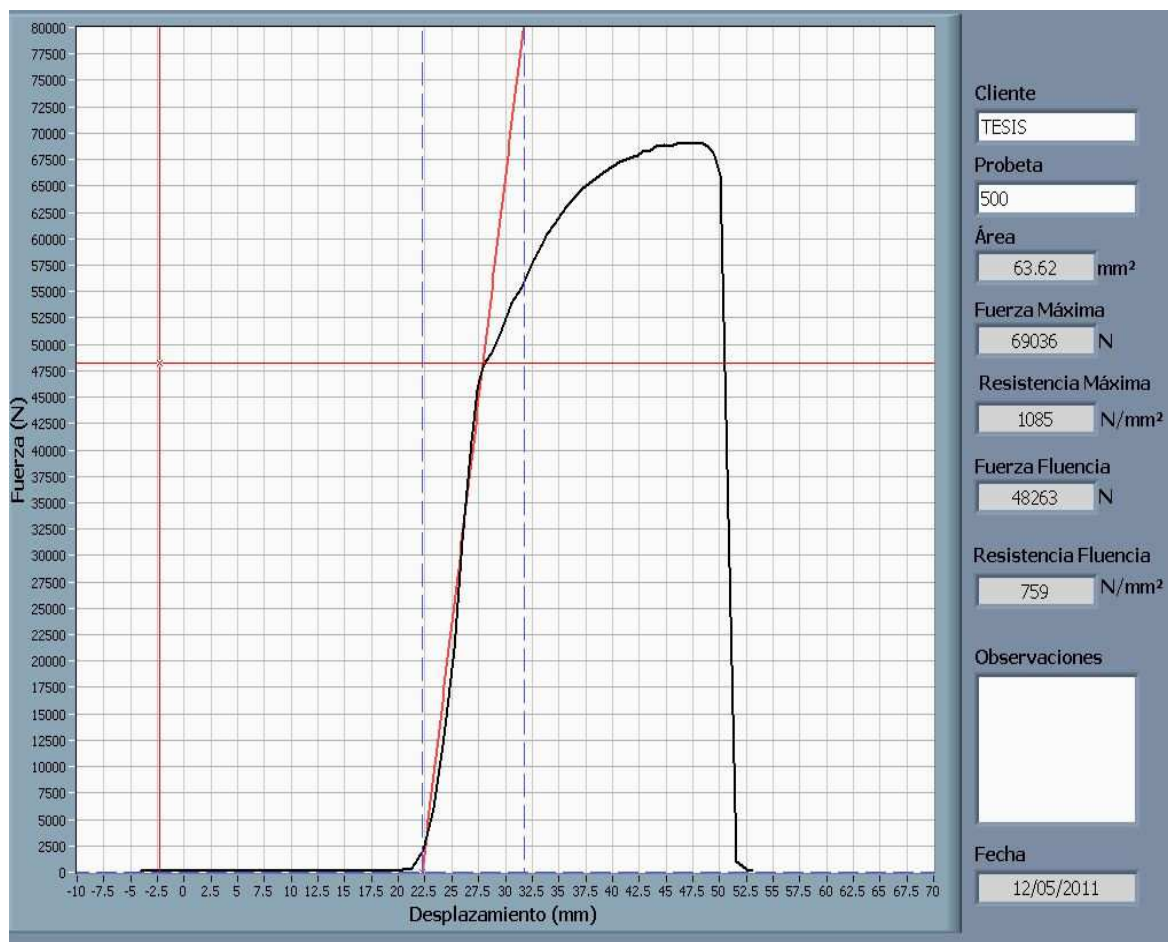


Figura 5. 23 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.2 del acero AISI 1070.

Al analizar el diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.2 del acero AISI 1070, se observa que presenta un valor de resistencia de fluencia de 759 N/mm^2 y una resistencia máxima de 1085 N/mm^2 . En esta probeta disminuye la elasticidad y se evidencia que disminuye el límite de fluencia, presentando un comportamiento dúctil.

Probeta 2.3

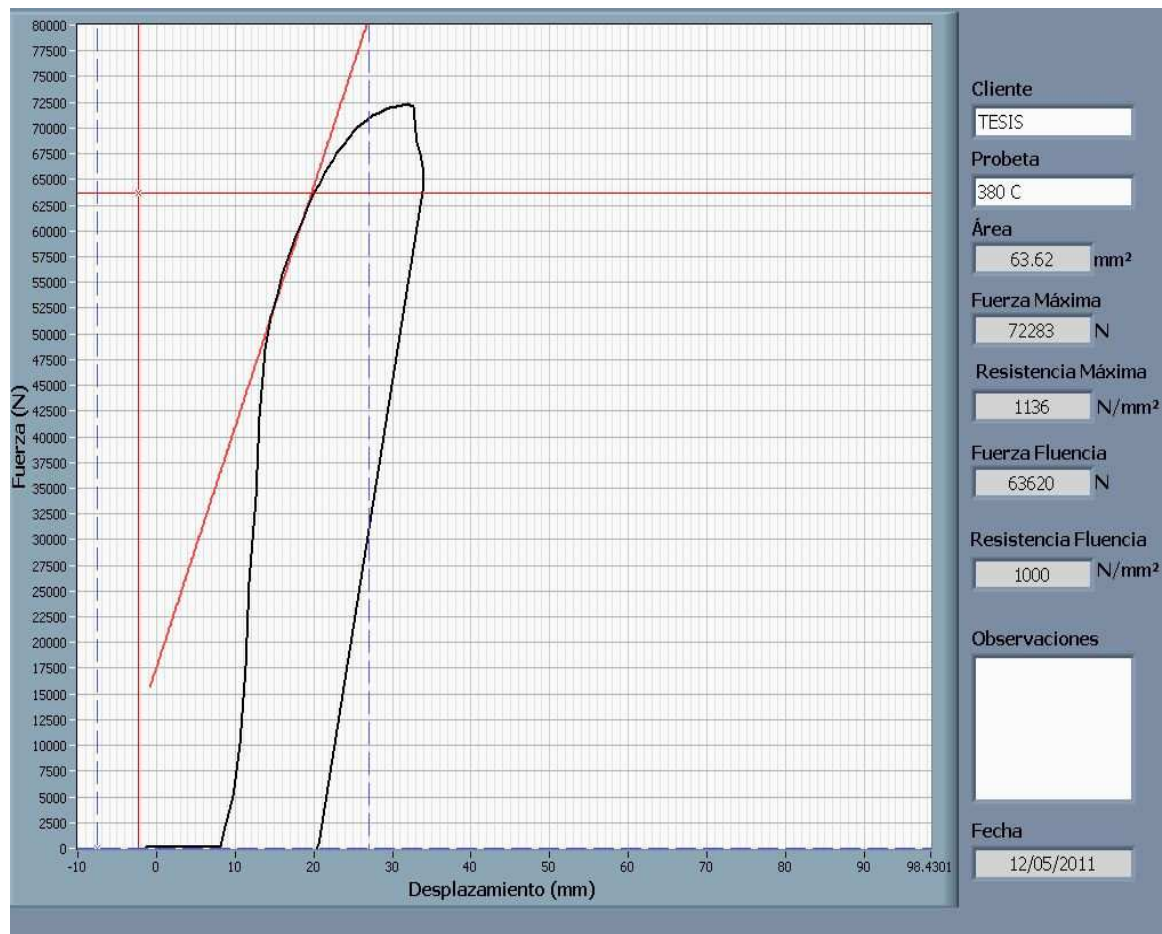


Figura 5. 24 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.3 del acero AISI 1070.

Al analizar el diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.3 del acero AISI 1070, se observa que presenta un valor de resistencia de fluencia de 1000 N/mm² y una resistencia máxima de 1136 N/mm². Se observa que el material es moderadamente dúctil ya que se tiene menor elasticidad y menor fluencia.

Probeta 2.7

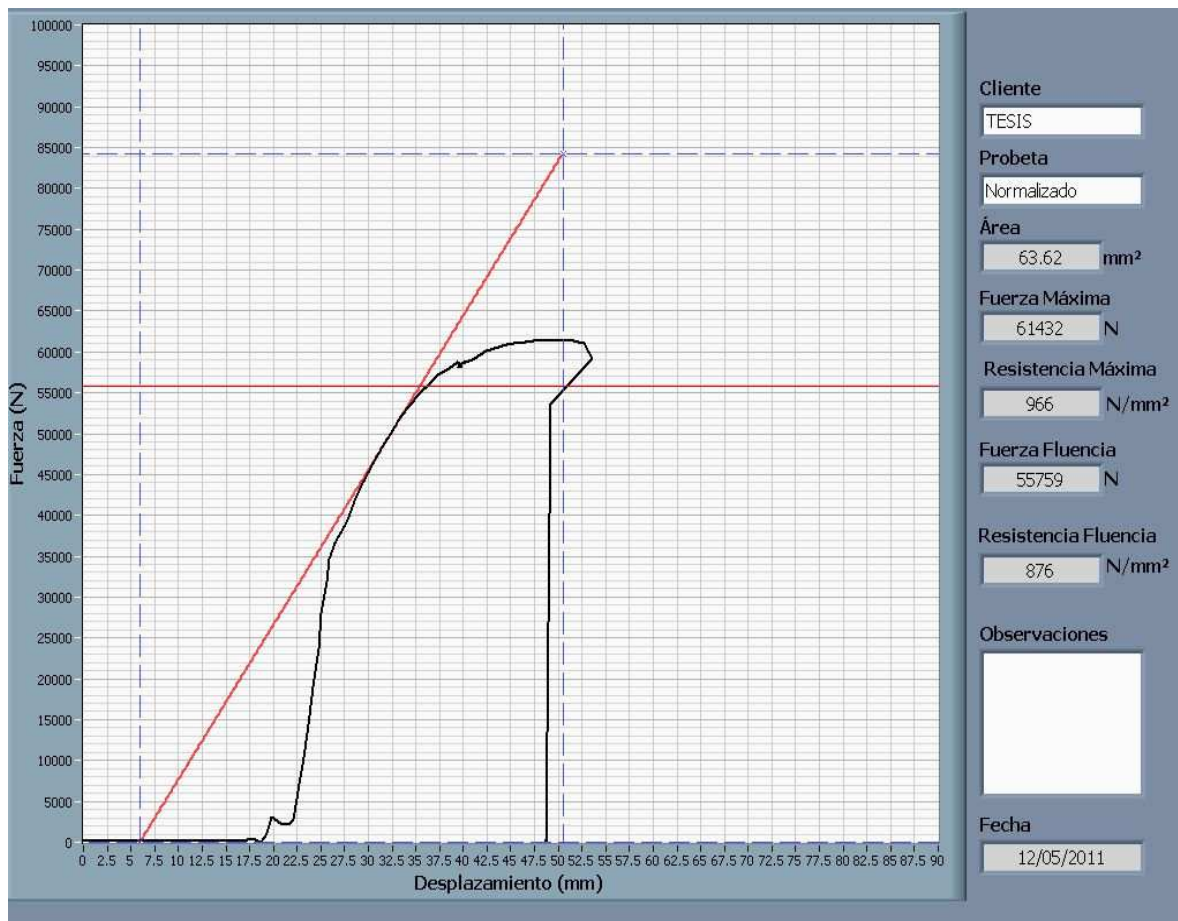


Figura 5. 25 Diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.7 del acero AISI 1070.

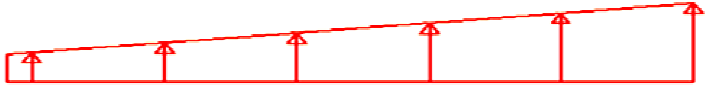

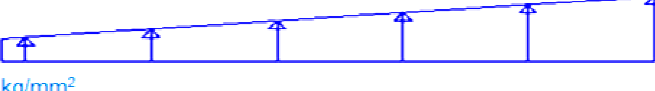
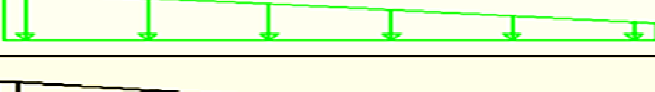
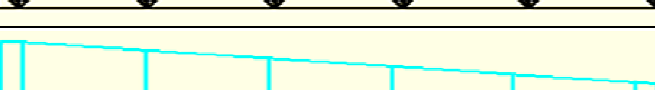

Al analizar el diagrama fuerza desplazamiento de la probeta 2.7 del acero AISI 1070, se observa que presenta un valor de resistencia de fluencia de 867 N/mm^2 y una resistencia máxima de 966 N/mm^2 . En esta probeta se observa que se trata de un acero dúctil con valores menores en comparación con la probeta 2.0

Para las probetas que se indican a continuación:

- 2.4, enfriada a 200°C.
- 2.5, enfriada en aceite.
- 2.6, enfriada en agua.

No se pudo realizar el ensayo de tracción ya que el material al alcanzar alta dureza se vuelve frágil y en el momento de ser colocadas en el equipo, la probeta 2.5 templada aceite se rompió, mientras que las probetas 2.4 enfriada a 200°C y la probeta 2.6 templada en agua no pudieron ser sujetadas por las mordazas del equipo de ensayo por que la dureza de las probetas era mucho mayor que la dureza de las mordazas de la máquina de ensayos. En la tabla 5.4 se muestra un resumen de las propiedades del acero AISI 1070.

Tabla 5. 4. Resumen de las propiedades del acero AISI 1070.

Código de probeta		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
P R O P I E D A D E S	Dureza						
	Tenacidad						
	Resistencia a la tracción						
	Ductilidad						
	Elasticidad						
	Límite de fluencia						

5.6. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE FASE EN CADA TRATAMIENTO TÉRMICO

Para realizar este análisis se construye un diagrama que muestre las metalografías, las escalas de dureza y las curvas de enfriamiento a las diversas temperaturas de enfriamiento utilizadas. En la figura 5.26 se observa el análisis de fase del tratamiento térmico en el acero AISI 1045.

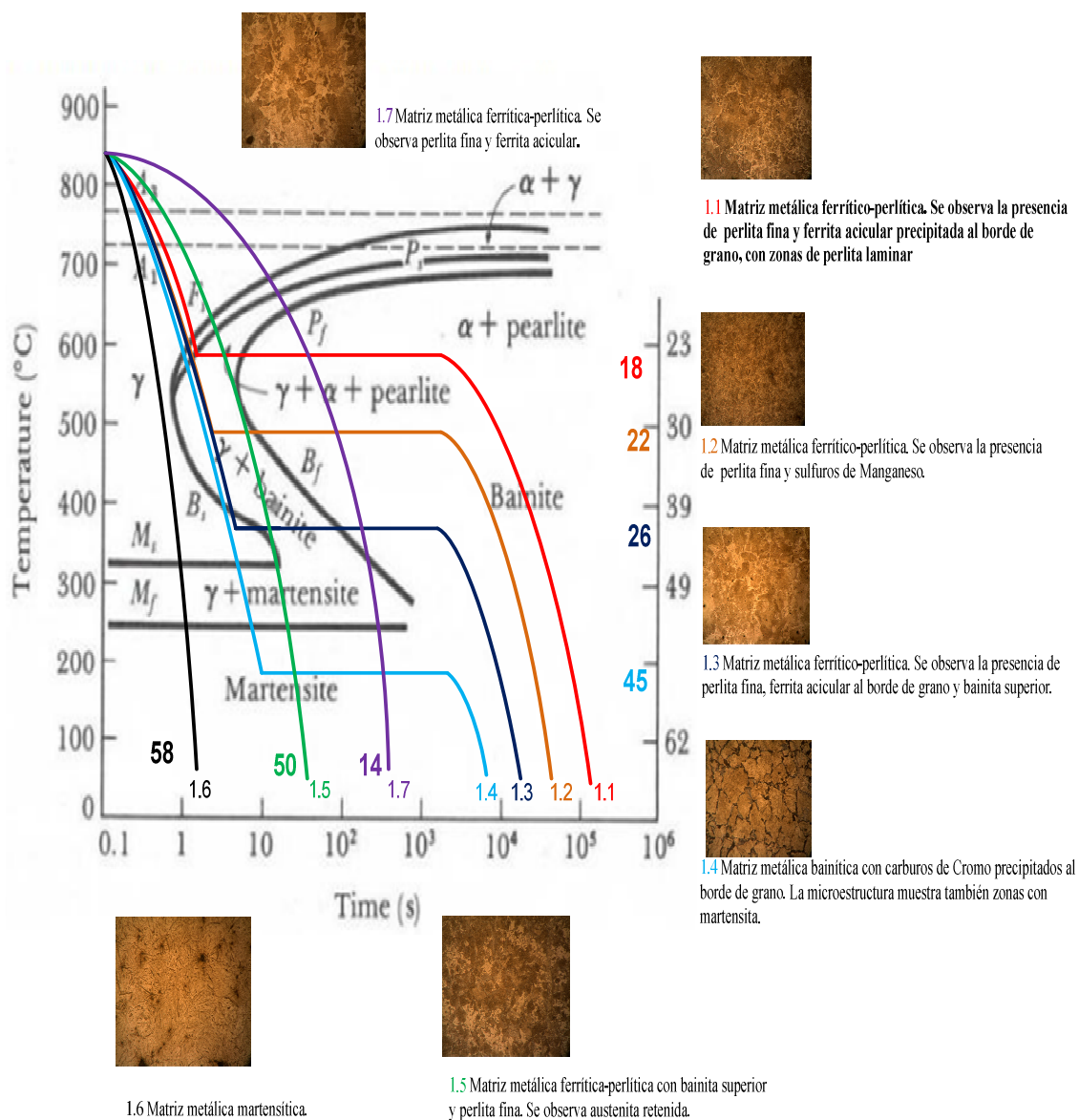


Figura 5. 26 Análisis de fase del tratamiento térmico en el acero AISI 1045

En la figura 5.27 se observa el análisis de fases del tratamiento térmico en el acero AISI 1070.

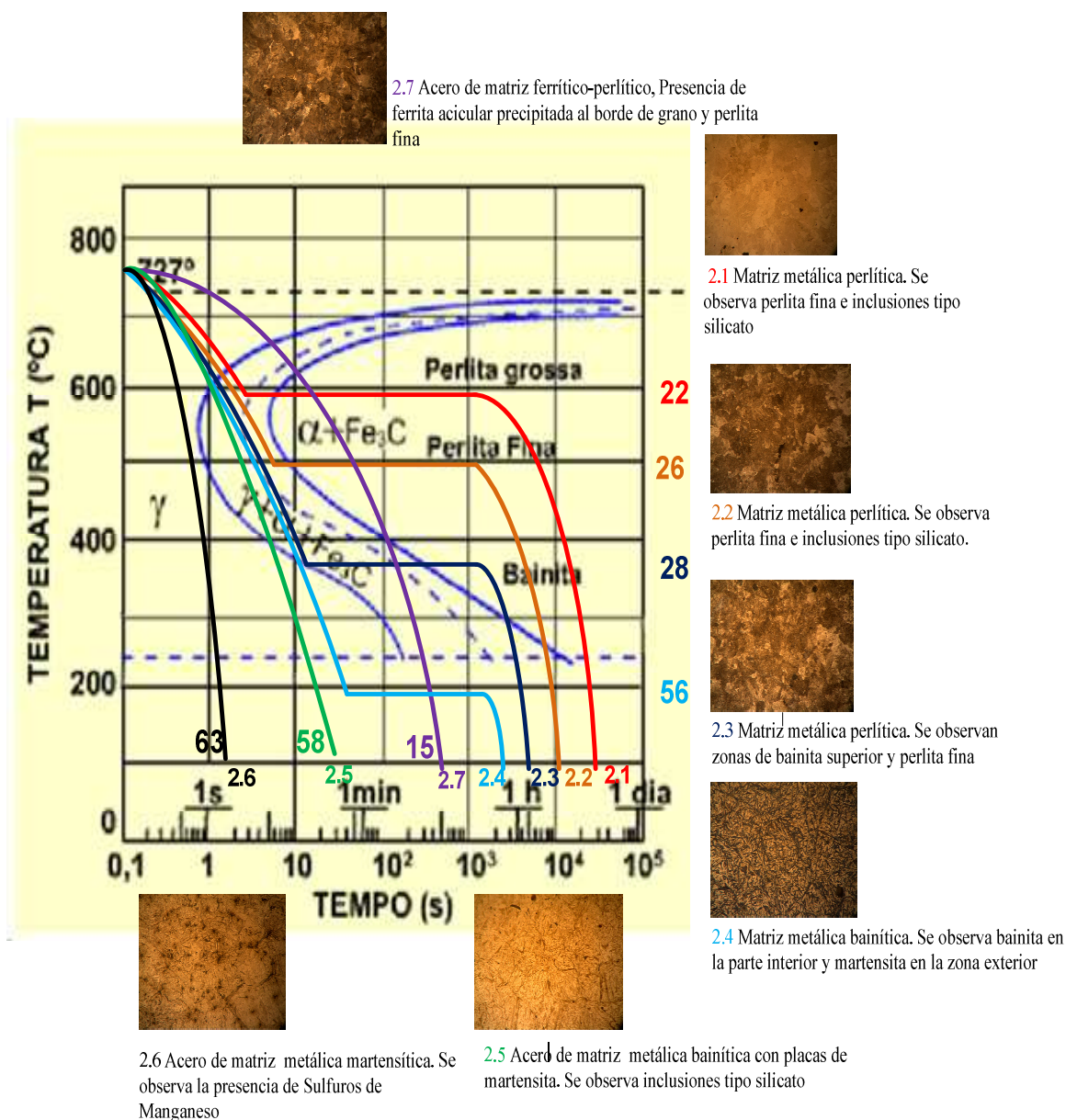


Figura 5.27 Análisis de fase del tratamiento térmico en el acero AISI 1070.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El presente estudio permite comprobar el efecto de la temperatura de enfriamiento sobre las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente como se evidencia en los diferentes resultados mostrados.

El presente estudio constituye uno de los primeros trabajos experimentales que trata de comprobar el diagrama TTT para los aceros AISI 1045 y AISI1070 respectivamente , analizando las transformaciones que sufre el acero a diferentes intervalos de enfriamiento.

El presente estudio permite al usuario o técnico de tratamientos térmicos tener la posibilidad de escoger una dureza aproximada de acuerdo a un diagrama TTT antes de realizar el tratamiento térmico.

De acuerdo al presente estudio experimental se evidencia la importancia de los recocidos isotérmicos ya que se permite alcanzar una dureza aproximada de acuerdo a la temperatura de enfriamiento según el diagrama TTT respectivo del acero.

El medio de enfriamiento es decir el baño de sales debe ser lo suficientemente capaz de enfriar en el menor tiempo posible a la pieza tratada térmicamente puesto que los tiempos del diagrama TTT son relativamente pequeños.

El presente estudio revelo que los aceros analizados no son de buena calidad ya que presenta muchas inclusiones debido al proceso de fabricación.

El presente estudio comprueba que los aceros de medio y alto carbono son susceptibles de recocidos isotérmicos, normalizado y temple en aceite y agua.

Las propiedades mecánicas de los aceros tratamientos térmicamente varían de acuerdo a la temperatura y medio de enfriamiento.

El temple en agua permite alcanzar una mayor dureza que el temple en aceite ya que el primero presenta una microestructura martensítica mientras que segundo presenta una microestructura bainítica.

El enfriamiento en los hornos de sales es el adecuado para realizar recocidos isotérmicos debido a que en este medio se produce el choque térmico permitiendo tener un enfriamiento brusco y por ende el cambio en las microestructuras.

En los hornos de sales no se considera el efecto de descarburización ni el de atmosfera oxidante ya que la sal forma una capa protectora sobre la probeta lo cual es un beneficio para los tratamientos térmicos.

Las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente varían de la siguiente manera a medida que se baja la temperatura de enfriamiento la dureza del material aumenta al igual que la resistencia a la tracción pero disminuye la tenacidad.

Los valores de dureza encontrados en el presente estudio se diferencian de los valores de dureza teóricos debido a que la transformación se produce a medida que la curva de enfriamiento atraviesa el diagrama TTT.

Los recocidos isotérmicos y los temples no consiguen una transformación total de la matriz esperada es decir hay otras microestructuras presentes, debido a que al momento de enfriarse el material la curva de enfriamiento atraviesa parte del diagrama TTT y se produce la transformación en otras zonas.

El normalizado para los aceros estudiados evidencio la disminución en la dureza y resistencia a la tracción mientras que la tenacidad aumento en comparación a la probeta de suministro, es decir la aplicación de este tratamiento térmico es muy importante para los posteriores tratamientos térmicos que se deseen realizar.

Las probetas que son calentadas en horno de mufla se enfrían rápidamente en comparación a las sacadas del horno de sales debido a que la sal crea la capa de protección que recubre y no permite el enfriamiento rápido proporcionando un tiempo corto en beneficio para ser movido a otro horno.

El contenido de carbono en el acero AISI 1070 influye de manera directa a que los resultados obtenidos después de los tratamientos térmicos sean mucho mayores que las alcanzadas por el acero AISI 1045.

El acero AISI 1070 proporciona mejores resultados al momento de compararlos con un diagrama TTT del acero AISI 1045, debido a que al tener mayor porcentaje de carbono la nariz del diagrama TTT se encuentra ligeramente desfasado hacia la derecha lo que permite tener más tiempo para el enfriamiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda mejorar la infraestructura tecnología del área de tratamientos térmicos de la Facultad de Ingeniería mecánica, ya que no se dispone de hornos de sales indispensables y de gran importancia en la industria. El presente estudio no habría sido posible sin la ayuda de la empresa privada.

Se recomienda incorporar en el laboratorio de ensayos destructivos de la facultad de ingeniería mecánica la posibilidad de ensayar resistencia a la tracción a cualquier tipo de alambres de acero.

Es importante considerar la importancia de los tratamientos térmicos con hornos de sales por la versatilidad del proceso y además por su gran uso en la industria del país, por lo que un laboratorio dotado de éstos equipos permitiría de mejor manera impartir temas concernientes al los tratamientos térmicos en la facultad

Es importante considerar al momento del ataque químico la posibilidad de utilizar otros reactivos que permitan una mejor aclaración de la perlita, para de ésta manera tener una mejor apreciación de la metalografía.

En el caso de los temples se debe considerar el apareamiento de fisuras, grietas y deformaciones lo que afectaría al desempeño de la pieza tratada térmicamente.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS:

- APRAIZ, Barreiro; Tratamiento térmico de los aceros; Editorial Dossat; Madrid; 1971.
- GANDY, D; Carbon steel handbook; 2da Ed; Electric Power Research institute EPRI; California-USA; 2007.
- GRINBERG, María; Tratamientos térmicos de los aceros y prácticas de laboratorio; Editorial: Limusa; México.
- STURLA, Antonio; Tratamiento Térmico de los aceros, Teoría y Práctica; Tomo II; Argentina; 1998
- AVNER, Sidney; Introducción a la metalurgia física; segunda edición; Editorial McGRAW-HILL; México; 1988.
- MANGONON, Pat; Ciencia de materiales: selección y diseño; primera edición; Pearson education; México; 2007.
- GIL, Mur; Metalografía; Primera edición; Edicions UPC; 2005
- GALVÁN, Vicente; Materiales Metálicos; editorial de la UPV.
- PAZOS, N; Tecnología de los metales y procesos; manufactura: Universidad Católica Andrés Bello; 2005.
- 16.A.P. GULIÁEV; Metalografía; Editorial Mir – Moscú; Moscú ; 1978.
- V.ZUÉV; Tratamiento térmico de los metales; Editorial Mir-Moscú; Moscú ; 1988.

INTERNET:

- <http://www.steelforge.com/forgings/alloys/aisi1070report.html>
- <http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap4/41/>
- <http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap4/42/>
- <http://www.monografías.com/trabajos45/hierro-y-acero/hierro-acero2.shtml>.
- http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13_2_1.html

ANEXOS

ANEXO A: Catálogo de aceros Iván Bohman C.A (AISI1045).

760=AISI 1045 Acero al carbono para maquinaria

GENERALIDADES: Acero al carbono sin alear de esmerada manufactura, con buena tenacidad. Características en su alta uniformidad y rendimiento. Puede utilizarse en condición de suministro o con tratamiento térmico de temple y revenido. Aplicable a partes relativamente simples de máquinas. Dureza de suministro aproximada: 200 HB.

ANÁLISIS TÍPICO %

C	Si	Mn	Cr	P	S
760	0.50	0.30	0.60	--	0.04
AISI 1045	0.43 - 0.50	--	0.60 - 0.90	0.040	0.050

PROPIEDADES MECÁNICAS:

Resistencia a la Tracción	65 Kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	32 Kg/mm ²
Elongación, A5	min 10%
Reducción de área	40%
Dureza	220-235

EQUIVALENCIAS:

AISI	1045
SAE	C1045
W.Nr	1.1820
DIN	CK45

APLICACIONES:

Componentes sencillos, como por ej:

- Pernos
- Chavetas
- Piezas de mediana resistencia para aplicación automotriz
- Ejes

TRATAMIENTO TÉRMICO:

Forjado	800 - 1050 °C
Normalizado	830 - 850 °C
Temple (agua)	770 - 810 °C
Temple (aceite)	790 - 830 °C
Revenido (herramientas de corte)	100 - 3000 °C
Revenido de bonificación	550 - 650 °C

ANEXO B: Certificado de calidad de “Acindar” para el acero AISI1070.

ANEXO C: Norma INEN 109 para el ensayo de tracción del acero.

CUI 866.14.620.17	INEN	300
Norma Ecuatoriana	ENSAYO DE TRACCION PARA EL ACERO	INEN 109 1973-11
OBLIGATORIA		1. OBJETO
<p>1.1 Esta norma tiene por objeto establecer el método para el ensayo de tracción de todos los productos de acero, excepto de productos planos de espesor inferior a 3 mm, tubos, alambres y barras de diámetro inferior a 4 mm.</p>		
2. TERMINOLOGIA		
<p>2.1 <i>Probeta</i>: Es una porción de material debidamente preparada para el ensayo de tracción.</p>		
<p>2.2 <i>Longitud entre marcas</i>: Es la longitud de la parte cilíndrica o prismática de la probeta en cualquier momento del ensayo, sobre la cual se mide el alargamiento.</p>		
<p>2.3 <i>Longitud inicial entre marcas</i>: Es la longitud entre marcas antes de la aplicación de la carga.</p>		
<p>2.4 <i>Longitud final entre marcas</i>: Es la longitud entre marcas, después de la rotura de la probeta, junta a junta y ajustando los dos fragmentos de manera que sus ejes respectivos queden colineales es decir que un fragmento sea la continuación del otro.</p>		
<p>2.5 <i>Alargamiento permanente porcentual</i>: Es la variación de la longitud entre marcas de la probeta sometida previamente a una tensión prescrita y después descargada.</p>		
<p>2.6 <i>Alargamiento porcentual después de la rotura</i>: Es el alargamiento permanente $L_u - L_0$ de la longitud entre marcas después de la rotura, expresado en % de la longitud inicial entre marcas.</p>		
<p>2.7 <i>Reducción porcentual de área por estricción</i>: Es la máxima disminución de la sección transversal de la probeta que se produce durante el ensayo, es expresada en % del área de la sección transversal inicial de la probeta.</p>		
<p>2.8 <i>Carga máxima</i>: Es la mayor carga soportada por la probeta durante el ensayo.</p>		
/Continúa/		
- 1 -		



7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

7.1 Ajusto de la probeta

7.1.1 Marcar dentro de la zona calibrada de la probeta y con aproximación de $\pm 1\%$ la longitud entre marcas L_0 .

7.1.2 Colocar la probeta en la máquina de ensayo de forma que los dispositivos de fijación no sufran durante el ensayo ningún movimiento que pueda afectar en los resultados a ser obtenidos.

7.1.3 Accionar la máquina de ensayo con una precarga que provoque un esfuerzo inferior al 1% del esfuerzo previsto para el límite elástico y que sea suficiente para el correcto ajuste entre la probeta y los dispositivos de sujeción de la máquina de ensayo.

7.1.4 Ajustar el extensómetro dentro de la zona calibrada.

7.2 Velocidad del ensayo

7.2.1 Período elástico.

- 7.2.1.1 Cuando se trata de determinar uno de los límites de elasticidad, la velocidad de la máquina debe regularse de modo que la tensión aplicada a la probeta no aumente en más de 1 daN/mm^2 por segundo, a partir de la tensión especificada de 5 daN/mm^2 y hasta que alcance el límite de elasticidad. También se puede en esta mismo período fijar la velocidad de alargamiento en lugar del aumento de carga. Esta velocidad no debe ser mayor de $0,3\%$ de la longitud entre marcas por minuto.

7.2.2 Período plástico.

7.2.2.1 En este período la velocidad de la máquina no debe, en ningún momento, ser superior al 40% de la longitud entre marcas por minuto. No se fija ningún valor para el límite inferior de esta velocidad. Cuando se ensayan aceros de resistencia nominal inferior a 110 daN/mm^2 y cuando no se trata de determinar su límite de elasticidad, la velocidad puede, en el período elástico alcanzar el límite fijado para el período plástico.

7.2.3 En ambos períodos, la velocidad debe ser uniforme tanto como sea posible, y la variación de la velocidad debe hacerse progresivamente y sin choques.

7.3 Medida de las cargas

7.3.1 Las cargas deberán ser leídas con una precisión compatible con la especificación relativa al material que se ensaya, sin hacer interpolaciones entre las divisiones de la máquina de ensayo.

7.4 Determinación del alargamiento

7.4.1 Respetando lo establecido en los numerales 7.1 y 7.2 llevar el ensayo hasta la rotura de la probeta.

7.4.1.1 Después de la rotura, los dos fragmentos de la probeta deben ajustarse cuidadosamente de modo que sus ejes de simetría estén uno en la prolongación del otro. El aumento de longitud deberá medirse con aproximación de 0,25 mm. Este tipo de determinación no será válido en principio si la distancia de la sección de rotura a la marca más cercana es inferior a:

- 1/3 de la longitud entre marcas después de la rotura para las probetas en que $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$.
- 1/3 de la longitud entre marcas después de la rotura para las probetas en que $L_0 = 4\sqrt{S_0}$.
- 1/4 de la longitud entre marcas después de la rotura para las probetas en que $L_0 = 8,16\sqrt{S_0}$.
- 1/5 de la longitud entre marcas después de la rotura para las probetas en que $L_0 = 11,3\sqrt{S_0}$.

Sin embargo, el ensayo será considerado válido cualquiera que sea la posición de la sección de la rotura, si el alargamiento alcanza el valor especificado para el material.

7.4.2 *Determinación del alargamiento en el caso general.* Después de la rotura, los dos fragmentos de la probeta deben ajustarse cuidadosamente, de modo que sus ejes de simetría estén uno en la prolongación del otro. El aumento de longitud debe medirse con aproximación de 0,25 mm. Este tipo de determinación no es válido en principio, si la distancia de la sección de rotura a la marca más cercana es inferior a:

- 1/3 de la longitud entre marcas después de la rotura para las probetas en que la distancia entre marcas es de 50 mm.
- 1/4 de la longitud entre marcas después de la rotura para las probetas en que la distancia entre marcas es mayor que 50 mm.

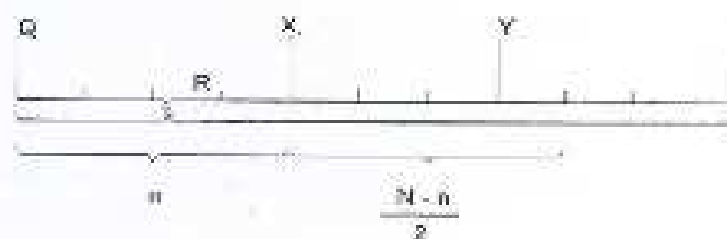
(Continúa)

Sin embargo, el ensayo será considerado válido, cualquiera que sea la posición de la sección de rotura, si el alargamiento alcanza el valor especificado para el material.

7.4.3 Para evitar tener que eliminar las probetas para las cuales la rotura se produce fuera de los límites especificados anteriormente, puede emplearse el método siguiente: Antes del ensayo, subdividir la longitud entre marcas L_0 en N partes iguales. Después del ensayo designar por Q la marca extrema del fragmento más corto; se designa por X al fragmento más largo, la división cuya distancia a la zona de rotura es la que más se aproxima a la distancia de la zona de la rotura a la marca Q . Si n es el número de intervalos entre Q y X , el alargamiento se determina como sigue:

- a) Si $N - n$ es un número par (ver fig a), medir la distancia entre Q y X y la distancia de X a la división Y situada a $\frac{N - n}{2}$ intervalos de X ; el alargamiento de rotura resulta aplicando la fórmula siguiente:

$$A = \frac{QX + 2XY - L_0}{L_0} \times 100$$



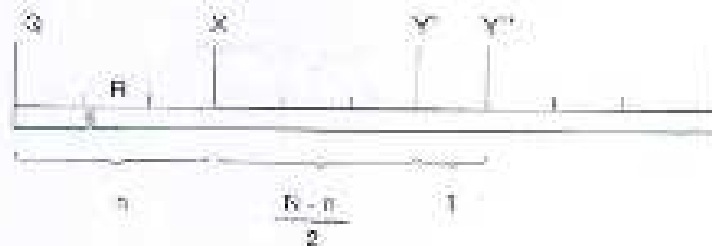
donde

- n = número de intervalos entre Q y X
 N = número total de intervalos

Figura a

- b) Si $N - n$ es un número impar (ver figura b) medir la distancia entre Q y X y las distancias de X a las divisiones Y' y Y'' situadas a $\frac{N-n-1}{2}$ y $\frac{N-n+1}{2}$ intervalos de X respectivamente. El alargamiento de rotura resulta aplicando la fórmula siguiente:

$$A = \frac{QX + XY' + XY''}{L_0} \times 100$$



en que

- n = número de intervalos entre Q y X.
- N = número total de intervalos.

Figura 11

7.5 Determinación del límite de fluencia

7.5.1 Luego de ajustada la probeta a los mecanismos de tracción de la máquina de ensayo, proceder a la aplicación de las cargas, observando lo especificado en 7.2.2 para el período plástico.

7.5.2 Realizar la lectura cuando la aguja indicadora de las cargas de la máquina de ensayo, retrocede o permanece quieta por primera vez después de comenzado el ensayo, a pesar de seguir alargándose la probeta.

7.5.3 Cuando el ensayo es realizado en una máquina de contrapeso deslizante, la lectura de la carga de fluencia será leída cuando el brazo de palanca caiga por primera vez a pesar de continuar la deformación.

7.5.4 El límite de fluencia será encontrado dividiendo la carga leída según 7.5.2 ó 7.5.3 para el área de la sección transversal S_0 de la probeta.

7.6 Determinación del esfuerzo correspondiente a un alargamiento permanente prescrito.

7.6.1 Aplicar cargas sucesivas crecientes a la probeta y mantener cada una de ellas entre 10 y 12 segundos.

7.6.2 Después de la aplicación de cada una de las cargas de 7.6.1, ésta deberá ser removida, e inmediatamente medido el alargamiento provocado.

7.6.3 Repetir el procedimiento de 7.6.1 y 7.6.2 hasta que el alargamiento de la probeta alcance el valor prescrito.

7.6.4 El esfuerzo correspondiente al alargamiento permanente prescrito, será encontrado dividiendo el valor de la carga que provocó el alargamiento permanente prescrito para el área de la sección transversal S_0 de la probeta.

7.7 Determinación del esfuerzo en el límite convencional de elasticidad

7.7.1 Luego de ajustar la probeta a los mecanismos de sujeción de la máquina, proceder a la aplicación de las cargas observando lo especificado en 7.2.1 para el período elástico.

7.7.2 Durante la aplicación de las cargas en el transcurso del ensayo, realizar lecturas periódicas en número suficiente para construir la curva carga-deformación, indicada en la figura B.3.

7.7.3 Luego de realizada la curva de 7.7.2 trazar una recta paralela a la parte rectilínea de la curva (línea punteada de la figura B.3). La separación entre la recta trazada y la parte rectilínea de la curva, medida en el eje de las abscisas, corresponderá al 0,5% prescrito de la longitud entre muescas de la probeta.

7.7.4 Determinar mediante el gráfico, la carga en el límite convencional de elasticidad y que corresponde a la intersección de la recta trazada según 7.7.3 y la curva del ensayo.

7.7.5 El esfuerzo en el límite convencional de elasticidad será determinado dividiendo la carga en el límite convencional de elasticidad, determinado según 7.7.4 para el área de la sección transversal S_0 de la probeta.

7.8 Determinación de la resistencia a la tracción

7.8.1 Luego de ajustar la probeta a los mecanismos de sujeción de la máquina, proceder a la aplicación de las cargas observando lo especificado en el numeral 7.2 referente a la velocidad del ensayo, hasta que se produzca la rotura de la probeta.

7.8.2 Determinar mediante lecturas sucesivas la carga máxima F_m observada durante todo el ensayo.

7.8.3 Determinar la resistencia a la tracción R_m dividiendo la carga máxima F_m para el área transversal S_0 de la probeta.

7.9 Ensayos de verificación

7.9.1 Los ensayos de verificación podrán realizarse según los métodos siguientes:

- a) Someter la probeta a una carga correspondiente al límite de elasticidad especificado, durante 10 a 12 segundos. Verificar si después de la sujeción de la carga al alargamiento permanente de la probeta es menor o a lo más igual al valor prescrito.

(Continúa)

- b) (Medida de los tres puntos). Someter la probeta a tres cargas crecientes correspondiente al 25 y 100 % de la carga en límite elástico especificado. Determinar los incrementos de longitud en la probeta luego de la aplicación de cada una de las cargas especificadas anteriormente. El incremento de longitud entre la primera y la tercera carga no debe sobrepasar el porcentaje prescrito de la longitud entre marcas. Lo es más de 4,76 veces al incremento de longitud entre la primera y la segunda carga.

8. INFORME DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

- 8.1 Los incrementos en la longitud deberán ser reportados con aproximación de 0,1 mm.
- 8.2 El límite de fluencia, el esfuerzo correspondiente a un alargamiento permanente prescrito, el esfuerzo en el límite convencional de elasticidad y la resistencia a la tracción deberán ser reportados con aproximación de $0,1 \text{ daN/mm}^2$.

(Continúa)

ANEXO A
PROBETAS DE ENSAYO

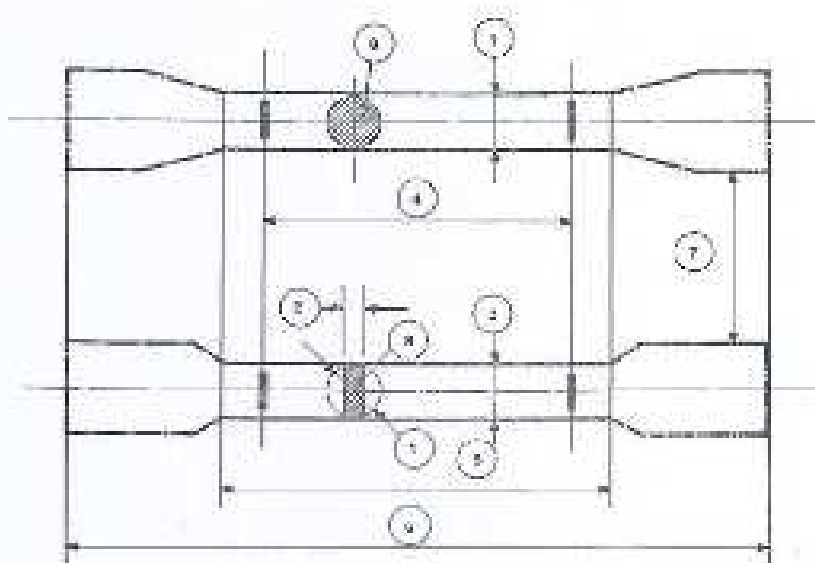


FIGURA A.1. Elementos y dimensiones de la probeta antes del ensayo.

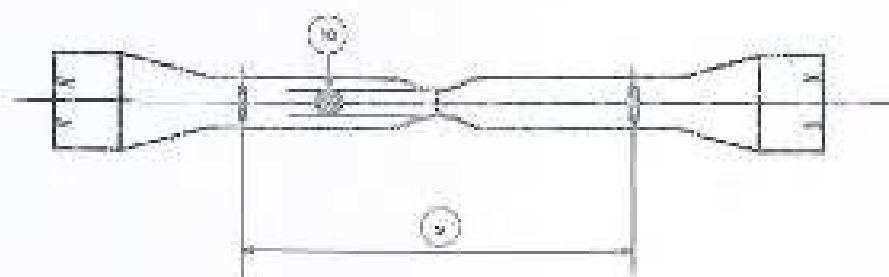


FIGURA A.2. Dimensiones de la probeta después del ensayo.

(Continúa)

ANEXO B
DIAGRAMAS DE ENSAYO

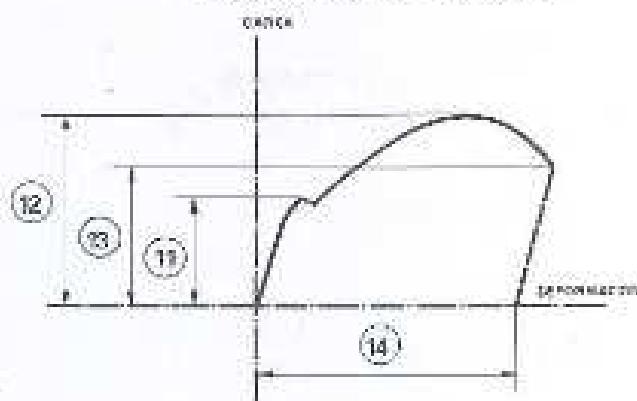


FIGURA B.1. Diagrama Carga-Deformación.

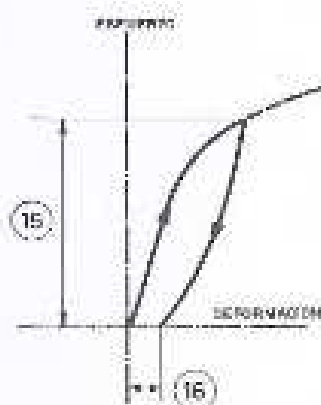


FIGURA B.2. Diagrama Esfuerzo-Deformación.

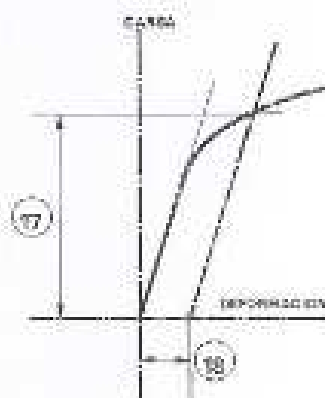


FIGURA B.3. Diagrama Carga-Deformación.

(Continúa)

ANEXO D: Norma INEN 127 para el ensayo de tracción de alambre de acero.

CDU 689.14

INEN

309

Norma Ecuatoriana	ENSAYO DE TRACCIÓN PARA ALAMBRE DE ACERO	INEN 127 1975-07
-------------------	--	---------------------

OBLIGATORIA**1. OBJETO**

1.1 Esta norma tiene por objeto establecer el método para el ensayo de tracción de alambre de acero.

2. ALCANCE

2.1 Esta norma se aplica al ensayo de tracción de productos de hierro de sección transversal constante, excepto los productos cuya relación entre ancho y espesor sea mayor que cuatro.

3. TERMINOLOGIA

- 3.1 *Probeta* es una porción de material debidamente preparada para el ensayo de tracción.
- 3.2 *Longitud entre marcas*. Es la longitud de la parte prescrita de la probeta sobre la que se mide el alargamiento en cualquier momento del ensayo.
- 3.3 *Longitud inicial entre marcas (Lo)*. Es la longitud entre marcas antes de la aplicación de la carga.
- 3.4 *Longitud final entre marcas (Luf)*. Es la longitud entre marcas después de la rotura de la probeta, juntando y ajustando los dos fragmentos de manera que sus ejes longitudinales queden colineales, es decir, que un fragmento sea la continuación de otro.
- 3.5 *Alargamiento permanente porcentual*. Es la variación de la longitud entre marcas de la probeta de ensayo sometida previamente a una tensión permanente y luego descargada.
- 3.6 *Alargamiento porcentual permanente de la rotura (A)*. Es el alargamiento permanente Lu-Lo de la longitud entre marcas, después de la rotura, expresado en porcentaje de la longitud inicial entre marcas Lo.
- 3.7 *Reducción porcentual de área por estricción (Z)*. Es la máxima disminución de la sección transversal que se produce durante el ensayo (So-Su), expresada en porcentaje del área de la sección inicial (S_o).
- 3.8 *Carga máxima (Fm)*. Es la mayor carga soportada por la probeta durante el ensayo.
- 3.9 *Carga final (Fuf)*. Es la carga que soporta la probeta en el momento de la rotura.
- 3.10 *Carga en el límite de fluencia (F_{el})*. Es la carga para la cual el alargamiento de la probeta aumenta por primera vez, sin aumento o sin disminución de la carga.
- 3.11 *Esfuerzo*. Es, en cualquier instante del ensayo, el cociente entre la carga y el área de la sección transversal inicial de la probeta.

(Continúa)

3.12 *Resistencia a la tracción (Rm)*. Es el cociente entre la carga máxima y el área de la sección transversal inicial de la probeta.

3.13 *Límite de fluencia (Re)*. Es el esfuerzo correspondiente a la carga en el límite de fluencia.

3.14 *Esfuerzo correspondiente a un alargamiento permanente prescrito*. Es el esfuerzo al cual corresponde, (después de la supresión de la carga), un alargamiento permanente prescrito, expresado en porcentaje de la longitud inicial entre marcas.

3.15 *Esfuerzo en el límite convencional de elasticidad*. Es el esfuerzo al cual corresponde un alargamiento no proporcional, igual a un porcentaje prescrito de la longitud inicial entre marcas.

4. SIMBOLOGIA

4.1 En el contenido de esta norma se utilizan los símbolos establecidos en la tabla 1.

TABLA 1. Símbolos y designaciones

Número (a)	Símbolo	Designación	Unidad
1	d*	Diámetro de un alambre redondo, o, en caso de ser otra sección, diámetro del círculo circunscrito mínimo.	mm
2	a	Espesor del alambre plano	mm
3	b	Ancho del alambre plano	mm
4	Lo**	Longitud inicial entre marcas	mm
5	L	Longitud total de la probeta	mm
6	-	Extremos de agarre	-
7	S ₀	Área de la sección transversal inicial de la parte calibrada.	mm ²
8	L _u	Longitud final entre marcas	mm
9	S _u	Área de la sección transversal mínima de la probeta después de la rotura	mm ²
10	-	Alargamiento permanente después del límite de fluencia	mm
11	F _e	Carga en el límite de fluencia	daN
12	R _e	Esfuerzo en el límite de fluencia	daN/mm ²
13	F _m	Carga máxima	daN
14	R _m **	Resistencia a la tracción	daN/mm ²
15	F _u	Carga final	daN
16	L _u -L ₀	Alargamiento permanente después de la rotura	mm
17	A	Alargamiento porcentual después de la rotura	%
18	Z	Reducción porcentual de área	%
19	-	Esfuerzo correspondiente a un alargamiento prescrito	daN/mm ²
20	-	Alargamiento permanente prescrito	%
21	-	Esfuerzo en el límite convencional de elasticidad	daN/mm ²
22	-	Límite convencional de elasticidad	%

* El círculo circunscrito mínimo es aquel que circunscribe completamente la periferia entera de la sección transversal, pero que no necesariamente pase por más de dos puntos.

** En correspondencia y donde no sea posible malentendidos, los símbolos L₀ y R_m pueden ser reemplazados por L y R, respectivamente.

(a) Estos números corresponden a los elementos numerados en la figura 1.

(Continúa)

5. FUNDAMENTO

5.1 Se somete a una probeta de alambre, a una fuerza axial de tracción proporcional a sus dimensiones, mediante una máquina para ensayo de tracción, con el fin de determinar uno o más de las propiedades mecánicas en análisis.

6. INSTRUMENTAL

6.1 Máquina para ensayo de tracción, con las características siguientes:

6.1.1 Estar provista de dispositivos que aseguren la aplicación axial de los esfuerzos en la probeta.

6.1.2 Permitir la aplicación de las cargas progresivamente, sin choques ni vibraciones.

6.1.3 Estar provista de dispositivos de regulación y comando que permitan efectuar el ensayo con las velocidades especificadas en el numeral 8.3.

6.1.4 No debe permitir un error mayor al 1% de la carga indicada.

7. PREPARACION DE LA PROBETA

7.1 La probeta constituirá en un pedazo recto de alambre de longitud tal, que la distancia entre las mordazas de la máquina no sea menor a 150 mm.

7.2 La probeta proporcional normal tendrá una distancia entre marcas $L_0 = 11,3\sqrt{S_0}$.

7.3 Si se usan probetas no proporcionales, la distancia entre marcas deberá ser en un principio igual a 100 mm; sin embargo, para aceros que tienen alargamientos pequeños, menores del 5% la distancia entre marcas deberá ser de 200 mm.

7.4 En lo posible, la probeta no debe ser enderezada antes del ensayo. Sin embargo, de ser necesario un enderezado, éste se deberá hacer a mano, y si esto no es posible, se deberá usar a lo mucho un martillo plástico o de madera, doblándose enderezar el alambre sobre una superficie de material similar al del martillo.

8. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

8.1 Determinación del área de la sección transversal de la probeta.

8.1.1 Medir el área de la sección transversal de la probeta, con aproximación del 1%, a menos que se indique otra cosa en las especificaciones para el material.

8.1.2 Determinar el área de la sección transversal circular de una probeta, tomando la media aritmética de dos medidas extraídas en una misma sección transversal, determinadas a 90° la una de la otra.

(Continúa)

8.1.3 El área de secciones transversales no circulares de una probeta se puede determinar pesando una longitud conocida del material y determinando la densidad del acero. Por acuerdo mutuo entre las partes interesadas, se puede omitir este último paso, tomando la densidad del acero como $7,85 \text{ kg/dm}^3$.

8.2 Determinación del alargamiento

8.2.1 Cuando va a ser determinado el alargamiento, la longitud entre las mordazas de la probeta debe ser marcada, a intervalos iguales a la mitad de la longitud entre marcas, dejando una distancia no menor de 2d de cada mordaza. La longitud entre marcas se debe determinar con aproximación a 0.5 mm.

8.2.2 Después del ensayo, los dos segmentos de la probeta fracturada deben ser cuidadosamente apilados, de tal manera que el uno sea la continuación del otro. El incremento de la longitud de la probeta después del ensayo, se mide entre las dos marcas a cada lado de la marca más cercana a la rotura.

8.2.3 En principio, esta determinación será válida, solamente si la distancia entre la zona de rotura y la mordaza más cercana es no menor que 5d.

8.2.4 La medida será válida en cualquier caso, si el alargamiento alcanza el valor especificado, cualquiera que sea la posición de la rotura.

8.3 Velocidad del ensayo

8.3.1 La velocidad de aplicación de la carga deberá ser:

- No mayor que 10 daN ($10,8 \text{ kgf}$) por mm^2 por seg.
- Al determinar la resistencia, la tracción, el alargamiento y la reducción del área transversal, la velocidad no deberá exceder 3 daN ($3,05 \text{ kgf}$) por mm^2 por segundo.
- Al determinar el esfuerzo en el límite de fluencia, el esfuerzo en el límite convencional de elasticidad o la tensión correspondiente a un alargamiento permanente prescrito, la velocidad de aplicación de la carga no debe significar un incremento en el esfuerzo que exceda 1 daN ($1,03 \text{ kgf}$) por mm^2 por segundo, desde el inicio del ensayo hasta alcanzar la carga prescrita.

8.4 Determinación del alargamiento permanente prescrito

8.4.1 En lugar de la determinación del alargamiento permanente prescrito del $0,2\%$ (o cualquier otro valor especificado, es usual determinar el límite convencional de elasticidad por la intersección gráfica en la curva carga-alargamiento (ver numeral 8.5). Por acuerdo especial, este método puede ser sustituido por una simple verificación del alargamiento, realizando mediciones con cargas conocidas.

8.5 Determinación del límite convencional de elasticidad

8.5.1 El límite convencional de elasticidad se determina como sigue:

- Se traza una curva con suficiente precisión, registrando las cargas en ordenadas, y los alargamientos correspondientes, en abscisas.
- Se traza luego una línea recta paralelo a la parte rectilínea de la curva, a una distancia al eje de las abscisas, igual al porcentaje prescrito de la distancia inicial entre marcas.

(Continúa)

- c) El esfuerzo en el límite convencional de fluencia, corresponde al punto de intersección entre la línea recta y la curva.

8.6 Determinación del límite de fluencia

8.6.1 La determinación del esfuerzo en el límite de fluencia en los alambres que presentan esta característica, se realiza de acuerdo a la definición dada en el numeral 3.10, observando, en particular, lo indicado en 8.3.1 (c).

8.7 Ensayos de prueba

8.7.1 El primer método de ensayo se realiza en la forma siguiente: Se somete la probeta por 10 a 12 segundos a la carga correspondiente al esfuerzo en el límite convencional de elasticidad especificado, y se verifica, una vez suprimida la carga que el alargamiento permanente es igual o menor que el valor prescrito de la longitud inicial.

8.7.2 Alternativamente, puede usarse el método siguiente:

8.7.2.1 Método de los tres puntos. Se aplican tres incrementos de carga iguales a $5^{\circ}/u$, $25^{\circ}/u$ y $100^{\circ}/u$ de la tensión en el límite convencional de elasticidad, y se observan las correspondientes diferencias en los alargamientos por medio de un extensómetro adecuado. El incremento en extensión entre el primer y tercer incremento de carga no debe ser mayor que el porcentaje especificado de la longitud entre marcas, en más de 4,75 veces el incremento en extensión entre el primer incremento de carga y el segundo.

9. INFORME DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

9.1 En el informe deberán constar los datos siguientes:

- a) Datos referentes al material del que fue extraída la probeta.
- b) Longitud inicial entre marcas de la probeta.
- c) Área de la sección transversal inicial de la probeta.
- d) Tipo de la fractura.
- e) Región de la fractura.
- f) Temperatura del ensayo.

9.1.1 Además, se deberá especificar uno o varios de los valores siguientes:

- g) Resistencia a la tracción.
- h) Esfuerzo en el límite de fluencia.
- i) Esfuerzo correspondiente a un alargamiento permanente prescrito.
- ii) Esfuerzo en el límite convencional de elasticidad.
- k) Alargamiento porcentual de rotura.
- l) Reducción porcentual del área de la sección transversal de la probeta por estricción.

(Continúa)

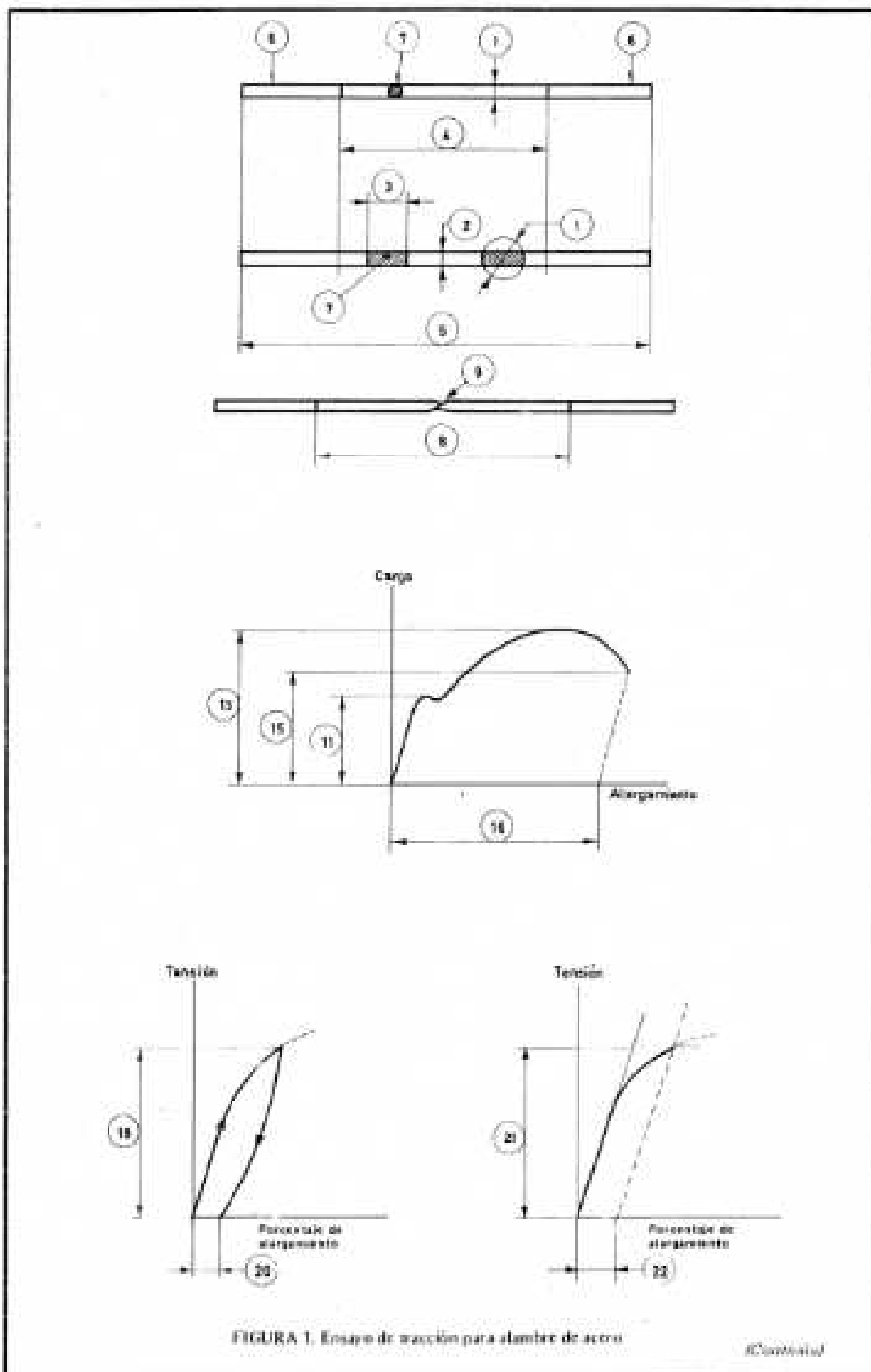


FIGURA 1. Ensayo de tracción para alambre de acero

(Continúa)

ANEXO E: Norma INEN para el ensayo charpy.

INEN

Código 389.14

Edición 1976-01

Nombre Especificación	ENSAYO DE IMPACTO CHARPY PARA ACERO (ENTALLE EN U)	INEN-128
-----------------------	--	----------

OBLIGATORIA **607**

1. OBJETO

1.1 Esta norma tiene por objeto establecer el método para el ensayo de impacto Charpy sobre probeta entallada en U, para todos los productos de acero.

2. TERMINOLOGÍA

2.1 **Probeta.** Es una porción de material del tamaño apropiado para el ensayo de Impacto Charpy.

3. REFERENCIAS

3.1 En el contenido de esta norma se utilizan los símbolos establecidos en la tabla 1.

TABLA 1. Símbolos y designaciones

Número	Ítem	Símbolo	DESIGNACIONES
1	-	l	Longitud de la probeta.
2	-	e	Espesor de la probeta.
3	-	b	Ancho de la probeta.
4	-	a	Ancho de la probeta en el punto de entalle.
5	-	r	Profundidad del entalle.
6	-	R	Radio de curvatura del fondo del entalle.
7	-	L	Distancia entre los apoyos.
8	-	r ₁	Radio de la curvatura de los apoyos.
9	-	α	Inclinación de los apoyos.
10	-	ρ	Anchura de la punta del martillo.
11	-	R ₁	Radio de curvatura de la punta del martillo.
12	-	S ₀	Área de la sección transversal de la probeta en la zona del entalle.
	-	KCU	Resistencia al impacto.

(*) Este número corresponde a los elementos numerados en la figura 1 del Anexo II.


4. FUNDAMENTO

4.1 Se acepta la probeta entallada en U, cuando, en un solo ensayo, el resultado de 7 impactos consecutivos es dentro de la variedad absoluta $\pm 5\%$ por parte de área, se refiere la resistencia al Impacto.

Guayaquil

INEN-128

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, INEN, C.A. y 3999-Ave. Colón 1603, Quito, Ecuador. Permiso de reproducción

EPN - BIBLIOTECA CENTRAL

 030801

DONACION

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 QUITO
 ECUADOR
 BIBLIOTECA

5. INSTRUMENTAL

5.1 Máquina de ensayo con las características establecidas en la tabla 2.

TABLA 2 Características de la máquina de ensayo

DESIGNACION	Número(a)	Dimensiones
Distancia entre los apoyos	7	$\pm 0,6$ 40 - 0 mm
Radio de la curvatura de los soportes	8	de 7 a 1,5 mm
Inclinación de los soportes	9	1:5
Angulo de la punta del martillo	10	30°
Radio de la curvatura de la punta del martillo	11	de 2 a 2,5 mm
Velocidad del martillo en el momento del ensayo	—	de 4,5 a 7 m/s

(a) Estos números corresponden a los elementos numerados en la figura 1 del Anexo B.

5.1.1 La máquina de ensayo deberá tener una construcción rígida y estable, de forma que las pérdidas de energía (debidas a radiación, rotación o vibración) en el ensayo de la máquina durante el ensayo sean despreciables.

5.1.2 El plano de oscilación del martillo debe ser vertical.

5.1.3 El centro de pivoteo debe ser en el centro de impacto del martillo.

5.1.4 La máquina de ensayo deberá estar provista de un instrumento que permita leerla con aproximación de $\pm 0,5\%$ de la capacidad máxima de impacto.

5.1.5 La energía de la máquina utilizada para el ensayo, en los casos de arbitraje, deberá ser 30 ± 1 kJm(294 ± 10 J) (ver nota 1).

6. PREPARACION DE LA PROBETA

6.1 La probeta deberá ser maquinada por todos sus lados y deberá tener las dimensiones establecidas en la tabla 3 (ver figura 2).

NOTA 1. El ensayo puede ser realizado utilizando diferentes energías en la máquina de ensayo. En este caso se deberá poner un índice que indique la energía utilizada (ver Anexo A.1.4).

(Continúa)

TABLA 8. Dimensiones de la probeta.

DESIGNACION	Símbolo	Número(a)	Dimensión nominal	Tolerancia de maquinación
Longitud	—	1	55 mm	$\pm 0,50$ mm(ISO) (13)
Espesor	a	2	10 mm	$\pm 0,11$ mm(ISO) (13)
Ancho	b	3	10 mm	$\pm 0,11$ mm(ISO) (13)
Profundidad del entalle ¹	—	3	3 mm	$\pm 0,09$ mm(ISO) (13)
Radio de la curvatura del fondo del entalle	—	6	1 mm	$\pm 0,07$ mm(ISO) (13)
Distancia del centro del entalle a los extremos de la probeta	—	—	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm(ISO) (13)
Angulo entre el plano de simetría del entalle y el eje longitudinal de la probeta	—	—	90°	$\pm 2^\circ$

¹En caso de existir una profundidad diferente, se deberá usar un índice que identifique la profundidad utilizada (ver Anexo A.1.2).

(a) Estos números corresponden a los elementos numerados en la figura 1 del Anexo B.

6.1.1. El entalle podrá ser hecho por cualquier proceso de maquinado que permita un acabado liso. Se deberá tener cuidado de eliminar cualquier burbuja o ranura que pueda haberse formado en el fondo del entalle.

3. PROCEDIMIENTO

7.1. Posición de la probeta

7.1.1. Coloque la probeta a ensayar sobre los soportes. El plano de simetría del entalle deberá coincidir con el plano medio entre los soportes dentro de una tolerancia de 0,5 mm.

7.2. Impacto

7.2.1. Accione la máquina de ensayo de manera que el martillo golpee la probeta en el plano de simetría del entalle y sobre la cara opuesta a la que la contiene.

7.3. Temperatura

7.3.1. El ensayo deberá realizarse a la temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

(Continúa)

8. CALCULOS

8.1 La resistencia al impacto se determina por la fórmula siguiente:

$$KCU = \frac{\text{Energía absorbida, en kgf. m}}{S_0}$$

Donde:

- KCU = resistencia al impacto, en kgfm (J).
 S_0 = área de la sección transversal de la probeta en la zona del ensayo, en cm².

9. INFORME DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

9.1 En el informe deberá constar lo de los siguientes:

- Tipo de la máquina de ensayo utilizada.
- Valor de la energía utilizada.
- Velocidad del martillo en el momento del impacto.
- Datos para identificar el material del que fue extraída la probeta.
- Temperatura del ensayo.
- Resistencia al impacto (KCU), en kgf./cm² (J/cm²).
- Apariencia de la fractura.
- La indicación "no fracturado correctamente", en el caso de que la probeta se haya dividido entre los apoyos sin romperse.
- En el caso de que la probeta haya absorbido toda la energía del martillo sin fracturarse y sin dividirse entre los soportes, el informe dirá: "Probeta en roca por x (KCU) kgf/cm² (J/cm²)".

(Continúa)

ANEXO B

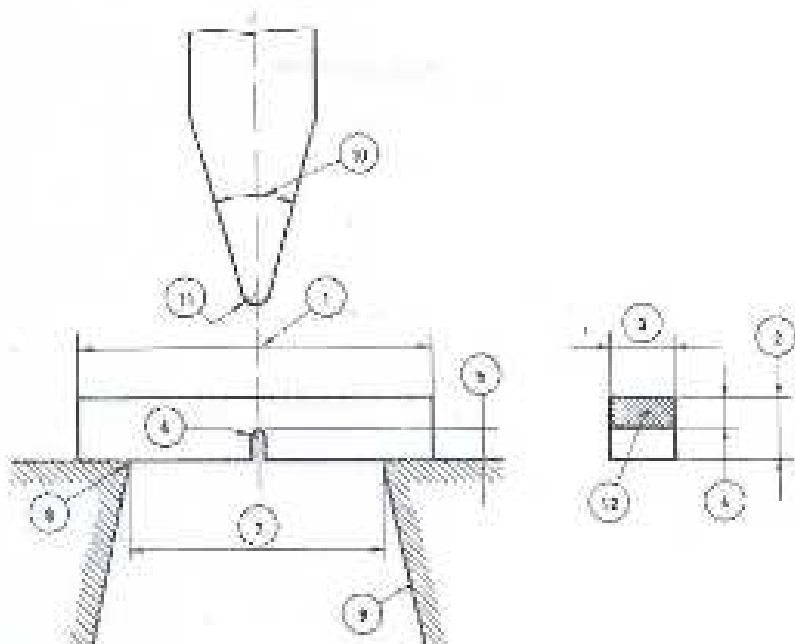


FIGURA 1. Ensayo de impacto de Charpy (Detalle en U)

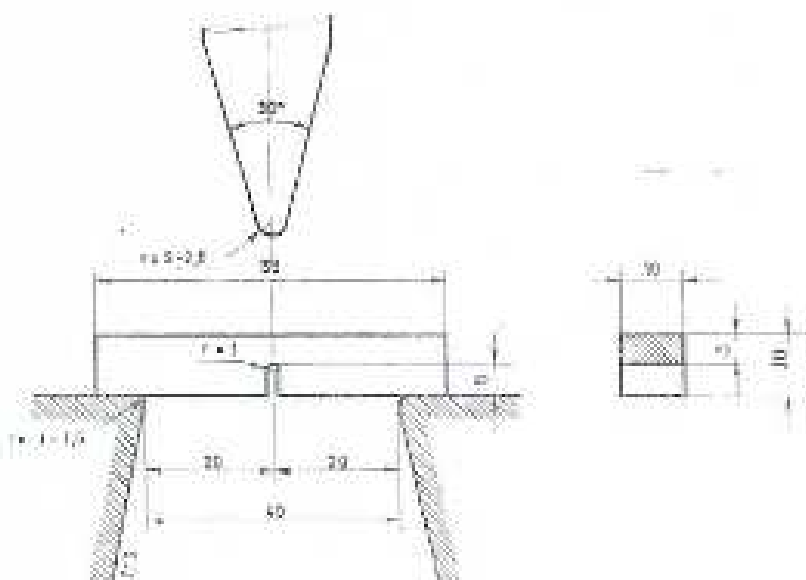


FIGURA 2. Parte parte del ensayo de impacto de Charpy

- 2.9 *Carga final*. Es la carga que soporta la probeta en el momento de la rotura.
- 2.10 *Carga en el límite de fluencia*. Es la carga para la cual el alargamiento de la probeta aumenta por primera vez sin aumento o con disminución de la carga.
- 2.11 *Esfuerzo*. Es en cualquier instante del ensayo, el cociente entre la carga y el área de la sección transversal inicial de la probeta.
- 2.12 *Resistencia a la tracción*. Es el cociente entre la carga máxima y el área de la sección transversal inicial de la probeta.
- 2.13 *Límite de fluencia*. Es el esfuerzo correspondiente a la carga en el límite de fluencia.
- 2.14 *Límite de fluencia superior*. Es el esfuerzo correspondiente al valor más alto de la carga en el límite de fluencia que ha sido observado durante el ensayo.
- 2.15 *Límite de fluencia inferior*. Es el esfuerzo correspondiente a la menor carga en el límite de fluencia que ha sido observado durante el ensayo.
- 2.16 *Esfuerzo correspondiente a un alargamiento permanente prescrito*. Es el esfuerzo al cual corresponde (después de la supresión de la carga) un alargamiento permanente prescrito, expresado en porcentaje de la longitud inicial entre marcas.
- 2.17 *Esfuerzo en el límite convencional de elasticidad*. Es el esfuerzo al cual corresponde un alargamiento no proporcional igual a un porcentaje prescrito de la longitud inicial entre marcas.

3. SIMBOLOGIA

- 3.1 En el contenido de esta norma se utilizarán los símbolos establecidos en la tabla 1.

TABLA 1. Símbolos y designaciones.

Número*	Símbolo	Designación	Unidad
1	d	Diámetro o lado de la sección transversal de la probeta; diámetro de círculo mínimo circunscrito.	mm
2	t	Espesor de la probeta plana	mm
3	b	Ancho de la probeta plana	mm
4	Lo	Longitud inicial entre marcas	mm
5	Lc	Longitud de la parte calibrada	mm
6	L	Longitud total de la probeta	mm
7	—	Cabezas de la probeta	—
8	S ₀	Área inicial de la sección transversal de la probeta	mm ²
9	L _u	Longitud final entre marcas	mm
10	S _u	Área final de la sección transversal de la probeta	mm ²
11	F _e	Carga en el límite de fluencia	daN
—	R _e	Límite de fluencia	daN/mm ²
12	F _m	Carga máxima	daN
—	R _m	Resistencia a la tracción	daN/mm ²
13	F _u	Carga final	daN
14	L _u -L ₀	Alargamiento permanente después de la rotura	mm
—	δ	Alargamiento porcentual después de la rotura	%
—	Z	Reducción porcentual de área	%
—	Z _u	Coefficiente de alargamiento porcentual en el punto de rotura	%
15	—	Esfuerzo en el límite de alargamiento permanente	daN/mm ²
16	—	Alargamiento permanente	%
17	—	Carga en el límite convencional de elasticidad	daN
18	—	Alargamiento convencional	%

* Estos números corresponden a los elementos numerados en las figuras anexas.

4. FUNDAMENTO

4.1 El ensayo consiste en someter a una muestra del material (probeta) a una fuerza axial de tracción proporcional a sus dimensiones, mediante una máquina para ensayo de tracción y determinar durante su deformación las características mecánicas en análisis.

5. INSTRUMENTAL

5.1 Máquina para ensayo de tracción

5.1.1 Características

(Continúa)

5.1.1.1 Debe estar provista de dispositivos que aseguren la aplicación axial de los esfuerzos en la probeta.

5.1.1.2 Debe permitir la aplicación de las cargas progresivamente, sin choques ni vibraciones.

5.1.1.3 Debe estar provista de dispositivos de regulación y comando que permitan ejecutar el ensayo con las velocidades especificadas en el numeral 7.2.

5.1.1.4 Debe permitir un error máximo del 10 % de la carga indicada.

6. PREPARACIÓN DE LA PROBETA

6.1 Forma

6.1.1 La sección transversal de la probeta puede ser cilíndrica, cuadrada, rectangular o, en casos especiales de forma indiferente.

6.1.2 La zona calibrada y las calizas de la probeta deberán unirse entre sí con una curva de transición, con radio de curvatura no menor de 20 mm. Las cabezas de la probeta deberán tener una forma tal, que facilite el correctoople y aseguramiento con los dispositivos de sujeción de la máquina de ensayos.

6.1.3 Otras especificaciones en la forma y preparación de las probetas serán tomadas de las especificaciones establecidas en la norma específica del material o de la norma del producto fabricado con éste.

6.2 Dimensiones

6.2.1 Zona calibrada.

6.2.1.1 Ancho y espesor. Para las probetas con sección transversal rectangular, la relación entre su ancho y espesor no debe ser superior a 4:1.

6.2.1.2 Diámetro. El diámetro de la probeta es el diámetro de la sección transversal cuando ésta es circular. Para otras secciones este término indica el diámetro del círculo circunscrito más pequeño que contiene el contorno de la sección transversal y que no pasa sucesivamente por más de dos puntos. El diámetro de la sección calibrada de las probetas medidas cilíndricamente deberá ser en ningún caso menor que 4,0 mm.

(Continúa)

6.2.1.3 *Longitud:* La longitud de la parte calibrada estará comprendida entre $L_0 \pm \frac{d}{2}$ y $L_0 - 2d$

6.2.1.4 *Longitud inicial entre marcas:* La longitud entre marcas de la probeta deberá estar de acuerdo con la fórmula:

$$L_0 = k \sqrt{S_0}$$

Donde k es un factor de proporcionalidad igual a 4, 5,63, 8,16 ó 11,3. El valor $k = 5,65$ será utilizada para construir las probetas proporcionales nominales usadas en caso de arbitraje.

6.2.1.5 Las tolerancias para el preparado de las probetas deberán estar de acuerdo con lo establecido en la tabla 2.

TABLA 2. Tolerancias sobre las dimensiones de las probetas

FORMA DE LA PROBETA*	DIMENSIONES mm	TOLERANCIAS DE MAQUINADO mm	TOLERANCIAS DE FORMA mm
CIRCULARES	3 < d < 6	±0,06 (ISA 110)	0,03 (ISA 110)
	6 < d < 10	±0,075 (ISA 110)	0,04 (ISA 110)
	10 < d < 16	±0,09 (ISA 110)	0,04 (ISA 110)
	16 < d < 50	±0,10 (ISA 110)	0,05 (ISA 110)
RECTANGULARES Maquinadas por los cuatro costos		Las mismas tolerancias que las utilizadas para las probetas con sección transversal circular.	
RECTANGULARES Maquinadas en dos caras opuestas†	6 < b < 10		0,22 (ISA 113)
	10 < b < 16		0,27 (ISA 113)
	16 < b < 30		0,33 (ISA 113)
	30 < b < 50		0,39 (ISA 113)
<p>* Forma de la parte calibrada de la probeta.</p> <p>† Los valores especificados para la tolerancia de forma son los mismos para el ancho de las probetas. Véase como para su espesor.</p>			

(Continúa)

ANEXO F: Composición del acero AISI 1045(Proporcionado por la empresa Fundireciclar).

Program: Fe-10-F
 Comment: low/medium alloy steel -F
 Average (n=2)

28/10/2010 1

Elements: Conce

Sample No: 10SP550
 Sample Id: MUESTRA BARRA

Quality:

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	Nb
\bar{x}	0.430	0.233	0.472	0.0017	0.0062	0.069	0.080	0.010	0.037	0.233	0.012	<0.0010	<0.00
	V	W	Pb	B	Sn	Zn	As	Bi	Ca	Ce	Zr	La	Fe
\bar{x}	<0.0010	0.043	>0.030	<0.0005	0.0065	0.0074	0.0013	0.0021	0.0039	<0.0030	<0.0015	<0.0010	98.3

ANEXO G: Standares de calidad de aceros AISI1045 y AISI1070.

Grados de acero

En la tabla 4 se indican algunos de los distintos grados de acero utilizados para la laminación de fleje.

Esta lista no es limitativa, pudiendo ser laminados otros grados de acero, previa consulta.

Tabla 4: composición química de algunos grados de acero utilizados en la fabricación de fleje

Grado	Equiv. aprox. SAE	% C	% P máx.	% S máx.	% Mn	% Si	Tensión Rotura aproximada. kg/mm ²
BC 05	1005	máx. 0.07	0.025	0.030	0.25/0.45	0.05/0.15	35/45
BC 08	1008	máx. 0.10	0.030	0.030	0.20/0.50	máx. 0.10	30/42
BC 10	1010	0.07/0.13	0.030	0.030	0.30/0.60	0.08/0.20	37/47
BC 11	1010	0.07/0.13	0.030	0.030	0.30/0.60	0.07/0.18	37/47
BC 16	1016	0.12/0.20	0.030	0.030	0.50/0.80	0.15/0.30	40/50
BC 16 B	1016	0.12/0.20	0.030	0.030	0.50/0.80	0.15/0.30	40/50
MC 18	1018	0.12/0.20	0.030	0.030	0.80/1.15	0.15/0.30	45/60
MC 21	1021	0.18/0.23	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	45/60
MC 33	1033	0.30/0.36	0.035	0.040	0.70/1.00	0.15/0.35	50/70
MC47	1047	0.46/0.51	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	63/83
AC 50	1050	0.48/0.55	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	65/85
AC 55	1055	0.53/0.60	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	70/90
AC 60	1060	0.58/0.65	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	75/95
AC 70	1070	0.68/0.75	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	85/105
AC 75	1075	0.73/0.80	0.035	0.040	0.60/0.90	0.15/0.35	90/110
ALM 1	1527	0.26/0.33	0.035	0.040	1.30/1.60	0.15/0.35	60/80
TS 102 *	4142	0.39/0.46	0.035	0.040	0.70/1.00	0.15/0.35	-

* % Cr : 0.80/1.10 - % Mo : 0.15/0.25



ACERO AISI-SAE 1045 (UNS G10450)

1. Descripción: es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A108

3. Propiedades mecánicas: Dureza 163 HB (84 HRb)
 Esfuerzo de fluencia 310 MPa (45000 PSI)
 Esfuerzo máximo 565 MPa (81900 PSI)
 Elongación 16% (en 50 mm)
 Reducción de área (40%)
 Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)
 Maquinabilidad 57% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.43 – 0.50 % C
 0.60 – 0.90 % Mn
 0.04 % P máx
 0.05 % S máx

6. Usos: los usos principales para este acero es piñones, cuñas, ejes, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches.

7. Tratamientos térmicos: se da normalizado a 900°C y recocido a 790°C

NOTA:

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

ANEXO H: Tabla de comparación entre durezas y resistencia a la tracción (Fuente Bohler).

Tabla de comparación entre dureza ROCKWELL, BRINELL SHORE VICKERS y resistencia a la tracción.

HRC 150 kg	Rockwell HR G2,5	HRA 60 kg	Vickers HV kg/mm2	Dureza Brinell kg/mm2	Shore	resistencia a la tracción kg/mm2	
						acero al carbono = 0,36 HB	acero aleado = 0,34 HB
67	84		900	775	106	287	264
66	—	83,9	870	752	101	275	256
65	83	83,4	840	735	99	264	249
64	—	82,8	815	710	96	255	241
63	82	82,3	790	690	93	248	235
62	—	81,8	760	670	91	240	228
61	81	81,2	730	652	88	234	221
60	—	80,7	700	635	85	227	214
59	80	80,2	690	620	83	220	208
58	—	79,6	670	600	80	215	205
57	79	79,1	650	580	78	210	196
56	—	78,6	630	571	75	205	194
55	78	78,1	610	555	73	200	188
54	—	77,5	590	540	72	195	184
53	77	77,0	575	530	71	186	180
52	—	76,5	560	515	69	178	175
51	76	76,0	540	500	68	174	170
50	—	75,4	525	487	67	170	165
49	75	74,9	510	475	65,5	165	160
48	—	74,4	490	462	64	161	156
47	74	73,8	480	447	62	157	152
46	—	73,3	465	436	60	153	148
45	73	72,8	450	424	59	149	144
44	72	72,3	440	413	57	145	141
43	—	71,7	425	406	55	141	137
42	—	71,2	415	398	54	137	133
41	—	70,7	400	382	53	134	130
40	70	70,2	390	377	52	131	127
39	—	69,7	380	369	50	127	125
38	69	69,1	370	353	49	125	120
37	—	68,6	360	345	48	122	118
36	68	68,1	350	339	47	119	115
35	—	67,6	345	331	46	116	113
34	67	67,0	330	323	45	114	110
33	—	66,5	320	316	4,5	111	108
32	—	66,0	315	310	44	109	105
31	65	65,6	310	305	43	107	103
30	—	65,0	305	299	42	103,5	100
29	—		295	290	41	101,5	98
28	—		285	282	40	99	96
27	—		280	276	39	96,5	93,5
26	—		270	268	38	94	91
25	—	HR b	265	262	37	92,5	89
24	—		260	257	36	90	87

Anexo I: Informe técnico del laboratorio de ensayos destructivos.



INFORME TÉCNICO

LAEV

Quito, 31 de mayo de 2011

TRABAJO SOLICITADO POR:

Sr. Herivel Vargas

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en acero perteneciente al señor Herivel Vargas y entregado en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

- MUESTRA:** Ocho (8) probetas de acero bajo norma ASTM E8 para ensayo de tracción y ocho (8) probetas para ensayo de impacto.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN

Identificación	Dímetro promedio	Carga máxima		Esfuerzo de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50mm
	(mm)	(lbf)	(N)	(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)	
T0	17,03	19.250	85.805	64,3	423	100,9	696	27,5
T1	12,65	32.600	144.190	77,2	498	115,9	799	18,8
T2	17,70	21.200	94.302	84,1	580	115,1	794	27,5
T3	12,38	23.900	106.313	101,3	700	137,9	963	18,7
T4	12,68	39.800	177.039	—	—	203,2	1402	7,7
T5	12,34	44.400	197.501	176,3	1215	239,3	1661	10,3
T6	14,56	33.100	147.216	—	—	172,1	1182	5,0
T7	12,15	19.420	86.384	53,3	437	107,4	742	28,4



3. ENSAYO DE IMPACTO

1	C0	30	01
2	C1	13	15
3	C2	25	40
4	C3	30	43
3	C4	8	11
6	C5	4	5
7	C6	2	2,7
8	C8	31	40

