



Universidad de San Carlos
de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería
Mecánica



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Civil de Materiales

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS
CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS
DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD
RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS**

Miguel Angel Zacarias Gómez

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas
y la MSc. Inga. Marta López Jenssen

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS
CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS
DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD
RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MIGUEL ANGEL ZACARIAS GÓMEZ

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR RIVAS
Y LA MSC. INGA. MARTA LÓPEZ JENSSEN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Alvaro Antonio Ávila Pinzón
EXAMINADOR	Ing. Sergio Antonio Torres Hernández
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS
CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS
DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD
RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha mayo de 2013.



Miguel Angel Zacarias Gómez



Universidad de Concepción

Dirección de Relaciones Institucionales e Internacionales

Concepción (Chile), 21 de agosto de 2013.

Señor
Ing. Murphy Olimpo Paíz R.
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
7ma. Avenida 39-60 Zona 8
Guatemala

Estimado señor Decano:

Adjunto a la presente, me permito reenviar a usted constancia de las calificaciones finales obtenidas por vuestro estudiante, señor **MIGUEL ANGEL ZACARIAS GOMEZ**, alumno de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala y participante del Programa de Intercambio y Movilidad Académica Pima, quien realizó intercambio en la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Concepción.

La profesora a cargo de la defensa del proyecto de título ha modificado el nombre del proyecto el cual remitimos debidamente corregido.

Lo saluda muy atentamente,

IVAN E. ARAYA GOMEZ, Ph.D.

Director de Relaciones Institucionales e Internacionales

IAG/MZA

Adj: lo indicado

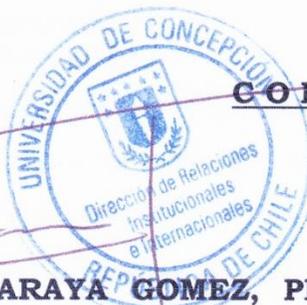
cc.: Decano Facultad de Ingeniería
Delegado de RRII de la Facultad
Prof. Marta López J.
Coordinadora Movilidad Pima
Expediente alumno

Por el desarrollo libre del espíritu



Universidad de Concepción

Dirección de Relaciones Institucionales e Internacionales



CONSTANCIA

IVAN E. ARAYA GÓMEZ, Ph. D., Director de Relaciones Institucionales e Internacionales de la Universidad de Concepción, certifica que el señor **Miguel Angel Zacarías Gómez**, estudiante de la Universidad de San Carlos de Guatemala, cursó las siguientes asignaturas durante el periodo de intercambio en la Universidad de Concepción (agosto 2012- abril 2013).

- **Visitas Industriales**
Código: 548415
Calificación final: 7.0 (100/100)
- **Metalurgia Física**
Código: 548304
Calificación final: 5,5 (73/100)
- **Proyecto fin de Carrera** “ Caracterización metalográfica y mecánica de las estructuras cristalinas obtenidas durante el proceso de cementación en aceros DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5 y su relación con la dureza y tenacidad resultante en engranajes de dientes rectos”
Calificación final: 7,0 (100/100)

La escala de calificaciones es de 1 a 7, siendo el 7 la nota máxima y el 4.0 la nota mínima para aprobar la asignatura.

Extiendo el presente certificado a petición del interesado, para los fines que estime conveniente.

Ciudad Universitaria, 21 de agosto de 2013.

Por el desarrollo libre del espíritu

Víctor Lamas N°1290 • Fono (56- 41) 220 45 94 • Fax (56- 41) 220 70 75
Concepción, Chile • E-mail: drii@udec.cl • www.udec.cl

 **UNIVERSIDAD ACREDITADA**
6 AÑOS | HASTA NOVIEMBRE 2016
DOCENCIA PREGRADO - DOCENCIA POSTGRADO
INVESTIGACIÓN - VINCULACIÓN CON EL MEDIO
GESTIÓN INSTITUCIONAL



Guatemala, 28 de junio de 2013

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

Ingeniero Julio César Campos Paiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos

Por medio de la presente, le comunico que he procedido con la revisión final del trabajo de graduación titulado **“CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS”**, realizado por el estudiante de ingeniería mecánica Miguel Angel Zacarias Gómez con número de carné 2008-18905, quien contó con la asesoría del suscrito.

El trabajo se desarrolló dentro del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con el apoyo de la OEI y la Universidad de Concepción, de la hermana república de Chile, bajo el patrocinio de la MSc. Ing. Marta López Jenssen, por lo que cuenta con mi total aprobación, cumpliendo con los objetivos fundamentales de las líneas de investigación de nuestra Escuela, aportando resultados de suma utilidad en beneficio de la infraestructura científico-técnica del país. Por tal motivo, estoy solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente,

Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Colegiado No. 862

Ing. Roberto A. Aguilar Rivas
COLEGIADO No. 862

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS**, del estudiante **Miguel Angel Zacarias Gómez**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área

Guatemala, julio, de 2013.

/behdei.



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales al Trabajo de Graduación titulado, **CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS**, del estudiante Miguel Angel Zacarías Gómez, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, agosto de 2013

JCCP/behdei



DTG. 597.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS**, presentado por el estudiante universitario **Miguel Angel Zacarías Gómez**, como parte de la política de Internacionalización y el Programa de Intercambio de Movilidad Académica de la Facultad de Ingeniería, con la Universidad de Concepción, Chile por tanto autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 29 de agosto de 2012.



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la sabiduría y las fuerzas necesarias para culminar una etapa más en mi vida.
Mi padre y madre	Cecilio Zacarias y Carmen Gómez; por educarme y hacer de mí una buena persona, se cuanto se han sacrificado para sacar adelante a mis hermanos, sobrinos y a mí. Todo lo que soy se los debo a ustedes.
Mis hermanos y hermanas	Johanna, Elías, Juan Cruz y Silvia Zacarias Gómez; por creer en mí, y darme el amor y el apoyo incondicional en cualquier situación; gracias por estar siempre presentes en mi vida.
Mis sobrinos y sobrinas	Daniel, Jeymi, Bryan, David López; Dulce e Iris Zacarias; por darme dolores de cabeza y a la vez muchas alegrías. A toda mi familia, ustedes son la razón de mi existir.
Mis parientes	Por apoyarme y darme ánimos cuando más lo necesitaba. Gracias por poner su confianza en mí.

**A la gloriosa y
tricentenaria
Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por acogerme, expandir mis conocimientos y fomentar en mí, el deber, para el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad, en nuestra amada Guatemala.

**Mis amigos y
compañeros**

Por brindarme amistad, apoyo y compartir sus conocimientos durante largas horas de estudio, que sirvieron para desarrollo de mi formación académica.

Mis catedráticos

Por compartir sus conocimientos y dar motivación en la búsqueda de nuevos conceptos.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi familia	Por creer en mí en todo momento.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme el apoyo y el privilegio de ser representante en el extranjero de esta casa de estudio que ha sido mi segundo hogar.
Facultad de Ingeniería	Por darme una formación académica de excelencia.
Escuela de Ingeniería Mecánica	Por darme los conocimientos necesarios para desempeñarme profesionalmente.
Ingeniero Roberto Alejandro Aguilar Rivas	Por su colaboración, orientación y amistad para desempeñar una buena investigación.
La Universidad de Concepción/Chile	Por darme el privilegio de realizar mi trabajo de graduación en sus instalaciones. Ciertamente una universidad de excelencia.
Ingeniera Marta López Jenssen	Por darme la bienvenida a la Universidad de Concepción; por el apoyo incondicional, las enseñanzas y el cariño hacia mi persona.

Ingeniera Ana Hidalgo

Por su apoyo, compañía en el laboratorio y por estar siempre al tanto de mi situación.

A mis amistades de la República de Chile

Jennifer Gómez, Nicole Altamirano, Pablo Castro, Rodrigo Vidal, Jaime Sánchez, Sebastián Vargas, Claudia Jeréz, Yoselyn Reyes, David Field, Jonathan Peralta, Alejandra Salgado, Yasmin Maril, Elías Garcés, Carlos Maldonado, Solange Escobar y Nancy Calleia; por la amistad brindada hacia mi persona.

A mis amistades de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Andrea Castillo, Sergio López, Berny Pérez, Edy Méndez, Diego Mendoza, Eduardo Godoy, Hector Zapeta, Bayron Vivar y Hansel Flores y Santiago Celada; por su compañerismo, apoyo y por compartir largas horas de estudios.

Lida. Sandra Velásquez

Por concederme el privilegio de formar parte del PIMA, por el apoyo y la confianza.

INTECAP

Por capacitarme y complementar mi área ingenieril.

Ilsy Hernández

Por escucharme, animarme y hacerme sentir en casa, cuando más lo necesitaba.

Mauricio Chilel

Por compartir sus conocimientos y apoyarme en cada momento y ser como un hermano.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Ubicación del tema	4
1.2. Planteamiento del problema	5
1.2.1. Cuestionamientos	6
1.2.2. Justificación	6
1.3. Metodología de investigación	7
2. NOCIONES BÁSICAS EN LA MANUFACTURA DE ENGRANAJES.....	9
2.1. Engranajes	9
2.1.1. Tipos de engranajes	10
2.1.2. Engranajes rectos	10
2.1.3. Paso circunferencial.....	12
2.1.4. Módulo	12
2.1.5. Dimensiones de los dientes en función del módulo	13
2.1.6. Profundidad de la capa cementada en engranajes	15

3.	PRINCIPIOS FUNDAMENTALES METALÚRGICOS.....	17
3.1.	Diagrama de fases Fe-C	17
3.2.	Microestructuras de los aceros.....	24
3.2.1.	Ferrita.....	24
3.2.2.	Perlita	26
3.2.3.	Cementita	27
3.2.4.	Austenita	28
3.2.5.	Martensita.....	28
3.2.6.	Bainita	30
3.3.	Curvas Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT).....	31
3.4.	Diagrama de enfriamiento continuo (CCT)	33
3.5.	Tratamientos térmicos	35
3.5.1.	Recocido	36
3.5.2.	Normalizado	37
3.5.3.	Temple	39
3.5.3.1.	Homogeneidad de la austenita	40
3.5.4.	Revenido	41
3.6.	Tratamientos térmicos superficiales	42
3.6.1.	Cementación	43
3.6.1.1.	Capa cementada	45
3.6.1.2.	Proceso de cementación con materiales sólidos	45
3.6.2.	Características de los aceros para cementación	47
3.6.2.1.	Aceros al carbono.....	48
3.6.2.2.	Aceros de baja aleación.....	48
3.6.2.3.	Aceros de alta aleación.....	49
3.6.3.	Influencia de los elementos aleantes	49
3.6.4.	Ciclos térmicos para la capa cementada	50

4.	DIFUSIÓN	53
4.1.	Mecanismo de difusión	53
4.1.1.	Difusión por vacancia	54
4.1.2.	Difusión intersticial	54
4.2.	Difusión en estado no estacionario	55
5.	CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS EN ESTUDIO	59
5.1.	Diagrama de templabilidad	62
6.	MATERIALES Y MÉTODO EXPERIMENTAL	65
6.1.	Preparación de probetas.....	68
6.2.	Ciclo térmico para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4	70
6.3.	Tratamiento térmico cementación-temple-revenido	74
6.4.	Preparación de probetas acorde a las etapas del proceso.....	78
6.4.1.	Preparación metalográfica	80
6.5.	Procedimientos de ensayos realizados.....	81
6.5.1.	Microfotografías	81
6.5.2.	Ensayo de dureza	83
6.5.3.	Ensayo de impacto	84
6.5.4.	Fractografías y análisis químico (EDS)	85
7.	RESULTADOS.....	87
7.1.	Resultados metalográficos.....	89
7.1.1.	Descripción de fotomicrografías	96
7.2.	Resultados de difusión	105
7.3.	Resultados de dureza	113
7.3.1.	Dureza superficial	113
7.3.2.	Perfil de dureza borde-núcleo	116

7.4.	Resultados de tenacidad ensayo de impacto Charpy	118
7.5.	Fractografías	126
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	133
	CONCLUSIONES	141
	RECOMENDACIONES	145
	BIBLIOGRAFÍA	149
	APÉNDICES	153
	ANEXOS	157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Par de engranajes rectos	9
2.	Engranajes rectos	11
3.	Nomenclatura de engranajes de dientes rectos.....	14
4.	Profundidad de penetración de la cementación (PC).....	15
5.	Diagrama de fases Fe-C	20
6.	Diagrama de fases Fe-C. En el rango de aceros	21
7.	Influencia de adición de elementos aleantes en la temperatura y el contenido de carbono del eutectoide	23
8.	Cristales blancos de ferrita y negros de perlita en un acero SAE 1010. Nital 2%. x200	25
9.	Ferrita poliédrica y <i>Widmanstätten</i> , acero DIN 16MnCr5, aparición por enfriamiento no controlado. Nital 2%. X200.....	25
10.	Perlita gruesa y perlita fina (zona oscura), acero al 0,85 %C. Nital 2%. x400	26
11.	Cementita proeutectoide (blanca) en los límites de grano, rodeando las colonias de perlita, en un acero al 1,4% C. Nital 2%. x1000	27
12.	Martensita (agujas aciculares negras) sobre una matriz de austenita retenida (blanco), acero DIN 16CrNi4, cementada y templada en aceite, Nital 2%. x1000	29
13.	Estructura de la martensita.....	29
14.	Acero SAE 1045; bainita inferior (agujas negras) en una matrix de martensita (blanca). Picral x 500	30
15.	Bainita superior en un fondo blanco de martensita. x1500	31

16.	Diagrama Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT) del acero DIN 16CrNi4	32
17.	Curvas Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT) del acero DIN 16MnCr5.....	33
18.	Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) del acero DIN 16CrNi4	34
19.	Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) del acero DIN 16MnCr5.....	35
20.	Diagrama de fases Fe-C, mostrando la región de temperatura para el recocido total.....	37
21.	Diagrama de fase Fe-C, mostrando el rango típico de normalizado.....	38
22.	Ciclos de normalizado y recocido total	38
23.	Diagrama esquemático de transformación para método de temple y revenido convencional	42
24.	Cementación a 925 °C con 60% de carbón de madera y 40% de carbonato de bario durante 10 horas, de un acero de 0,12% de carbono	44
25.	Clases de tratamientos térmicos que se pueden dar a las piezas cementadas	51
26.	Esquema de difusión (a) por vacantes y (b) intersticial	55
27.	Perfil de concentración para la difusión en estado no estacionario	56
28.	Logaritmos de los coeficientes de difusión frente al recíproco de la temperatura absoluta para varios metales	58
29.	Diagrama de templabilidad del acero DIN 16MnCr5	62
30.	Diagrama de templabilidad del acero DIN 16CrNi4	63
31.	Simulación de mecanizado de probetas en trozo de barra.....	66
32.	Espectrómetro de emisión óptica, SPECTRO-MAXx	67
33.	Especificación de probeta Charpy del tipo A.....	68
34.	Probeta Charpy tipo A con sobremedida para la toma de muestras metalográficas	69
35.	Orientación de probetas Charpy elaboradas	70

36.	Ciclo térmico de cementación, temple y revenido.....	73
37.	Procedimiento para la cementación	75
38.	Procedimiento para el temple.....	77
39.	Procedimiento del revenido	78
40.	Corte	79
41.	Montado de probetas	80
42.	Pulido	81
43.	Microfotografías	82
44.	Ensayos de dureza superficial.....	83
45.	Perfil de dureza borde–núcleo.....	84
46.	Ensayo de impacto.....	85
47.	Macrofractografías	86
48.	Microfractografías y análisis químico (EDS)	86
49.	Muestras en estado de suministro probetas Charpy L Nital 2%.....	96
50.	Muestra No. 15, acero DIN 16MnCr5, 6 horas de cementación a 900°C. Nital 2%.....	97
51.	Muestra No. 17, acero DIN 16MnCr5, 6 horas de cementación a 900°C y templada en aceite a 850°C. Nital 2%	98
52.	Muestra No. 10, acero DIN 16CrNi4, 3 horas de cementación a 900°C. Nital 2%.....	99
53.	Muestra No. 12, acero DIN 16CrNi4, 3 horas de cementación a 900°C y templada en aceite a 850°C. Nital 2%	101
54.	Muestras en estado de suministro probetas Charpy T Nital 2%	102
55.	Muestra No. 41, acero DIN 16MnCr5, 9 horas de cementación a 900°C. Nital 2%.....	103
56.	Muestra No. 36, acero DIN 16CrNi4, 6 horas de cementación a 900°C. Nital 2%.....	104
57.	Representación de la solubilidad del carbono en hierro gamma para una temperatura de 900 °C	106

58.	Penetración de la capa cementada en función del tiempo para el acero DIN 16MnCr5 a 900°C	112
59.	Penetración de la capa cementada en función del tiempo para el acero DIN 16CrNi4 a 900°C.....	112
60.	Dureza superficial en función del tiempo de cementado para ambos aceros. Probetas Charpy L y T	115
61.	Dureza superficial en función del tiempo de cementado (temple y revenido) para ambos aceros. Probetas Charpy L y T	115
62.	Perfil de dureza en función de la distancia en ambos aceros, 3 horas de cementación, templado y revenido. Probetas Charpy L	117
63.	Perfil de dureza en función de la distancia en ambos aceros, 6 horas de cementación, templado y revenido. Probetas Charpy L	117
64.	Perfil de dureza en función de la distancia en ambos aceros, 6 horas de cementación, templado y revenido. Probetas Charpy T	118
65.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para ambos aceros. Probetas cementadas, templadas y revenidas. Probetas Charpy L	122
66.	Energía absorbida en función de la capa cementada para ambos aceros. Probetas cementadas, templadas y revenidas. Probetas Charpy T	122
67.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16MnCr5. Probetas cementadas, templadas y revenidas .	123
68.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16CrNi4. Probetas cementadas, templadas y revenidas ...	123
69.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para ambos aceros. Probetas templadas y revenidas. Probetas Charpy L	124
70.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para ambos aceros. Probetas templadas y revenidas. Probetas Charpy T	124

71.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16MnCr5. Probetas templadas y revenidas	125
72.	Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16CrNi4. Probetas templadas y revenidas.....	125
73.	Fractografía, 16MnCr5. Estado en suministro. (SEM y EDS)	127
74.	Fractografía, 16CrNi4. Estado en suministro. (SEM y EDS).....	128
75.	Fractografía, 16MnCr5. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Núcleo x500.....	129
76.	Fractografía, 16MnCr5. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Borde x500	130
77.	Fractografía, 16CrNi4. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Núcleo x500.....	131
78.	Fractografía, 16CrNi4. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Borde x500	132

TABLAS

I.	Profundidad de cementación según módulo	15
II.	Ficha técnica del aceite Thermic Oil.....	40
III.	Compuestos de mezcla carburante	47
IV.	Tabulación de la función error (ferr(β)) para diferentes valores de β desde 0 hasta 2,7.....	57
V.	Ficha técnica de los aceros	59
VI.	Composición química	59
VII.	Propiedades mecánicas	60
VIII.	Características	60
IX.	Aplicaciones.....	61
X.	Tratamiento térmico	61

XI.	Resultados de análisis químico para los aceros 16MnCr5 y 16CrNi4	67
XII.	Temperaturas críticas A1 y A3, temperatura de inicio de formación de martensita (Ms); según elementos microaleantes en los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4.....	71
XIII.	Temperaturas críticas A1 y A3, inicio de formación de martensita (Ms); según diagramas TTT y CCT para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4.....	71
XIV.	Ciclo térmico propuesto para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4.....	73
XV.	Distribución de ensayos, probetas Charpy T	87
XVI.	Distribución de ensayos, probetas Charpy L	88
XVII.	Resultados de metalografías, probetas Charpy L	90
XVIII.	Resultados de metalografías, probetas Charpy T	94
XIX.	Datos teóricos y experimentales para determinar el %Cx.....	108
XX.	Datos teóricos y experimentales para determinar el coeficiente de difusión (D).....	110
XXI.	Resultados en la penetración de las capas carburadas.....	111
XXII.	Escala de dureza Rockwell.....	114
XXIII.	Resultados del ensayo de dureza superficial para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4.....	114
XXIV.	Resultados del ensayo de perfil de dureza para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4.....	116
XXV.	Resultados del ensayo de impacto para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4, de probetas Charpy tipo A.....	120
XXVI.	Resultados del ensayo de impacto para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4 y su relación con la capa cementada y tiempo de cementación	121

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Al	Aluminio
S	Azufre
C	Carbono
cm	Centímetro
cSt	Centistoke
Cu	Cobre
Cr	Cromo
HB	Dureza Brinell (Hardness Brinell)
HRA	Dureza Rockwell-A (Hardness Rockwell-A)
HRB	Dureza Rockwell-B (Hardness Rockwell-B)
P	Fósforo
°C	Grado Celsius
H	Hidrógeno
Fe	Hierro
hrs	Horas
Kgf	Kilogramo Fuerza
Mn	Manganeso
µm	Micrón
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
O	Oxígeno
seg	Segundo

GLOSARIO

A_{c1}	Temperatura crítica inferior en el calentamiento. La temperatura a la que la austenita comienza a formarse durante el calentamiento.
A_{cm}	En acero hipereutectoide, la temperatura a la que la solución de cementita se ha transformado completamente en austenita durante el calentamiento.
A_{c3}	Temperatura crítica superior en el calentamiento. La temperatura a la cual la transformación de ferrita en austenita se ha completado durante el calentamiento.
A_{r3}	Temperatura crítica superior en el enfriamiento. La temperatura a la que la austenita comienza a transformarse en ferrita durante el enfriamiento.
AISI	Instituto Americano del Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute).
API	Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute).
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).

BCC	Estructura cristalina cúbico centrado en el cuerpo (<i>body center cubic</i>).
BCT	Estructura cristalina tetragonal centrado en cuerpo (<i>body center tetragonal</i>).
Caminos de clivaje	En inglés <i>river patterns</i> . Producto de la formación de escalones pronunciados en donde ocurrió la propagación de fisuras superpuestas unidas a través de un escalón. La dirección de los caminos de clivaje representa la dirección de la propagación de la grieta
CCT	Curva de Tratamiento con Enfriamiento Continuo (<i>Continuous Cooling Treatment</i>).
Clivaje	En inglés <i>cleavage</i> . Representa fractura de carácter frágil, se produce por la separación de planos cristalinos bien definidos, donde la rotura avanza por medio de la propagación simultánea de fisuras sobre planos paralelos entre si, correspondientes a una misma familia cristalográfica; no indica necesariamente una alta fragilidad del material.
DIN	Instituto Alemán de Normalización (Deutsches Institut für Normung).
FCC	Estructura cristalina cúbico centrado en las caras (<i>face center cubic</i>).

Fe₃C	Cementita o carburo de hierro, relativamente dura. Fase metaestable.
Feδ	Hierro delta, isomorfa con Fe α , fase de alta temperatura. Fase de equilibrio estable.
Feγ	Hierro gama, relativamente blanda a temperatura media. Fase de equilibrio estable.
Feα	Hierro alfa, relativamente blanda a baja temperatura. Fase de equilibrio estable.
Fractura intergranular	Fractura de alta fragilidad. En esta condici3n la fisura puede nuclear y propagarse r1pidamente a lo largo de las superficies intergranulares, dando lugar a una morfolog1a f1cilmente identificable por el aspecto facetado de la superficie revelada por las formas exteriores de los granos cristalinos.
Hoyuelos	En ingl3s <i>dimples</i> . Representa fractura de car1cter d1ctil, se caracteriza por cavidades en forma de copa que pueden ser equiaxial, parab3lica, el1ptica dependiendo del estado de esfuerzo.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo analizar los efectos mecánicos y químicos resultantes del proceso de cementación sólida y tratamiento de temple y revenido. Las pruebas se realizaron en dos aceros microaleados, frecuentemente empleados en componentes mecánicos como engranajes, piñones de ataque, arboles de levas, cuerpos de válvulas, barras de torsión y pasadores de pistones entre otros, que deben soportar fuertes sollicitaciones mecánicas y alta resistencia al impacto.

Para cumplir con los objetivos del trabajo, éste se dividió en dos partes, una teórica y otra experimental. La parte teórica comienza con una revisión exhaustiva de las propiedades físicas, químicas metalúrgicas y mecánicas de los aceros, luego se describen las transformaciones alotrópicas en los diagramas de fases y en los diagramas de tiempo, temperatura y transformación.

Se analiza la cementación para los dos aceros en estudio, los parámetros a considerar y rangos óptimos, para luego pasar a los cambios microestructurales que ocurren durante la cementación. Se especifican normas y ensayos aplicables a los aceros con los cuales se pueden caracterizar la cementación.

Para la parte experimental se utilizaron probetas Charpy estándar del Tipo A, por cuanto el fondo de entalla de esta probeta fabricada en acero microaleado cementado, templado y revenido representa adecuadamente el radio del pie del diente de un engranaje u otro similar. Se mecanizaron las

probetas en los aceros DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5. Para la cementación se utilizó la mezcla de carbonatos BaCO_3 , CaCO_3 y Na_2CO_3 que sirvieron como activadores y mejoradores a la acción carburante del grafito.

Se tomaron muestras de las probetas cementadas, templadas y revenidas, para realizar los análisis metalográficos entre las cuales se analizó la profundidad de penetración de la capa carburada, la morfología de fases y grano de la capa carburada; seguido de los ensayos de dureza, ensayos de impacto y fractografías.

Para el análisis de la difusión del carbono en la capa carburada, se tomó como referencia los mecanismos de difusión y la segunda ley de Fick.

De los resultados obtenidos se concluye que los valores de dureza superficial son bastante similares entre ambos aceros con variaciones mínimas de 1 a 2 dureza Rockwell-C algo menor para el acero DIN 16CrNi4 en comparación al acero DIN 16MnCr5 en la condición de templado y templado-revenido de la capa cementada de probetas Charpy. Como también los resultados de la penetración de dureza son bastante homogéneos entre ambos, demostrando un perfil de templabilidad similar. Sin embargo, no hay relación directa entre dureza y la tenacidad del acero.

Se puede afirmar que, a medida que aumenta el espesor de la capa cementada, la tenacidad propia del acero en estado de suministro disminuye. En los aceros con cementación-temple y revenido, el acero DIN 16MnCr5 presenta levemente mayor tenacidad (entre 1 a 2 joules) en comparación al DIN 16CrNi4.

OBJETIVOS

General

El objetivo del presente trabajo es profundizar en el conocimiento de la cementación en aceros de baja aleación, dando un aporte científico a la difusión del carbono en los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5, con la finalidad de determinar los parámetros necesarios para la obtención de las capas cementadas, desarrollando una especificación de procedimiento y recomendación para obtener los resultados esperados.

Específicos

1. Aplicar los criterios para la selección del acero a cementar.
2. Determinar las normas que se aplican para el análisis de la cementación.
3. Establecer los parámetros de la cementación para los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5.
4. Comparar los resultados de la difusión del carbono entre los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5.
5. Analizar los resultados de los ensayos a desarrollarse.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realizó dentro de los objetivos de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, específicamente dentro de los lineamientos básicos del Proyecto en Investigaciones Metalúrgicas en el área de los Tratamientos Térmicos; para la ejecución del mismo se contó con el patrocinio de la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) y el apoyo proporcionado por la académica del Departamento de Ingeniería de Materiales (DIMAT) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción (UdeC), MSc. Marta López Jenssen. Como parte del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), la práctica de la investigación se realizó en los laboratorios de la UdeC.

Los resultados de la investigación fueron presentados en el informe de Memoria de Título en el DIMAT de la Facultad de Ingeniería de la UdeC en la República de Chile.

Los endurecimientos superficiales de los aceros en general, son ampliamente utilizados en el diseño y construcción de elementos de máquinas en ingeniería mecánica, específicamente en piezas sometidas a desgaste por fricción, erosión y otras sollicitaciones mecánicas involucradas en el uso de las piezas metálicas, tales como ejes, engranajes, bujes, chumaceras, etc.

Los endurecimientos superficiales pueden ser llevados a cabo con tratamientos termoquímicos, que cambian la composición química de los aceros expuestos a cualquiera de los diferentes carburantes (gas, líquido ó sólido), y a una temperatura que facilite la difusión del elemento carburante, obteniendo

como resultado una capa superficial saturada de carbono en comparación con el núcleo de la pieza del acero a tratar; el temple superficial es otro método para alcanzar alta dureza en la superficie de los aceros, controlando la intensidad del calor aplicado y la velocidad de calentamiento en la pieza, para obtener la profundidad de la zona endurecida que se requiere.

1. ANTECEDENTES

Los engranajes son utilizados para transmitir potencia y movimiento entre los diferentes elementos de una máquina. Una fuente de energía (motor de combustión interna o motor eléctrico) transmite el movimiento a cierto engranaje (engranaje motor) para que otra la reciba (engranaje conducido) y de esta manera transmitir la potencia generada por la fuente de energía.

Cada diente del engranaje tiene que soportar grandes momentos de torsión y a la vez deben de poseer resistencia al desgaste. Es por ello, que se aplican tratamientos térmicos superficiales para aumentar la durabilidad y la exigencia de las cargas aplicadas.

Existen varios procesos de tratamientos térmicos superficiales como la cementación, cianuración o carbonitruración, nitruración, endurecimiento por flama y endurecimiento por inducción; los dos últimos conocidos como temple superficial.

Avner¹, define los principales conceptos que tienen que ver con los endurecimientos superficiales, de la siguiente manera:

- Cementación, conocido en la actualidad como carburación, se puede llevar a cabo por medio de material sólido de carburación, gas rico en carbono y por líquido. En la cementación por material sólido, las piezas están rodeadas por una mezcla carburante en un recipiente cerrado, llevando al acero, a una temperatura adecuada (región austenítica)

¹ Sidney H., Avner, Introducción a la metalurgia física, 1988.

durante el tiempo requerido para alcanzar un espesor determinado de capa cementada y luego se enfría con lentitud, aunque en la actualidad existen aceros microaleados que pueden llevarse inmediatamente desde la carburación de corto tiempo, al temple.

- La mezcla carburante suele constar de carbón vegetal, carbonato de sodio, carbonato de bario y carbonato de calcio, donde los carbonatos sirven como activadores y mejoradores de la acción carburante. En la cementación por gas, el acero se calienta en contacto con monóxido de carbono o un hidrocarburo, que se descompone a temperaturas de carburación. Entre los hidrocarburos utilizados suele emplearse: metano, propano, gas natural o hidrocarburo fluido vaporizado.
- La cementación por líquido consiste en colocar el acero en un baño de cianuro fundido, donde el carbono difunde desde el baño hacia el núcleo o centro de la pieza y producirá una capa superficial. La cementación por líquido se diferencia de la cianuración por el carácter y composición de la superficie dura producida; las superficies endurecidas por cianuro son más altas en nitrógeno y más bajas en carbono, lo inverso para las superficies endurecidas por cementación por líquido.
- Cianuración, a través del nitrógeno y carbono se obtiene una capa dura para los aceros, producida por un baño de cianuro, este tratamiento térmico depende de la composición y de la temperatura del baño.
- Carbonitruración, generalmente incluye una mezcla de gas portador, gas enriquecedor y amoniaco. El acero se calienta a una atmósfera gaseosa de tal composición que el carbono y el nitrógeno se absorben simultáneamente.

- Nitruración, consiste en una mezcla de gas de amoníaco y amónio disociado, que al momento de reaccionar, producen una atmósfera que endurece al acero; la efectividad del proceso depende de la formación de nitruros por la reacción de nitrógeno con ciertos elementos aleantes en el acero.
- Endurecimiento por llamas, comúnmente se realiza mediante un soplete de oxiacetileno, ajustando la intensidad de la llama y la velocidad de calentamiento de la pieza; para obtener la profundidad de la zona endurecida que se requiere.
- Endurecimiento por inducción, el procedimiento es semejante a la de un transformador eléctrico en donde el primario de la bobina está constituido por varias vueltas de tubería de cobre enfriadas por agua y la pieza que va a endurecerse desempeña el papel del secundario, el calentamiento se produce por las corrientes de alta frecuencia inducidas bajo la acción de un campo magnético.

De igual manera, Verhoeven², indica lo siguiente:

Dentro de la cementación, cianuración o carbonitruración, nitruración, surge el concepto de transporte de masa; donde el transporte de masa en gases y líquidos se origina generalmente debido a una combinación de convección y difusión. En la cementación por material sólido, no se produce la convección, por lo cual, la difusión es el único medio disponible de transporte de masa.

² Verhoeven, John D., Fundamentos de metalurgia física, 1987

La aplicación de tratamientos térmicos hace que en el acero se genere un cambio de fases, que induce el cambio en sus propiedades eléctricas, propiedades térmicas (soldabilidad, fusibilidad, punto de fusión), propiedades magnéticas y propiedades mecánicas (dureza, resistencia máxima, elasticidad, plasticidad, fatiga y la fluencia térmica (*creep*)). La presencia de los elementos aleantes como: cromo, níquel, manganeso, molibdeno, vanadio, aluminio, cobre, tungsteno, entre otros, pueden modificar las propiedades físicas en los aceros y por ende las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas.

1.1. Ubicación del tema

La amplia gama de piezas mecánicas manufacturadas con acero, ya sea estos al bajo, medio y/o alto carbono como también microaleados o de alta aleación, son muy utilizados dentro de la industria para cumplir ciertos propósitos dependiendo de las condiciones expuestas, soportando ambientes químicamente corrosivos, altas y bajas temperaturas, cargas cíclicas, rozamientos u otra sollicitación mecánica.

El ingeniero debe tener la seguridad en la selección del material (acero) para la construcción de cierta pieza mecánica; debe ser conocedor de las deformaciones plásticas y elásticas que puede sufrir el material ocasionada por las distintas cargas aplicadas en el funcionamiento de dicha pieza dentro de cierta máquina; debe tener el conocimiento de las metodologías que conducen a mejorar las propiedades físicas a través de cambios microestructurales.

El conocimiento de las normas ASTM es indispensable para la buena práctica de los ensayos destructivos y no destructivos, aportando referencias adecuadas para la recopilación de datos que el investigador requiere para la elaboración de ciertos estudios.

Por otro lado, el *Metals Handbook* ayuda a la interpretación de resultados en donde se presentan los estudios encontrados en las últimas décadas para los diferentes metales ya sean estas aleaciones binarias o ternarias y la fabricación de los diagramas de fases en donde se aprecian las soluciones sólidas y/o compuestos y las morfologías según el tipo de reacción invariante que estas presentan, como también estudios de fractografía, soldadura, corrosión entre otros.

Por todo lo anterior, en el presente trabajo se analizan los cambios de morfología, propiedades mecánicas (dureza, tenacidad) y difusión del carbono que induce el tratamiento térmico superficial de cementación (carburación por material sólido) en los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5. Para ello se utilizan probetas Charpy tipo A con engranajes de dientes rectos, dado que entre el flanco y el valle de cada diente del engranaje existe el radio de la entalla del pie del diente con un cierto ángulo que dependerá de la fresa de módulo, el cual ayuda a reducir las concentraciones de los esfuerzos al igual que en probetas Charpy tipo A, en que su entalla posee un ángulo de 45 grados.

1.2. Planteamiento del problema

El desgaste superficial en las piezas mecánicas en contacto una con otra es inevitable, lo cual se puede minimizar por medio de una capa superficial endurecida con una composición química diferente a la del núcleo, para obtener una pieza híbrida que cumplirá con las expectativas en los requerimientos de la pieza (alta dureza en la superficie y alta tenacidad en el núcleo). El presente trabajo, plantea la metodología para la cementación en dos aceros microaleados de procedencia *ThyssenKrupp*.

1.2.1. Cuestionamientos

¿Cuáles son los carbonatos que se pueden emplear para la activación y mejoramiento de la acción carburante y que porcentajes en peso son los adecuados en la mezcla carburante? ¿Cuáles son las temperaturas adecuadas para que suceda la difusión y la máxima solubilidad de los átomos de carbono en el hierro gamma en el proceso de cementación? ¿Qué factores se tiene que consideran para establece el templado del acero? ¿Cuál es la influencia de los elementos microaleados en la difusión de los átomos de carbono, en la dureza y tenacidad resultante? ¿Qué ensayos son los adecuados para el análisis del comportamiento mecánico en piezas tratadas térmicamente? Estos cuestionamientos se resuelven durante el desarrollo del trabajo.

1.2.2. Justificación

Los tratamientos térmicos en los aceros son procedimientos muy comunes en la actualidad, permitiendo el mejoramiento y la durabilidad de piezas mecánicas, cumpliendo las solicitaciones mecánicas requeridas (dureza, tenacidad y ductilidad entre otras). El conocimiento de los distintos tratamientos térmicos dará al ingeniero una buena interpretación de los resultados finales en las microestructuras y las aplicaciones y delimitaciones de la pieza mecánica a tratar.

Los procedimientos adecuados para el acero a tratar térmicamente son fundamentales; reduciendo de este modo el costo en la fabricación de piezas y las pérdidas en materiales. Es por ello, que la propuesta de la metodología que sirva como referencia del tratamiento termoquímico (cementación por material sólido), queda más que justificada.

1.3. Metodología de investigación

Para la realización del presente estudio, éste se dividió en dos partes, una teórica y otra experimental. La parte teórica comienza con una investigación bibliográfica de aceros sometidos a cementación-temple-revenido; para conocer las propiedades físicas, parámetros a considerar como el tiempo, temperatura y las transformaciones que ocurren en las microestructuras propias de los aceros. Para la parte experimental se utilizaron normas ASTM para realizar las metalografías, ensayos de dureza, ensayos de impacto, de las probetas en estado de suministro y posteriormente después de los tratamientos térmicos de cementación-temple-revenido, de los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5.

2. NOCIONES BÁSICAS EN LA MANUFACTURA DE ENGRANAJES

2.1. Engranajes

Un sistema de engranajes es un conjunto de dos o más ruedas dentadas, en donde los dientes encajan entre sí, de tal manera que al girar una de ellas arrastra a la otra. La transmisión de movimiento y fuerza mediante engranajes tiene importantes ventajas: mayor solidez de los mecanismos, reducción del espacio ocupado, relación de transmisión más estable, posibilidad de cambios de velocidad automáticos y mayor capacidad de transmitir potencia. Los engranajes, debido a las ventajas que conlleva su utilización, tienen un amplio campo de aplicación y se utilizan en todo tipo de máquinas y aparatos.

Figura 1. Par de engranajes rectos



Fuente: <http://edutec-marcela.blogspot.com/2011/05/engranes.html>. Consultada: 20 de noviembre 2012.

2.1.1. Tipos de engranajes

Uno de los más importantes medios de movimientos en las máquinas es el sistema de engranajes; estos se clasifican:

- Destinados a transmitir movimiento de ejes paralelos:
 - Engranajes rectos o cilíndricos.
 - Engranajes helicoidales
 - Engranajes helicoidales a ejes paralelos.
 - Engranajes helicoidales dobles.
 - Engranajes de cadena.
- Destinados a transmitir movimiento de ejes perpendiculares:
 - Engranajes cónicos.
 - Engranajes cónicos de dientes rectos
 - Engranajes cónicos helicoidales
 - Tornillo sin-fin y su corona.
 - Engranajes helicoidales a ejes perpendiculares.

Para su efecto, este trabajo sólo se enfocará en los engranajes rectos o cilíndricos.

2.1.2. Engranajes rectos

Para transmitir un movimiento circular continuo de un eje a otro que este paralelo, se puede imaginar el montaje de dos cilindros frotando uno sobre el otro (figura 2). Si la adherencia de los dos cilindros es suficiente, la rotación transmitida por uno de ellos pondrá en movimiento circular continuo al otro, en sentido inverso del primero.

Con este sistema los deslizamientos son lógicos, y para evitar eso, se proveen las superficies en contacto de dientes, engranando los unos con los otros; una parte de cada diente se establece al interior del cilindro liso, y la otra al exterior; el cilindro liso en realidad desaparece, pero no es así, sino subsiste sobre los trazos. Esta es la norma fundamental de todo engranaje y se le denomina círculo primitivo; este círculo es el punto de partida para el cálculo de engranajes (Casillas, A. L., Máquinas cálculos de taller, 1981).

La fórmula para determinar el diámetro del círculo primitivo:
Módulo multiplicador por el número de dientes:

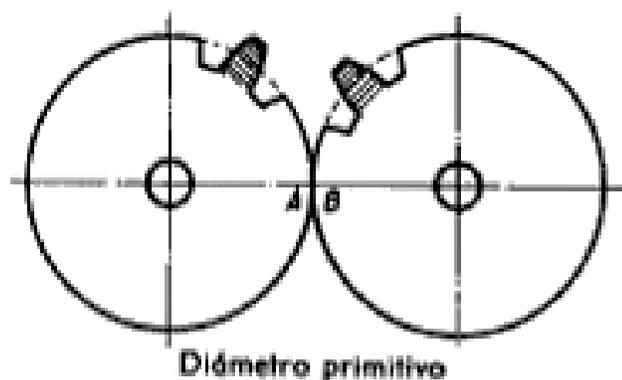
$$D_p = M \times N \text{ (mm)} \quad (1)$$

D_p = Diámetro primitivo

M = Módulo

N = Número de dientes

Figura 2. **Engranajes rectos**



Fuente: CASILLAS, A. L. Máquinas cálculos de taller. p. 148.

2.1.3. Paso circunferencial

Se determina por la distancia de un punto de un diente a otro correspondiente al diente siguiente. Se medirá el paso sobre el diámetro primitivo, dándosele el nombre de paso circunferencial, y si por ejemplo, se tiene un engranaje que tiene 10 milímetros de paso, éste será medido en el diámetro primitivo, correspondiendo 5 milímetros al espesor del diente y 5 milímetros al espacio entre dos dientes. El paso circunferencial está dado, y la longitud del diámetro primitivo desarrollado dependerá del número de dientes del engranaje (Casillas, A. L., Máquinas cálculos de taller, 1981).

El diámetro primitivo por tanto, es igual a:

$$D_p = \frac{P \times N}{\pi} \text{ (mm)} \quad (2)$$

P = Paso circunferencial

N= Número de dientes

2.1.4. Módulo

Se le denomina fresa de módulo a la herramienta de corte que se utiliza en la máquina fresadora, para el tallado de los dientes de los engranajes. El tamaño de la fresa de módulo está estandarizado para cumplir cierto tipo de corte y número de dientes en la fabricación de engranajes, la fresa de módulo es más conocida como módulo.

El tamaño del módulo, se podrá hallar con el paso circunferencial dividido π .

$$M = \frac{P}{\pi} \text{ (mm)} \quad (3)$$

Si se toma para el paso un número entero, el módulo no será nunca un número entero, y por consiguiente, el diámetro primitivo tampoco, este inconveniente es particularmente molesto porque lleva consigo que para un juego de engranajes, la cota de distancia entre ejes y diámetros es fraccionaria.

Para vencer esta dificultad se toma como paso circular los múltiplos de π en lugar de tomar números, siendo tan simple la regla del sistema de módulo que no consiste en más que el paso contiene una, dos, tres y más veces el número del módulo multiplicado por π (Casillas, A. L., Máquinas cálculos de taller, 1981).

Otra forma para encontrar el módulo, es la siguiente:

$$M = \frac{D_e}{N+2} \text{ (mm)} \quad (4)$$

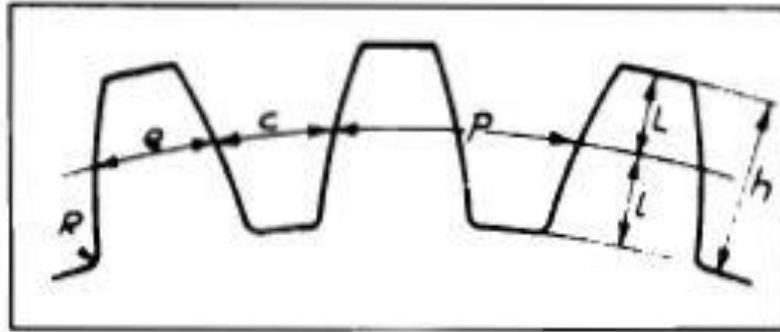
D_e = Diámetro exterior

N = Número de dientes

2.1.5. Dimensiones de los dientes en función del módulo

El módulo no solo sirve para caracterizar los diámetros de un engranaje, sino que los dientes están también relacionados con él; las diferentes partes de un engranaje de dientes rectos se detallan en la figura 3.

Figura 3. **Nomenclatura de engranajes de dientes rectos**



Fuente: CASILLAS, A. L. Máquinas cálculos de taller. p. 150.

h = Altura total del diente

L = Altura de la cabeza del diente

l = Altura del pie del diente

R = Radio del pie del diente

P = Paso circunferencial

e = Espesor

c = Espacio entre dientes

Ecuaciones

$$h = 2,167 \times \text{Módulo (mm)} \quad (5)$$

$$L = \text{Módulo (mm)} \quad (6)$$

$$l = 1,167 \times \text{Módulo (mm)} \quad (7)$$

$$R = 0,3 \times \text{Módulo (máximo) (mm)} \quad (8)$$

$$P = c + e = \pi \times \text{Módulo (mm)} \quad (9)$$

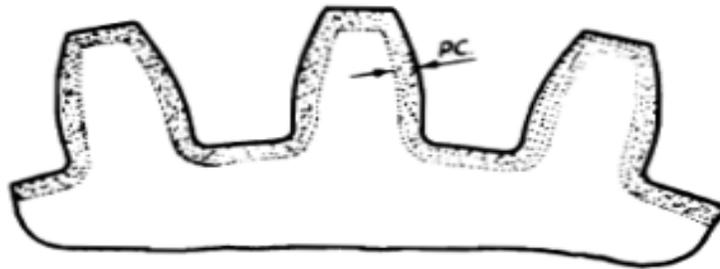
$$e = 0,5 \times P \text{ (mm)} \quad (10)$$

$$c = 0,5 \times P \text{ (mm)} \quad (11)$$

2.1.6. Profundidad de la capa cementada en engranajes

En la manufactura de engranajes, Casillas, A. L., 1981, establece la profundidad de penetración de la capa cementada como dependiente del módulo utilizado para la fabricación, como se representa en la figura 4 y tabla I.

Figura 4. Profundidad de Penetración de la Cementación (PC)



Fuente: CASILLAS, A. L. Máquinas cálculos de taller. p. 173.

Tabla I. Profundidad de cementación según módulo

Módulo	PC (mm)	Módulo	PC (mm)
1	0,2	3-3,25	0,7
1,25-1,5	0,3	3,5	0,8
1,75	0,4	3,75-4	0,9
2-2,25	0,5	4,5-5	1
2,5-2,75	0,6	5,5-6	1,3

Fuente: CASILLAS, A. L. Máquinas cálculos de taller. p. 173

Del módulo 6 en adelante se aplicará la siguiente ecuación

$$PC = \frac{M \times \pi}{2} \times \frac{15}{100} \quad (12)$$

3. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES METALÚRGICOS

3.1. Diagrama de fases Fe-C

Los resultados de las aleaciones de hierro con carbono son los aceros y fundiciones, aunque suelen contener ciertos porcentajes de otros elementos, ya sean impurezas indeseadas provenientes del proceso de fabricación, o elementos aleantes añadidos en cantidades significativas, para mejorar ciertas propiedades específicas.

El diagrama de fases Fe-C suele utilizarse para estudiar la relación entre microestructuras, transformaciones, y propiedades. En la práctica industrial, manejando los rangos de velocidades de enfriamiento normales, el carbono se encuentra en los aceros y fundiciones en forma de carburo de hierro conocido como cementita (Fe_3C). El diagrama de equilibrio entre el hierro y la cementita se denomina diagrama metaestable Fe-C, dado que la cementita no es la fase más estable termodinámicamente, pero presenta una estabilidad práctica debido a condiciones cinéticas.

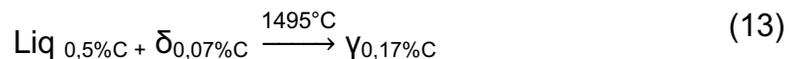
Cambiando las condiciones de velocidad de enfriamiento, a muy lentas, o bajo la presencia de otros elementos aleantes en el acero o las fundiciones, el carbono puede encontrarse en forma de grafito puro, en cuyo caso la distribución de fases presentes y sus transformaciones se estudian en el diagrama estable Fe-C. La composición química y la temperatura de cada reacción invariante se desplaza un pequeño margen respecto a las del diagrama metaestable.

Sin embargo, para condiciones de velocidad de enfriamiento muy altas, el diagrama metaestable Fe-C no se cumple; para tales condiciones las estructuras y fases resultantes se predicen y se estudian utilizando los diagramas o curvas de tiempo-temperatura-transformación (Curvas TTT), ya sean éstas de transformación isotérmica (curvas IT) o curvas de enfriamiento continuo (Curvas CCT). La figura 5, presenta el diagrama Fe-C, abarcando el rango de mayor importancia tecnológica (0 hasta 6,67 por ciento de carbono) y los rangos de estabilidad y reacciones invariantes de las distintas fases del diagrama metaestable (línea continua), como para el diagrama estable (línea discontinua).

En la figura 6, se muestra el diagrama Fe-C en el rango de aplicación para aceros (aceros comerciales hasta 1,2 por ciento de carbono) (Callister, Williams D., Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 1995).

Se presentan las reacciones invariantes del diagrama de fases Fe-C:

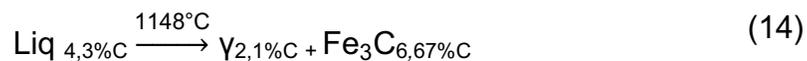
- Reacción peritética



δ = Ferrita delta

γ = Austenita

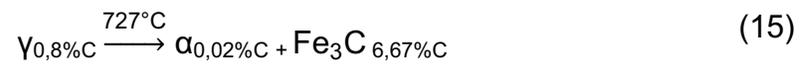
- Reacción eutéctica



Fe_3C = Cementita

El producto de esta reacción se denomina Ledeburita.

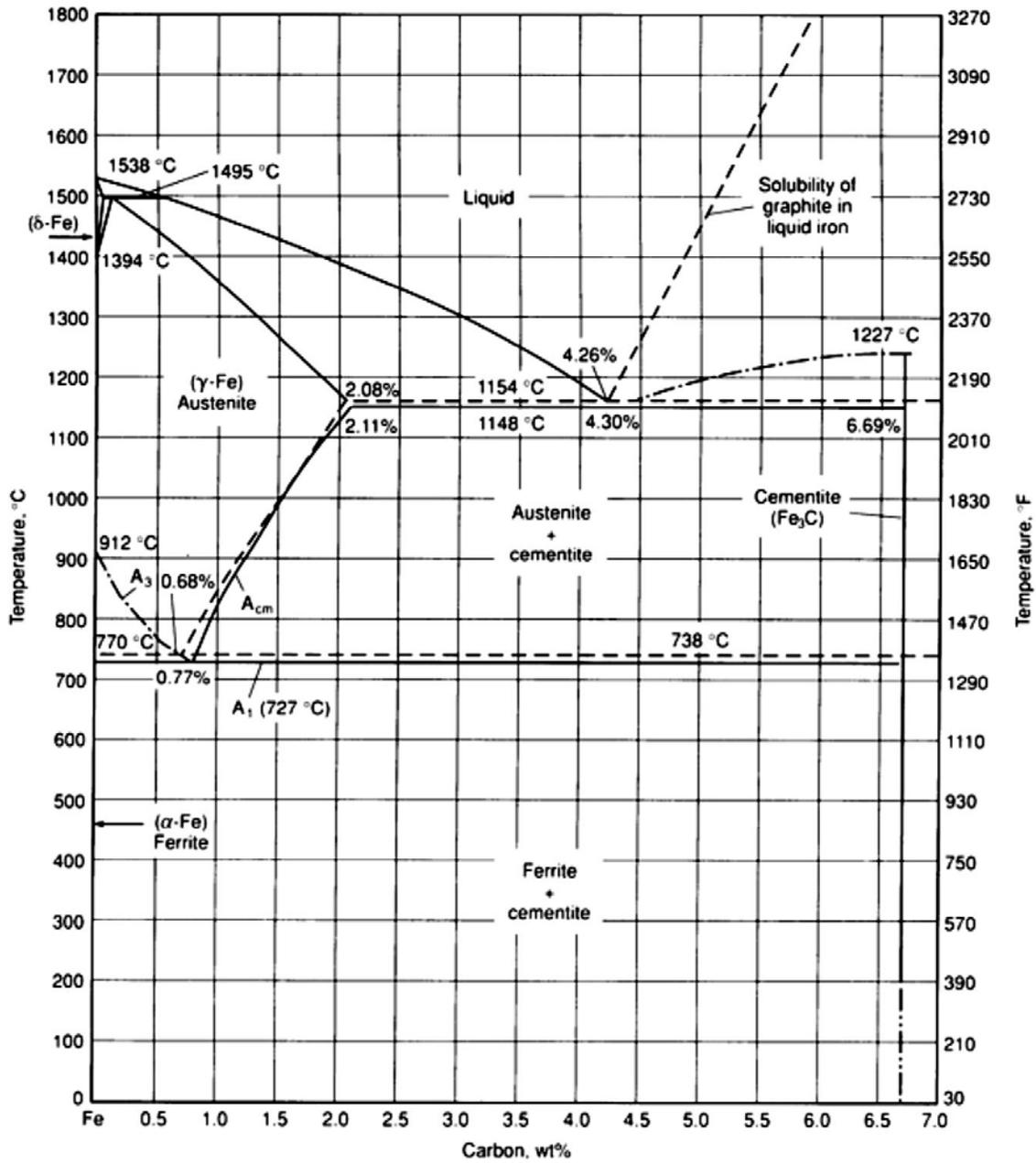
- Reacción eutectoide



α = Ferrita (o ferrita alfa)

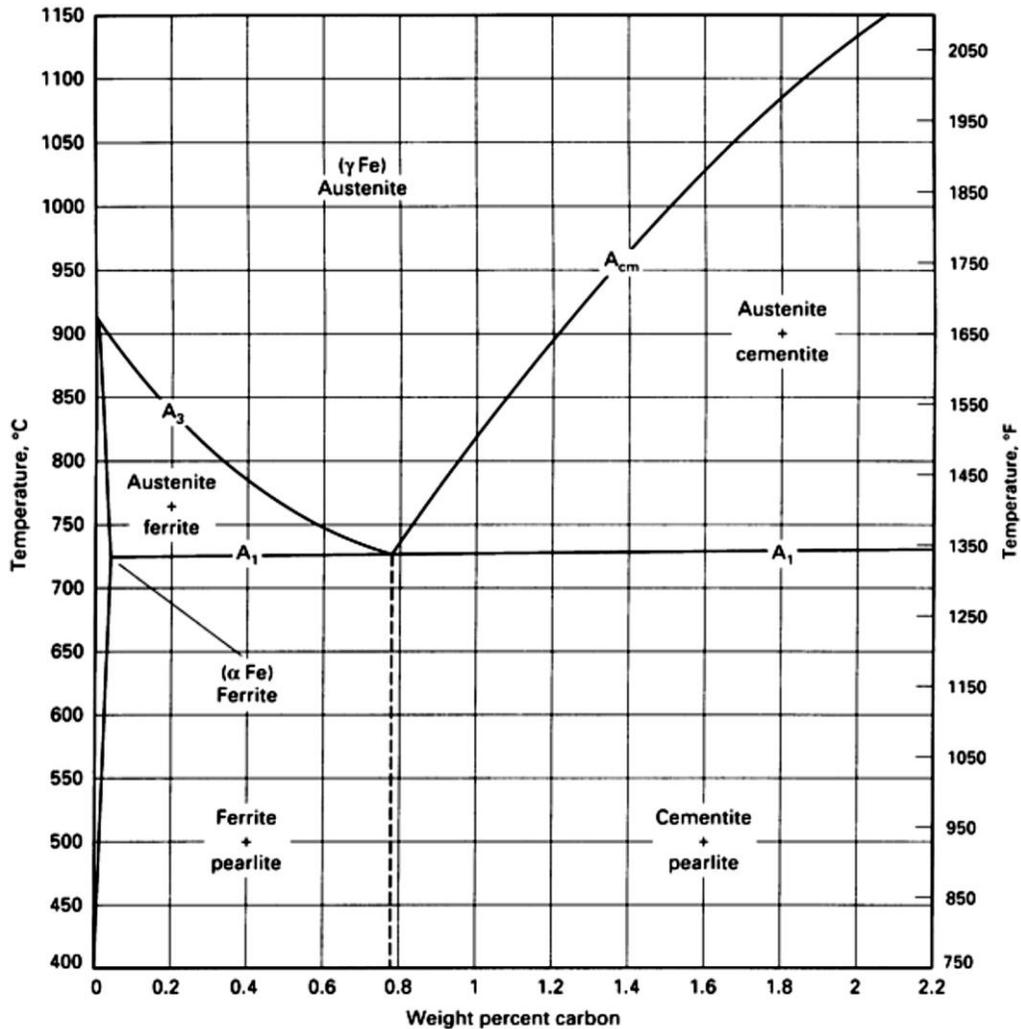
El porcentaje en peso del carbono de la austenita es de 0,77 por ciento de carbono, pero para efecto de cálculos se trabaja con 0,8 por ciento de carbono. El producto de esta reacción se denomina Perlita.

Figura 5. Diagrama de fases Fe-C



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*, p. 17.

Figura 6. Diagrama de fases Fe-C. En el rango de aceros



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 103.

Se conoce como temperatura crítica inferior o A_{c1} a la temperatura que delimita la transformación en calentamiento de la perlita a austenita (temperatura de 727 grados centígrados). Temperatura que demarca la transformación completa a austenita en el calentamiento, se denomina

temperatura crítica superior o A_{c3} , para los aceros con menos de 0,8 por ciento de carbono y A_{cm} para los aceros con más de 0,8 por ciento en carbono.

Cuando se trata del estudio de la transformación en enfriamiento, las temperaturas críticas se denominan A_{r1} , y A_{r3} (Sidney H., Avner, Introducción a la metalurgia física, 1988). Los aceros con contenido de carbono de 0,8 por ciento o muy próximos de éste, se conocen como eutectoides, en donde la ferrita y la cementita se encuentran en equilibrio formando únicamente perlita a una temperatura menor a la A_{c1} . Los aceros de contenido de carbono menor a 0,8 por ciento, se denominan hipoeutectoides, y los de contenido de carbono mayor se denominan hipereutectoides.

Los elementos aleantes pueden alterar la temperatura crítica inferior y la superior. El *Metals Handbook, Heat Treating*, 1998, define las ecuaciones 16 y 17 para establecer las nuevas temperaturas.

$$A_{c1} (\text{°C}) = 723 - 20,7\% \text{ Mn} - 16,9\% \text{ Ni} + 29,1\% \text{ Si} - 16,9\% \text{ Cr} \quad (16)$$

$$\text{Desviación estándar} = \pm 11,5 \text{ °C}$$

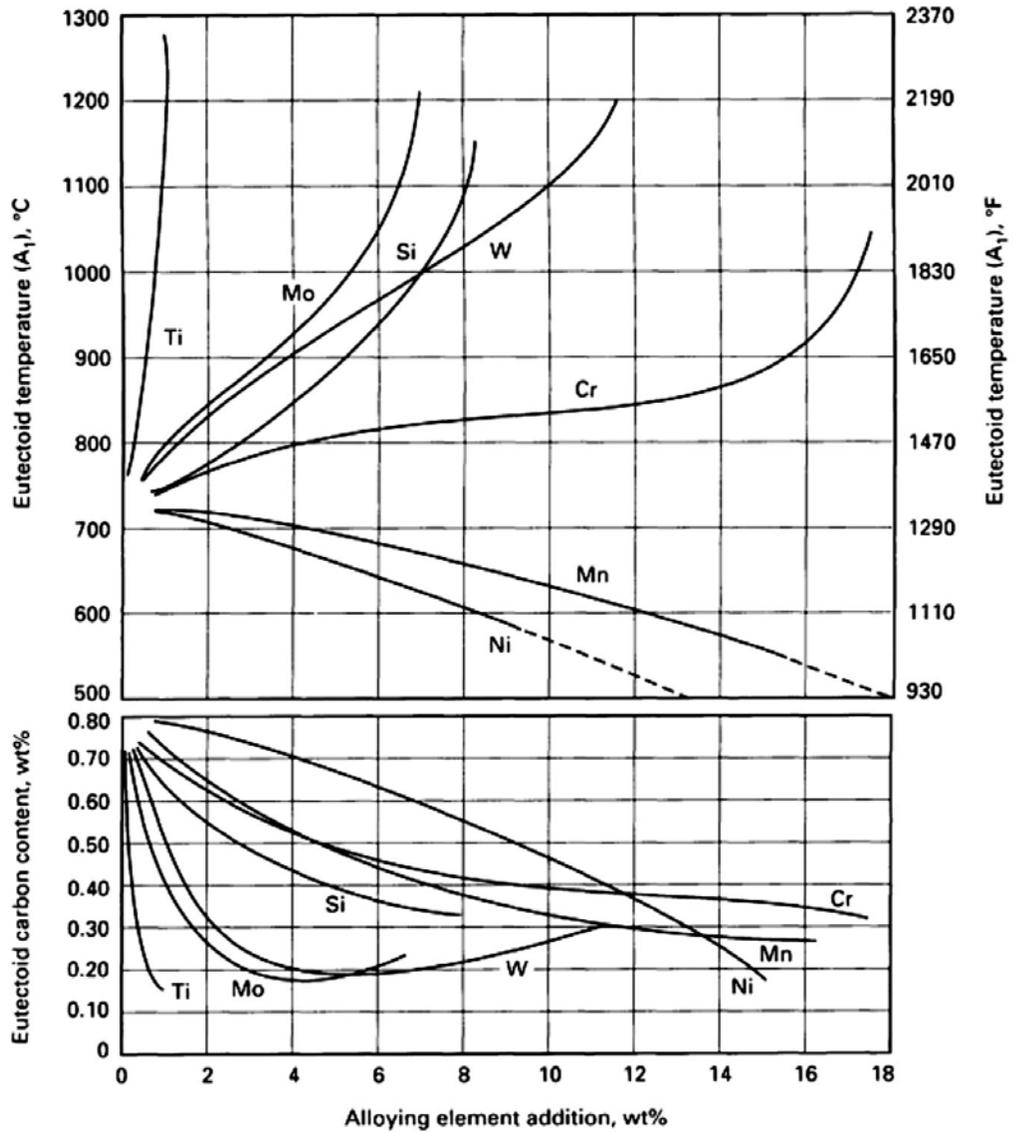
$$A_{c3} (\text{°C}) = 910 - 203\% \text{ C} - 15,2\% \text{ Ni} + 44,7\% \text{ Si} + 104\% \text{ V} + \quad (17)$$

$$31,5\% \text{ Mo}$$

$$\text{Desviación estándar} = \pm 16,7 \text{ °C}$$

Si los elementos aleantes se proporcionan en cantidades significativas, éstos producirán cambios muy relevantes en la temperatura y porcentaje de carbono del eutectoide. A través de las experiencias realizadas en los aceros se puede establecer para la orientación y deducción de la figura 7 el nuevo punto eutectoide, modificado por la presencia de aleantes.

Figura 7. Influencia de adición de elementos aleantes en la temperatura y el contenido de carbono del eutectoide



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 18.

3.2. Microestructuras de los aceros

El diagrama de Fases Fe-C presenta diferentes tipos de microestructuras a través de su composición química, cada morfología que se observa a través del microscopio óptico y electrónico según su composición química, tiene su característica mecánica propia. Recordando que el diagrama de Fases Fe-C se presenta en forma de equilibrio, mientras tanto, en su forma de no equilibrio (enfriamientos precipitados) se puede encontrar otros tipos de microestructuras con características mecánicas diferentes a las del diagrama en equilibrio.

Las microestructuras de las que se hace mención en este trabajo pertenecen al rango de aceros del 0,02 al 2,1 por ciento de carbono.

3.2.1. Ferrita

Es una solución sólida de composición Fe α y C, de estructura cristalina BCC. La máxima solubilidad del C en el Fe α se encuentra a 0,02 por ciento a 727 grados centígrados, mientras que a temperatura ambiente es de 0,008 por ciento de carbono. Es blanda y dúctil de dureza Brinell 90, 28 kilogramos por milímetro cuadrado de resistencia y 35 por ciento de elongación. Se presenta como fase proeutectoide en aceros hipoeutectoides, se ve blanca al microscopio, y presenta límites de grano bien definidos al ser atacada con nital (figura 8).

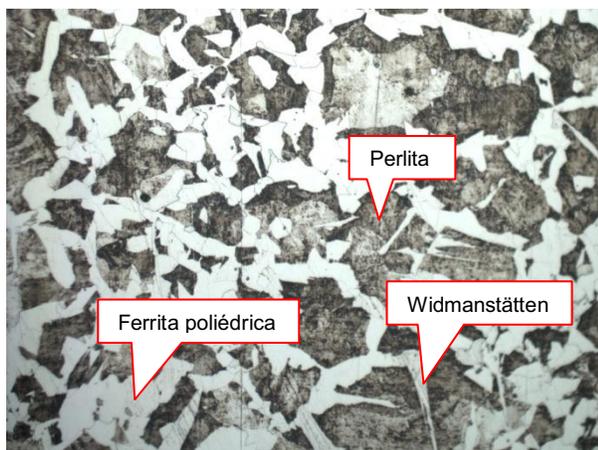
En condiciones de enfriamiento rápido en aceros de bajo carbono, la ferrita adquiere una morfología acicular, denominada Ferrita *Widmanstätten* estructura típica de los aceros en bruto de colada (figura 9) (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

Figura 8. **Cristales blancos de ferrita y negros de perlita en un acero SAE 1010. Nital 2%. x200**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 9. **Ferrita poliédrica y *Widmanstätten*, acero DIN 16MnCr5, aparición por enfriamiento no controlado. Nital 2%. X200**



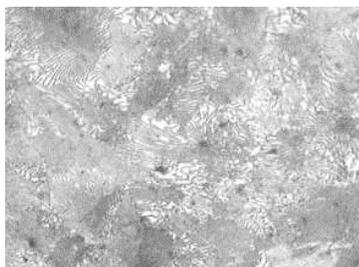
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

3.2.2. Perlita

Es el resultado de la reacción eutectoide en el enfriamiento lento de la austenita en el diagrama de fases Fe-C metaestable. La perlita contiene un 0,8 por ciento de carbono y está compuesta de un 88 por ciento de ferrita y un 12 por ciento de cementita, formando láminas paralelas y alternadas (morfología laminar). Su dureza está alrededor de 20 Rockwell-C (200-300 dureza Brinell).

La distancia entre las láminas de perlita depende de la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenización. La perlita gruesa se obtiene con enfriamiento muy lento dentro del horno y la distancia entre las láminas es 400 nanómetros³, la perlita normal tiene 350 nanómetros y la perlita fina enfriada dentro del horno rápidamente o enfriada al aire tiene 250 nanómetros (ver figura 10). A menor separación entre láminas en la perlita, la resistencia mecánica aumenta, debido a la mayor cantidad de interfases entre la ferrita y cementita (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

Figura 10. **Perlita gruesa y perlita fina (zona oscura), acero al 0,85 %C. Nital 2%. x400**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

³ nm = nanómetro = 1E-9 metros.

3.2.3. Cementita

En el diagrama de fases Fe-C metaestable se encuentra como un carburo de hierro de fórmula Fe_3C , correspondiente a un 6,67 por ciento de carbono. Con una dureza de 68 Rockwell-C, es frágil, y de alta resistencia mecánica en compresión pero baja en tracción. Está presente como constituyente de la perlita, como $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{II}}$ (proeutectoide o cementita secundaria) en aceros hipereutectoides, y como $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{I}}$ (proeutéctica o cementita primaria) en fundiciones blancas hipereutéticas.

Su estructura cristalina es ortorrómbica. Cuando se presenta como cementita secundaria, se encuentra precipitada en los límites de grano de la perlita (figura 11) disposición que disminuye de gran manera la tenacidad de los aceros de alto carbono.

Figura 11. **Cementita proeutectoide (blanca) en los límites de grano, rodeando las colonias de perlita, en un acero al 1,4% C. Nital 2%. x1000**



Fuente: CALLISTER, Williams D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. p. 291.

3.2.4. Austenita

Presente en el diagrama de fases Fe-C como solución sólida de hierro gamma (Fe_γ) (estructura cristalina FCC) y carbono. La máxima solubilidad del carbono en el Fe_γ es de 2,1 por ciento a 1 148 grados centígrados. Por su estructura cristalina es más compacta y tiene mejor resistencia a la corrosión. Es una fase muy blanda y dúctil. Esta fase no es estable a temperatura ambiente, pero sí con la adición de cantidades significativas de elementos aleantes, tales como el cromo y el níquel (como en los aceros inoxidable austeníticos).

También puede observarse a temperatura ambiente en aceros de alto carbono templados, en la forma de austenita retenida la cual es una fase metaestable sin transformar (figura 12) (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

3.2.5. Martensita

Se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde alta temperatura y está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono o Fe_3C en hierro alfa (Fe_α). Es el resultado de una estructura de no equilibrio de la transformación sin difusión de la austenita. La austenita FCC experimenta una transformación polimórfica a la martensita tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) (figura 13). La celdilla unidad de esta estructura cristalina es un cubo, alargado en una de sus tres dimensiones, centrado en el cuerpo; esta estructura es diferente a la ferrita BCC.

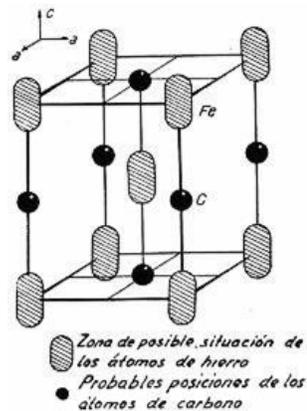
Tiene una resistencia de 170 a 250 kilogramos por milímetro cuadrado, una dureza de 50 a 68 Rockwell-C y alargamiento de 2,5 a 0,5 por ciento (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

Figura 12. **Martensita (agujas aciculares negras) sobre una matriz de austenita retenida (blanco), acero DIN 16CrNi4, cementada y templada en aceite, Nital 2%. x1000**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 13. **Estructura de la martensita**

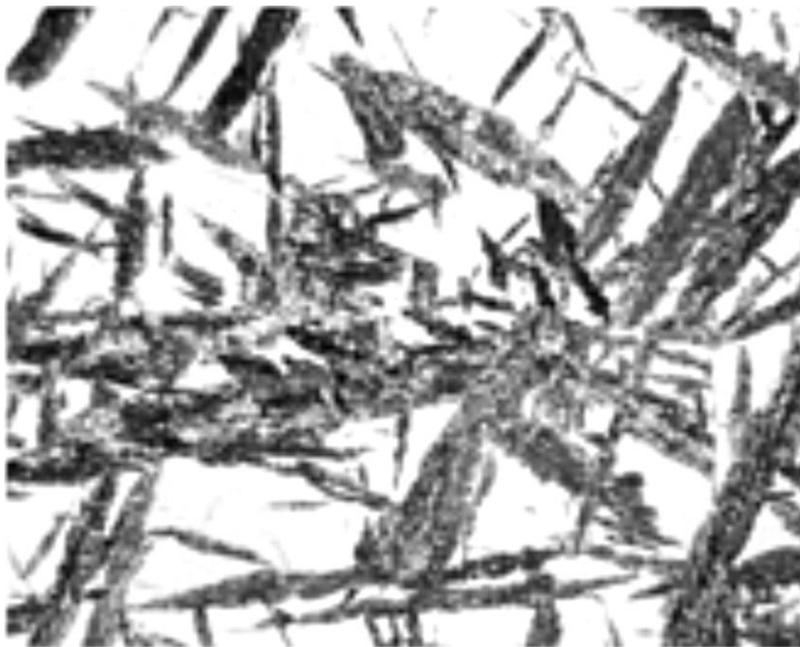


Fuente: APRAIZ BARREIRO, José. Tratamientos térmicos de los aceros. p.117.

3.2.6. Bainita

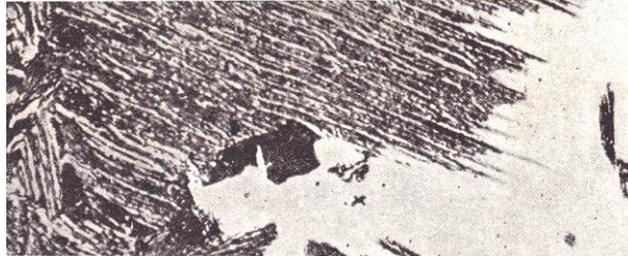
Microestructura que consta de las fases ferrita y Fe_3C en la que en su formación intervienen procesos de difusión. Su transformación depende del tiempo y de la temperatura en transformación isotérmica de la austenita. Existen dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente (figura 15) que difiere bastante de la bainita inferior (figura 14), formada a más baja temperatura con un aspecto acicular bastante parecido a la martensita. La dureza de la bainita varía desde 40 Rockwell-C para la bainita superior y hasta 60 Rockwell-C para la bainita inferior (Callister, Williams D., Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 1995).

Figura 14. **Acero SAE 1045; bainita inferior (agujas negras) en una matrix de martensita (blanca). Picral x 500**



Fuente: *Metals Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures*. p. 328.

Figura 15. **Bainita superior en un fondo blanco de martensita. x1500**



Fuente: APRAIZ BARREIRO, José. Tratamientos térmicos de los aceros. p.124.

3.3. **Curvas Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT)**

También conocidos como diagramas de transformación isotérmica (curvas IT). Son muy útiles para entender las transformaciones de un acero que se enfría isotérmicamente. En los aceros, y más concretamente para la fase Austenita, que es inestable debajo de la temperatura de transformación eutectoide, 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.

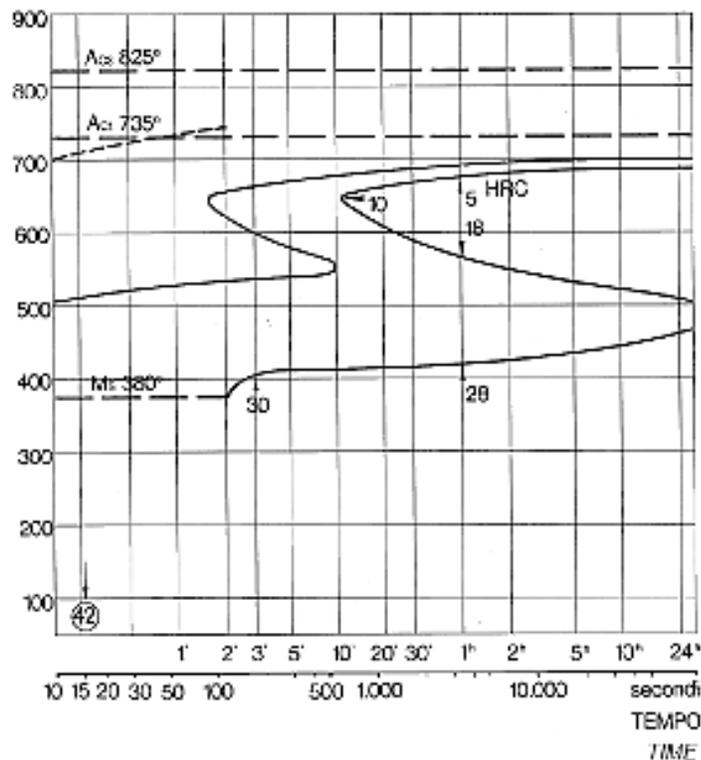
En las figuras 16 y 17 se presentan los diagramas TTT de los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y 16MnCr5; empleados en la parte experimental del presente trabajo; las líneas discontinuas A_{c1} y la A_{c3} son propias del diagrama hierro carbono, donde se indica la temperatura crítica inferior y superior respectivamente con variaciones por los elementos microaleantes propios de los aceros mencionados, recordando que toda transformación inicia a partir de la austenita (fase γ). La línea discontinua M_s indica la temperatura del inicio de la transformación de Martensita. La determinación de la temperatura del inicio

de la martensita va depender de los elementos aleantes en el acero. En el *Metals Handbook, Heat Treating*, 1998, se proponen las ecuaciones 18 y 19 para la determinación de dichas temperaturas.

$$Ms(^{\circ}C) = 512 - 453\%C - 16,9\%Ni + 15\%Cr - 9,5\%Mo + 217(\%C)^2 - 71,5(\%C)(\%Mn) - 67,6(\%C)(\%Cr) \quad (18)$$

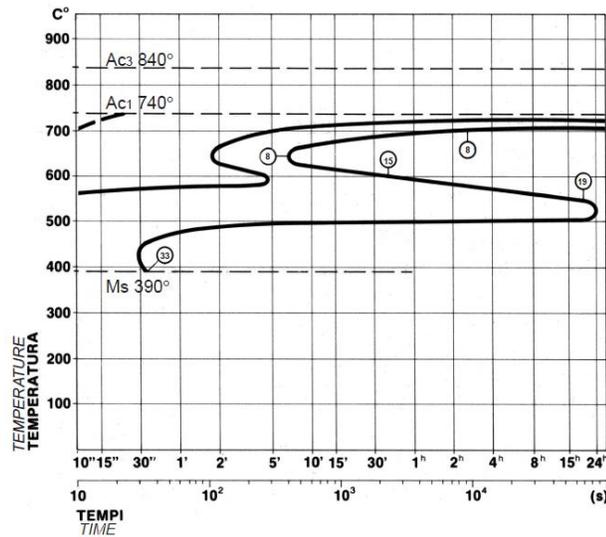
$$Ms(^{\circ}C) = 538 - 361\%C - 39\%Mn - 19\%Ni - 39\%Cr \quad (19)$$

Figura 16. **Diagrama Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT) del acero DIN 16CrNi4**



Fuente: [http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/\\$File/16NiCr4_UNI_10084.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/$File/16NiCr4_UNI_10084.pdf). Consultada 25 de noviembre 2012.

Figura 17. **Curvas Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT) del acero DIN 16MnCr5**



Fuente: [http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/\\$File/16MnCr5_UNI_10084.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/$File/16MnCr5_UNI_10084.pdf). Consultada 25 de noviembre 2012.

3.4. Diagrama de enfriamiento continuo (CCT)

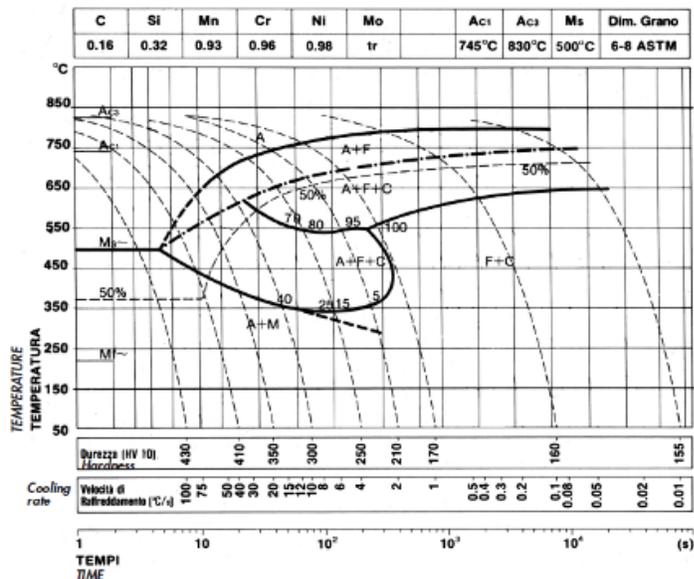
Los diagramas de enfriamiento isotérmico describen en forma didáctica las transformaciones asociadas a las diferentes temperaturas y tiempos, sin embargo, no se puede extraer de forma directa la información relativa a las transformaciones que se producen en enfriamientos continuos desde temperatura de austenización a diferentes velocidades.

Según de la geometría y tamaño de la pieza sometida a un enfriamiento desde la fase austenítica, ésta tendrá diferentes velocidades de enfriamiento en diferentes puntos de sus secciones. Para evaluar estos efectos de la mejor manera, se han desarrollado los diagramas de enfriamiento continuo (curvas

CCT) donde se observan análogamente a las curvas TTT, una representación de los inicios y términos de las transformaciones, pero esta vez en enfriamientos continuos.

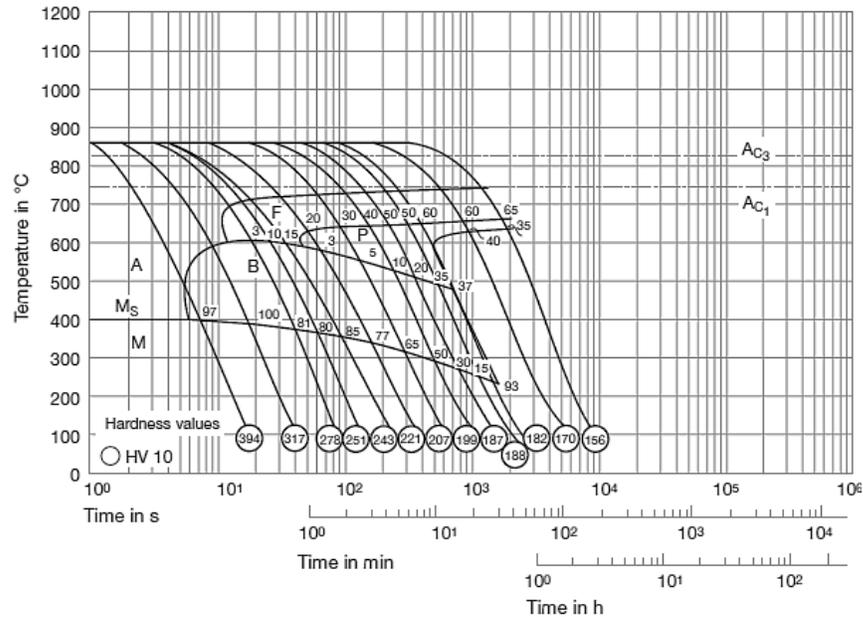
De esta manera se puede evaluar directamente la microestructura y por ende las propiedades obtenidas a diferentes velocidades de enfriamiento. En general, las curvas CCT se encuentran desplazadas hacia la derecha y hacia abajo con respecto a las curvas TTT y presentan formas algo más complicadas. En las figuras 18 y 19; se detallan las curvas CCT de los aceros utilizados en este trabajo.

Figura 18. **Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) del acero DIN 16CrNi4**



Fuente:[http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/\\$File/16NiCr4_UNI_10084.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/$File/16NiCr4_UNI_10084.pdf) Consultada 25 de noviembre 2012.

Figura 19. **Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) del acero DIN 16MnCr5**



Fuente: http://www.schmolz-bickenbach.co.za/fileadmin/files/schmolz-bickenbach.co.za/documents/carbodur_7131_uk_1_.pdf. Consultada 25 de noviembre 2012.

3.5. Tratamientos térmicos

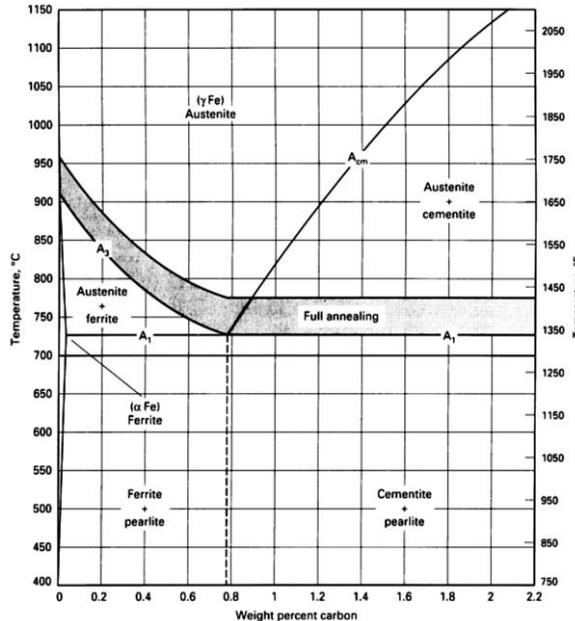
El tratamiento térmico consiste en calentar y mantener la pieza o herramienta de acero a una temperatura determinada durante un cierto tiempo hasta que se forme la estructura deseada (normalmente sobre A₃, fase Gamma) y luego enfriada a la velocidad conveniente. Los factores temperatura y tiempo tienen mucha importancia según el material, tamaño y forma de la pieza. Se consigue cambios de las microestructuras del acero con el objetivo de conseguir estructuras de mejor dureza, maquinabilidad, alivio de tensiones internas y estructuras homogéneas (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

3.5.1. Recocido

Existen diferentes recocidos para los distintos porcentajes de carbono en los aceros como también en el proceso de conformado llevado a cabo en cada una de éstas; el propósito del recocido consiste en ablandar y mejorar la maquinabilidad, eliminando la acritud o tensiones residuales, homogeneizando las microestructuras y mejorando la ductilidad.

Un ejemplo de recocido en los aceros, es el recocido completo con austenización completa (*full annealing*), que consiste en mantener a temperaturas sobre la crítica superior para los aceros hipoeutectoides, y sobre la crítica inferior para los aceros hipereutectoides (figura 20), con una velocidad de enfriamiento tal que permita la formación de ferrita y perlita gruesa; lo cual tiene relación con el diagrama TTT y CCT propia para cada acero (figura 22) (*Metals Handbook, Heat Treating*, 1998).

Figura 20. Diagrama de fases Fe-C, mostrando la región de temperatura para el recocido total



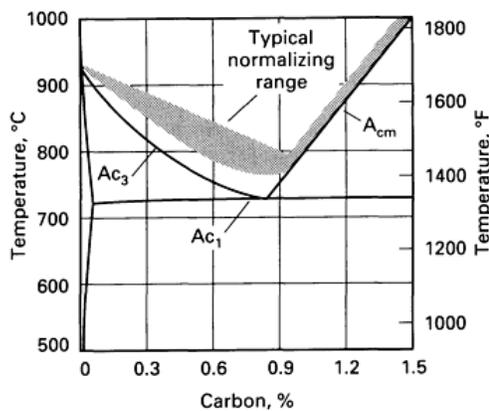
Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 109.

3.5.2. Normalizado

El normalizado se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares, sobrecalentamientos y en la eliminación de efectos en tratamientos anteriores, con el objetivo de reacondicionar estructuras heterogéneas o de gran tamaño antes de templear y también con el propósito de lograr un tamaño de grano fino de la austenita antes del temple. Esto se logra alcanzando usualmente no menos de 50 grados centígrados por encima de la temperatura crítica superior en aceros hipoeutectoides, y sobre la A_{cm} en aceros hipereutectoides (figura 21), con enfriamiento al aire inmediatamente después de lograr la homogeneidad de la austenita (Apraiz Barreiro, José, *Tratamientos térmicos de los aceros*, 1984).

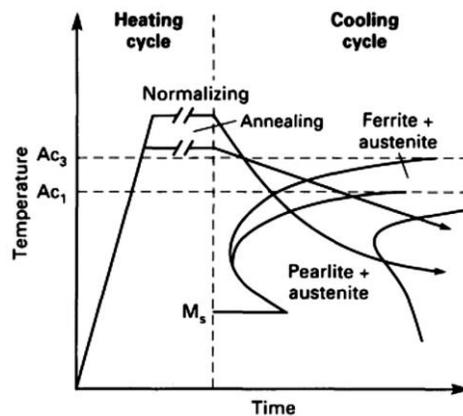
La velocidad de enfriamiento va depender de los elementos aleantes, que pueden proporcionar templabilidad al acero. La figura 22, muestra el ciclo de normalizado.

Figura 21. **Diagrama de fase Fe-C, mostrando el rango típico de normalizado**



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 87.

Figura 22. **Ciclos de normalizado y recocido total**



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 87.

3.5.3. Temple

Consiste en austenizar al acero total o parcialmente para luego enfriarlo a una velocidad suficientemente alta como para obtener una fracción volumétrica mayor al 50 por ciento de martensita en la estructura. La temperatura de austenización en los aceros varía entre 40 a 60 grados centígrados por sobre la temperatura crítica superior (A_3) y sobre la temperatura crítica inferior (A_1), para aceros hipoeutectoides e hipereutectoides respectivamente. La templabilidad es la capacidad de una aleación ferrosa de obtener martensita a partir de la austenita cuando ésta se enfría en condiciones definidas.

Está relacionada con la posición y forma de las curvas de transformación CCT de la aleación. El ensayo de templabilidad Jominy proporciona información con respecto a la templabilidad de la aleación ferrosa bajo diferentes medios de enfriamiento (Callister, Williams D., Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 1995).

Existe una variedad de medios para realizar temple. Según *Metals Handbook, Heat Treating*, 1998, se pueden agrupar del siguiente modo:

- Aceite que puede contener una variedad de aditivos
- Agua
- Soluciones acuosas de polímeros
- Agua que puede contener sales o aditivos acuosos
- Medios gaseosos (aire, gases inertes)

En este trabajo, el temple se realizó al aceite. La tabla II muestra las características del Aceite Thermic Oil que se utilizó para el temple de las probetas Charpy.

Tabla II. **Ficha técnica del aceite Thermic Oil**

Propiedades Típicas	Grado ISO 20
Gravedad API°	32,60
Gravedad Específica	0,86
Punto de Inflamación °C	206,00
Punto de Fluidez °C	-18,00
Viscosidad @ 40°C cSt	20,75
Viscosidad @ 100°C cSt	4,80
Indice de Viscosidad	103,00

Fuente: Proveedor. Luval, Valvoline en Chile.

3.5.3.1. Homogeneidad de la austenita

Si bien al momento de calentar un acero hipoeutectoide y cruzar la línea A_3 , parte de la austenita contendrá un aproximado de 0,8 por ciento de carbono producto de la perlita al momento de cruzar la línea A_1 y otra parte contendrá muy poco carbono producto de la ferrita proeutectoide. El total de granos de austenita no será uniforme en contenido de carbono.

Al templar los granos de austenita con menos carbono, tendrán una mayor rapidez crítica de enfriamiento y tenderán a transformar estructuras no martensíticas, mientras tanto aquellos granos más ricos en contenido de carbono, con una menor rapidez crítica de enfriamiento tenderán a formar martensita. Como resultado se obtendrá una microestructura con dureza no uniforme (Sidney H., Avner, Introducción a la metalurgia física, 1988).

La no uniformidad se puede evitar con calentamientos lentos y ciertos rangos de permanencia a temperaturas de austenización, para que suceda la difusión del carbono y obtener homogeneidad en los granos de austenita.

Según Sidney H., Avner, 1988, recomienda que el material se mantenga durante una hora a la temperatura de austenización por cada pulgada de espesor o de diámetro. En la experiencia otros, aplican y recomiendan media hora adicional por cada pulgada de sección extra. En muchos casos, estas reglas resultan en excesivos tiempos de austenización y no se aplican.

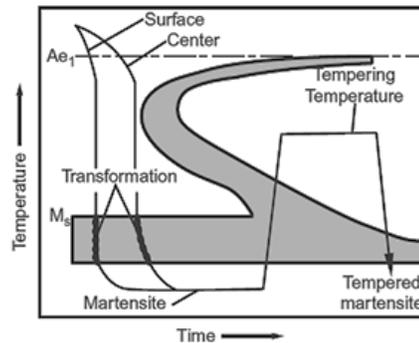
El tiempo de austenización está influenciado por el contenido de elementos aleantes del acero.

3.5.4. Revenido

Tratamiento térmico que se aplica luego del temple con el objeto de aumentar la ductilidad y tenacidad de la martensita, disminuyendo su dureza y las tensiones residuales ocasionadas por el temple. La temperatura y el tiempo varían de acuerdo a las propiedades finales deseadas; el rango de temperatura es de 150 grados centígrados hasta una temperatura cercana a la temperatura crítica inferior (A_1), evitando realizar el revenido entre 250 y 500 grados centígrados, que es una zona conocida como fragilidad de revenido, como se observa en la figura 23.

Los tiempos normales de permanencia van desde 30 minutos hasta 4 horas. Usualmente el acero es enfriado al aire calmo, excepto cuando se desee disminuir las tensiones residuales que surgen del enfriamiento (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

Figura 23. **Diagrama esquemático de transformación para método de temple y revenido convencional**



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 325.

3.6. Tratamientos térmicos superficiales

En la industria existen diferentes partes mecánicas como engranajes, piñones de ataque, árboles de levas, barras de torsión, pasadores de pistones, etc., que necesitan de una superficie externa que soporte el desgaste con alta resistencia mecánica, y a su vez su interior, soporte momentos torcionantes. Se necesita elementos con una capa superficial dura y un núcleo interno tenaz.

Los métodos principales de tratamientos térmicos superficiales comúnmente utilizados son:

- Cementación ó carburación
- Nitruración
- Cianuración o carbonitruración
- Endurecimiento por inducción
- Endurecimiento por flama

3.6.1. Cementación

La cementación consiste en aumentar el contenido de carbono en la superficie de las piezas de acero, manteniendo la pieza, en un medio carburante, durante el tiempo necesario a la temperatura de austenización.

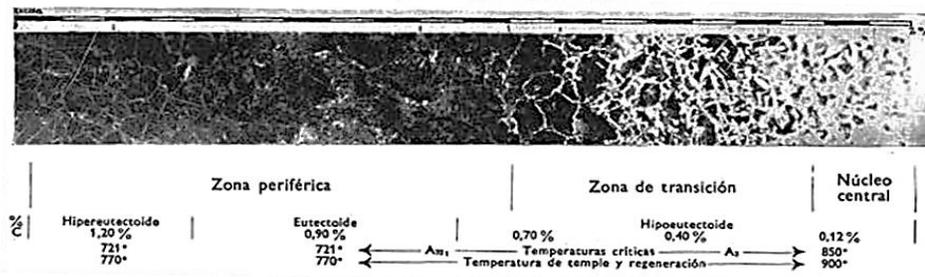
Normalmente, a continuación de la carburización, el enfriamiento debe ser gradual, a velocidades intermedias entre recocido y normalizado, evitando así la fractura de la capa cementada por shock térmico. Luego la pieza cementada debe ser nuevamente elevada a la temperatura de austenización con lo cual se logra la recristalización del grano que creció en exceso durante la cementación prolongada. Posterior a este proceso es factible temple sin mayores riesgos de fisuras en la capa cementada, considerando la temperatura de temple la adecuada al contenido medio de la capa cementada.

Existen diferentes tipos de cementación, según el material utilizado; sólido, líquido y gaseoso. La temperatura, la duración de cementación y el espesor requerido dependerán de la mezcla grafito y carburante utilizado, el cual posee catalizadores para mejorar el proceso de carburación.

Los aceros utilizados para la cementación deben poseer un contenido bajo en carbono de preferencia menor a 0,20 por ciento. Los más recurrentes en la actualidad son los aceros de baja y media aleación con contenidos entre 0,10 y 0,15 por ciento de carbono por tener mejores características de templabilidad en comparación a los aceros al carbono. La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850 y 1 000 grados centígrados (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

Apraiz, 1984, menciona: la cantidad y distribución del carbono absorbido por las piezas dependen: 1º de la composición del acero sometido a la cementación, 2º de la naturaleza de la sustancia cementante, y 3º de la temperatura de la duración de la cementación. En donde la pieza después de cementada se puede considerar compuesta por dos zonas principales de composición química diferente; el alma o núcleo central y la periferia o capa cementada, existente entre ellas una tercera zona de transición de menor importancia (figura 24).

Figura 24. **Cementación a 925 °C con 60% de carbón de madera y 40% de carbonato de bario durante 10 horas, de un acero de 0,12% de carbono**



Fuente: APRAIZ BARREIRO, José. Tratamientos térmicos de los aceros. p. 323.

De esta manera, se obtendrán distintas transformaciones de fases, sabiendo que cada microestructura nueva formada, posee cierta característica física propia que ayudará a alcanzar la dureza requerida en la periferia y la alta tenacidad en el núcleo. Para proceder al temple, se debe tener el cuidado de seleccionar la temperatura de austenización apropiada por tener distintos contenidos de carbono a lo largo de la capa cementada la cual tiene que favorecer a las dos zonas (núcleo y capa cementada). Esto último se logra recurriendo al auxilio del diagrama Fe-C.

3.6.1.1. Capa cementada

Es la zona superficial de un componente, que cambia de morfología después de la cementación con lo cual el contenido de carbono es superior a la del acero en estado de suministro. Posterior al temple y revenido, se forma una capa dura en la zona superficial, superior a la del núcleo; con una dureza alrededor de 58-60 Rockwell-C, con un contenido de carbono de 0,50-0,80 por ciento, pudiendo alcanzar en la superficie misma contenidos de 1,0 a 1,2 por ciento de carbono.

Cuando el contenido en carbono de la zona periférica es superior a la composición eutectoide de 0,90 por ciento de carbono, suelen aparecer redes de cementita (figura 24), o de carburos que pueden hacer frágil a la capa cementada y con tendencia a descascarillarse. En estos casos conviene dar a las piezas, después de la cementación, un recocido de difusión a 800-900 grados centígrados en una atmósfera o baño apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se uniformiza bastante el contenido en carbono y se evitan posibles desconchamientos en las piezas cementadas (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

3.6.1.2. Proceso de cementación con materiales sólidos

La difusión del carbono en el acero, sucede por medio de los gases que se desprenden al elevar la mezcla cementante a la temperatura de austenización, obteniendo monóxido de carbono como principal agente carburante.

El carbón a elevada temperatura, en contacto con el oxígeno del aire que hay siempre en el interior de las cajas, entre los huecos que deja la materia cementante, da monóxido de carbono (CO) según la siguiente reacción:



Luego el monóxido de carbono formado se descompone a elevada temperatura en carbono naciente y dióxido de carbono.

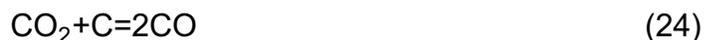


En todos los casos el carbono naciente que se forma es el que produce la cementación. Al estar en contacto con el hierro a alta temperatura, se combina el carbono con el hierro α para formar carburo de hierro ó cementita.



Es cuando puede decirse que se produce verdaderamente la cementación. Para que suceda la difusión del carbono en el acero, éste tiene que alcanzar temperaturas de austenización, en otras palabras se requiere formar hierro gamma (Fe γ) para que el acero pueda absorber hasta 1,4 a 1,7 por ciento de carbono aproximadamente.

Los carbonatos, que se emplean mezclados con el carbón vegetal, aceleran la penetración del carbono naciente, que es el verdadero agente carburante, al facilitar la formación de óxido de carbono:



El CO producido se descompone en todos los casos, produciéndose carbono naciente $2CO=C+CO_2$ y el BaO producido reacciona con el CO_2 obteniéndose nuevamente $BaCO_3$ (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

Entre los energizantes o catalizadores para la formación de monóxido de carbono que hace referencia el *Metals Handbook, Heat Treating*, 1998, se encuentran los siguientes carbonatos: carbonato de bario ($BaCO_3$), carbonato de calcio ($CaCO_3$), carbonato de potasio (K_2CO_3), y carbonato de sodio (Na_2CO_3), que están presentes en el compuesto de cementación.

Para la elaboración del presente trabajo se preparó la mezcla carburante referida en la tabla III.

Tabla III. **Compuestos de mezcla carburante**

Carburantes	%
Na_2CO_3	4,6
$CaCO_3$	4,6
$BaCO_3$	14,5
Carbón Vegetal	76,3

Fuente: elaboración propia.

3.6.2. Características de los aceros para cementación

En el mercado actual, los aceros se pueden clasificar como aceros al carbono, aceros de baja aleación y aceros de alta aleación.

3.6.2.1. Aceros al carbono

La composición química básica de los aceros al carbono está formada por Fe, C, Mn y Si, acompañadas de ciertas impurezas indeseadas, como lo son P y S entre otras, cuyo contenido en peso en la práctica no debe exceder al 0,03 por ciento. Después de la cementación y temple posterior, se puede alcanzar durezas superiores a 60 Rockwell-C, según el medio templante utilizado. Estos aceros tienen el inconveniente de que cuando se trata de piezas de formas complejas, las deformaciones pueden ser importantes.

Por lo general, en el acero al carbono en la cementación, el crecimiento de grano es mayor que en los aceros aleados, por lo cual es necesario cuidar bien los tratamientos de regeneración que suelen darse después de la cementación.

3.6.2.2. Aceros de baja aleación

En los aceros de baja aleación, los elementos aleantes (Cr, Ni, Mo, Mn), no deben exceder del 5 por ciento de contenido en peso. Entre ellos se encuentran los aceros cromo-molibdeno con Cr=1 por ciento, Mo=0,20 por ciento y C=0,14 por ciento y también los de la misma aleación y más elevado porcentaje de carbono. En la actualidad son cada día más utilizados los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de elemento aleado, cromo-níquel-molibdeno, con porcentajes de carbono variables desde 0,10 a 0,25 por ciento y contenidos en Cr=0,35 a 1 por ciento, Ni=0,35 a 1,5 por ciento y Mo=0,15 a 0,40 por ciento.

De todos estos aceros los de más elevada aleación ó piezas grandes, se suelen temprar en aceite y los de menos aleación ó piezas pequeñas, en agua (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

3.6.2.3. Aceros de alta aleación

En los aceros de alta aleación, los elementos aleantes normalmente exceden el 5 por ciento de contenido en peso. A este grupo pertenecen los aceros al níquel, de C=0,10 a 0,20 por ciento y Ni=3 a 5 por ciento. También son muy utilizados para estos usos, los aceros cromo-níquel con C=0,10 a 0,20 por ciento; Cr=0,75 por ciento y Ni=3 por ciento. Para piezas de aviones y motores de aviación y piezas de alta resistencia y gran tamaño son muy empleados los aceros cromo-níquel-molibdeno con los mismos o parecidos porcentajes de carbono (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

3.6.3. Influencia de los elementos aleantes

Se observa que el níquel y el silicio tienden a retardar la penetración y distribución del carbono en el interior del acero, y en cambio los elementos formadores de carburos, como el cromo, molibdeno y además el manganeso, la aceleran.

El níquel, retarda la transformación de la austenita en martensita, mejora la tenacidad y la resistencia; baja las temperaturas críticas en los aceros.

El cromo aumenta la dureza y resistencia al desgaste.

El manganeso, mejora la templabilidad y baja las temperaturas críticas en los aceros.

El molibdeno mejora la templabilidad y la resistencia al desgaste.

La combinación de níquel y del cromo en los aceros, proporcionan gran tenacidad, dureza, y resistencia al desgaste, añadiendo además molibdeno se mejora notablemente la templabilidad y resistencia mecánica (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

3.6.4. Ciclos térmicos para la capa cementada

Existen diferentes metodologías para la aplicación del temple y revenido, posterior a la formación de capa cementada en las piezas de acero. Es de mucha importancia la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenización, de donde surge la óptima difusión del carbono en el hierro. El criterio de la velocidad de enfriamiento va a depender del tamaño de la pieza y de los elementos aleantes contenidos en el acero. En los aceros de alta aleación no se recomienda realizar temple directo, dado que hay más probabilidades que quede la capa cementada con mucha austenita retenida lo que provocaría una disminución en la dureza superficial.

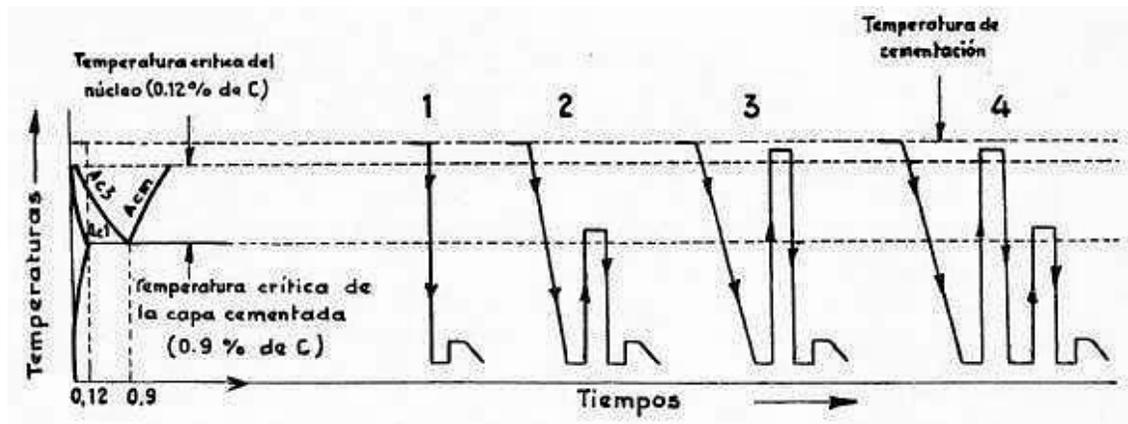
Recordar que el crecimiento de grano aumenta conforme al tiempo de permanencia y/o con el aumento de temperatura en la zona de austenizado. Entre más grueso sea el grano, existe mayor fragilidad y disminución en la tenacidad, mientras que en grano fino, se alcanza mayor tenacidad. Es por ello que la regeneración del grano es de vital importancia.

Apraiz, 1984, clasifica los ciclos térmicos que se pueden aplicar a la capa cementada de la siguiente manera, como se observan en la figura 25:

- Cementación, temple directo desde la temperatura de cementación y revenido final.

- Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura intermedia entre A_{c1} y A_{c3} y revenido final.
- Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} y revenido final.
- Cementación, enfriamiento lento, primer temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} segundo temple a temperatura ligeramente superior a A_{c1} y revenido final.

Figura 25. **Clases de tratamientos térmicos que se pueden dar a las piezas cementadas**



Fuente: APRAIZ BARREIRO, José. Tratamientos térmicos de los aceros. p. 355.

4. DIFUSIÓN

El fenómeno de la cementación, se da por un mecanismo de movimiento atómico denominado “difusión”, que consiste en la migración de átomos desde un estado químicamente estable hacia un material en estado sólido, bajo condiciones termodinámicamente propicias, cambiando las condiciones de concentración del soluto en este último, con fines de mejorar sus condiciones de resistencia mecánica (Aguilar Rivas, Roberto Alejandro, manuscrito, 2012).

La difusión es el movimiento de los átomos en un material. Los átomos se mueven de una manera predecible, tratando de eliminar diferencias de concentración y de producir una composición homogénea y uniforme (Askeland, Donald R., Ciencia e ingeniería de los materiales, 1998). El transporte de masa en gases y líquidos se origina generalmente debido a una combinación de convección (movilización de fluido) y difusión. En los sólidos no se produce la convección, por lo cual, la difusión es generalmente el único mecanismo disponible de transporte de masa; desde luego, es un mecanismo importante para el control de muchos procesos físicos de interés (Verhoeven, John D., Fundamentos de metalurgia física, 1987).

4.1. Mecanismo de difusión

Los átomos cambian rápidamente de posición, cuando se trata de materiales sólidos; y es necesario que se den dos condiciones; la primera es que exista un lugar vecino vacío y la segunda es que el átomo debe tener la energía suficiente como para romper los enlaces con los átomos vecinos y desplazarse a la nueva posición distorsionando la red. La energía en este caso

es de tipo vibracional (cada átomo vibra rápidamente alrededor de su posición reticular, no vibrando todos con la misma frecuencia ni con la misma energía). A una temperatura determinada un pequeño número de átomos tienen la energía suficiente para difundir, aumentando la temperatura (Askeland, Donald R., Ciencia e ingeniería de los materiales, 1998).

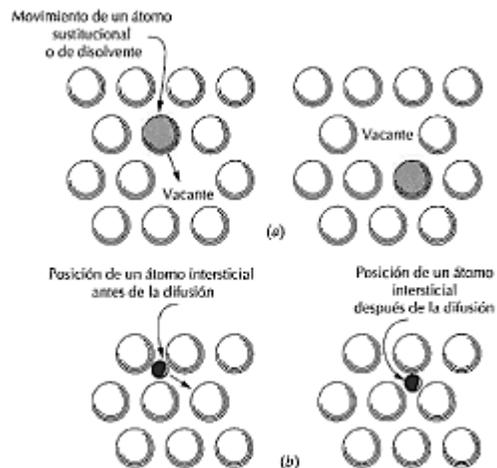
4.1.1. Difusión por vacancia

Mecanismo de difusión que implica el cambio de un átomo desde una posición reticular normal a una vacante o lugar reticular vecino vacío. La posibilidad de la difusión por vacantes dependerá del número de defectos que existan y como éstos aumentan con la temperatura, a mayor temperatura más rápido será el mecanismo de difusión. La autodifusión y la interdifusión ocurren por este mecanismo; en la interdifusión los átomos de soluto sustituyen a los del disolvente (Callister, Williams D., Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 1995).

4.1.2. Difusión intersticial

Implica que átomos que van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada. El mecanismo tiene lugar por interdifusión de solutos tales como el hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que tienen átomos pequeños idóneos para ocupar posiciones intersticiales. Los átomos de soluto sustitucionales raramente ocupan posiciones intersticiales y no difunden por este mecanismo. Los átomos más pequeños tienen mayor movilidad y ocupan posiciones intersticiales, de los cuales hay más que posiciones vacantes (figura 26). La probabilidad del movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes (Callister, Williams D., Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 1995).

Figura 26. Esquema de difusión (a) por vacantes y (b) intersticial



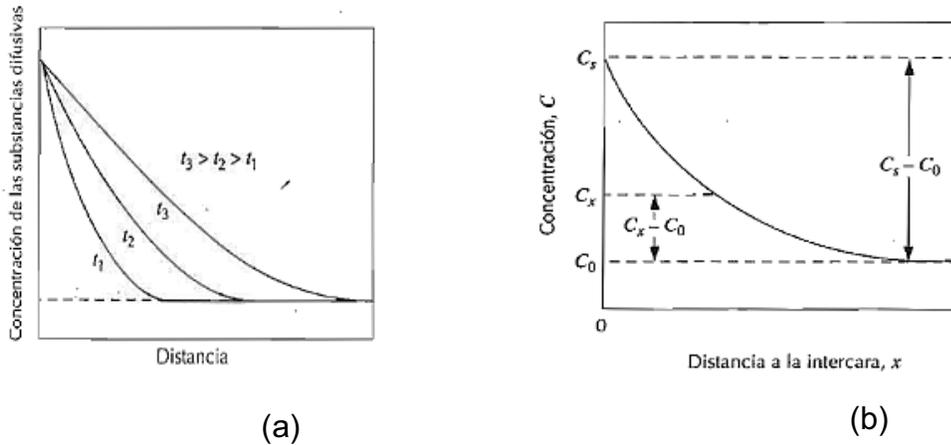
Fuente: CALLISTER, Williams D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. p. 98.

4.2. Difusión en estado no estacionario

En la práctica la mayoría de difusión es en estado no estacionario. En la zona determinada del sólido, el flujo de difusión y el gradiente de difusión varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden. En la figura 27a muestra perfiles de concentraciones de tres tiempos de difusión diferentes. En condiciones no estacionarias se utiliza la segunda ley de Fick, que describe el estado dinámico de la difusión de los átomos, descrita por la ecuación de derivadas parciales. (Callister, Williams D., Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 1995).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (25)$$

Figura 27. **Perfil de concentración para la difusión en estado no estacionario**



Fuente: CALLISTER, Williams D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. p. 101 y 102.

Aplicando las condiciones límites a la ecuación de derivadas parciales de la segunda ley de Fick⁴, la solución es:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{ferr} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (26)$$

Donde:

C_x = concentración a la distancia x después del tiempo t

C_0 = concentración inicial del material

C_s = concentración superficial

D = coeficiente de difusión

x = profundidad de la sustancia difusiva

t = tiempo de difusión

⁴ Desarrollo de hipótesis y condiciones límite, para la solución de la Segunda ley de Fick, consultar CALLISTER, Williams D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales p. 101.

$ferr(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})$ = función de error gaussiana. En la tabla IV se muestran varios valores de $\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \beta$.

Tabla IV. Tabulación de la función error ($ferr(\beta)$) para diferentes valores de β desde 0 hasta 2,7

β	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.0000	0.0113	0.0226	0.0338	0.0451	0.0564	0.0676	0.0789	0.0901	0.1013
0.1	0.1125	0.1236	0.1348	0.1459	0.1569	0.1680	0.1790	0.1900	0.2009	0.2118
0.2	0.2227	0.2335	0.2443	0.2550	0.2657	0.2763	0.2869	0.2974	0.3079	0.3183
0.3	0.3286	0.3389	0.3491	0.3593	0.3694	0.3794	0.3893	0.3992	0.4090	0.4187
0.4	0.4284	0.4380	0.4475	0.4569	0.4662	0.4755	0.4847	0.4937	0.5027	0.5117
0.5	0.5205	0.5292	0.5379	0.5465	0.5549	0.5633	0.5716	0.5798	0.5879	0.5959
0.6	0.6039	0.6117	0.6194	0.6270	0.6346	0.6420	0.6494	0.6566	0.6638	0.6708
0.7	0.6778	0.6847	0.6914	0.6981	0.7047	0.7112	0.7175	0.7238	0.7300	0.7361
0.8	0.7421	0.7480	0.7538	0.7595	0.7651	0.7707	0.7761	0.7814	0.7867	0.7918
0.9	0.7969	0.8019	0.8068	0.8116	0.8163	0.8209	0.8254	0.8299	0.8342	0.8385
1.0	0.8427	0.8468	0.8508	0.8548	0.8586	0.8624	0.8661	0.8698	0.8733	0.8768
1.1	0.8802	0.8835	0.8868	0.8900	0.8931	0.8961	0.8991	0.9020	0.9048	0.9076
1.2	0.9103	0.9130	0.9155	0.9181	0.9205	0.9229	0.9252	0.9275	0.9297	0.9319
1.3	0.9340	0.9361	0.9381	0.9400	0.9419	0.9438	0.9456	0.9473	0.9490	0.9507
1.4	0.9523	0.9539	0.9554	0.9569	0.9583	0.9597	0.9611	0.9624	0.9637	0.9649
1.5	0.9661	0.9673	0.9684	0.9695	0.9706	0.9716	0.9726	0.9736	0.9745	0.9755
	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.9	2.0	2.2	2.7
	0.9716	0.9763	0.9804	0.9838	0.9867	0.9891	0.9928	0.9953	0.9981	0.9999

Fuente: VERHOEVEN, John D. Fundamentos de metalurgia física. p. 163.

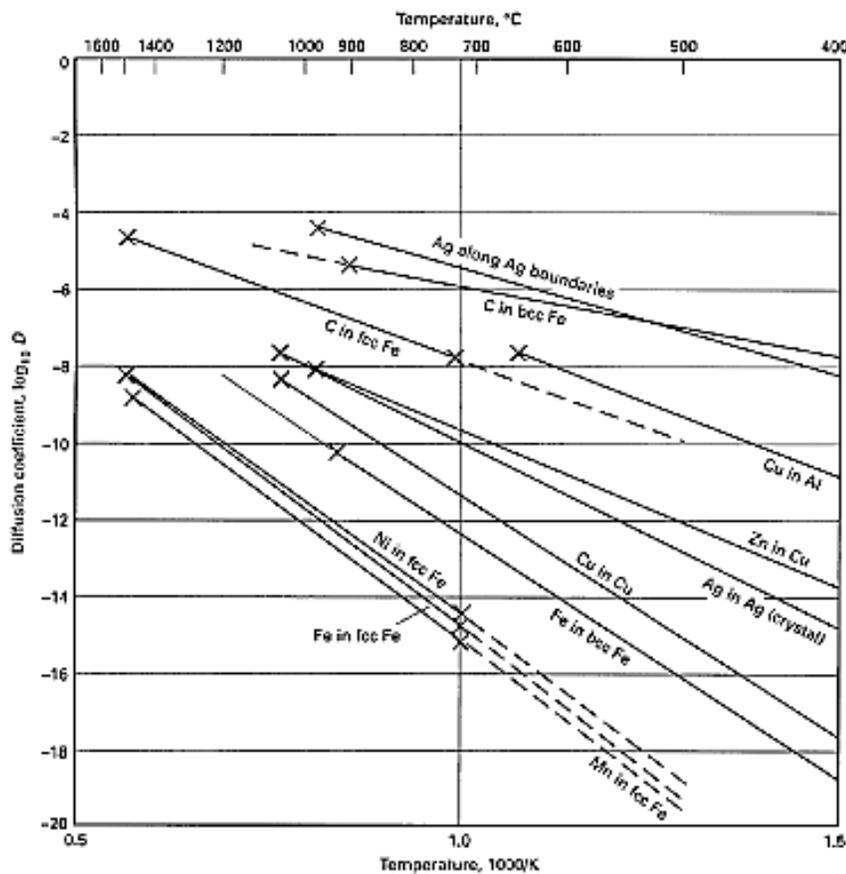
La dependencia del coeficiente de difusión D con respecto a la temperatura para varios metales se ilustra en la figura 28.

Cuando se incrementa la temperatura de un material, también se incrementa el coeficiente de difusión y el flujo de átomos. A temperaturas más altas, la energía térmica suministrada a los átomos en difusión permite que éstos venzan la barrera de energía de activación y se muevan con mayor facilidad a nuevos sitios en la red.

Cabe mencionar que en la figura 28 los valores de las ordenadas corresponden a $\log_{10}D$ y para obtener el valor propio de D, se debe colocar la base de la potencia que en este caso sería 10 por ser la base del logaritmo, elevado por el valor de la ordenada. Las dimensionales de estos resultados serán centímetros cuadrados por segundo.

$$D=10^{(\text{valor de la ordenada})} \quad (27)$$

Figura 28. **Logaritmos de los coeficientes de difusión frente al recíproco de la temperatura absoluta para varios metales**



Fuente: *Metals Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 1833.

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS EN ESTUDIO

A continuación se presenta las especificaciones técnicas para los aceros DIN 16MnCr y DIN 16CrNi4, según ThyssenKrupp Aceros y Servicios, de los aceros en estudio para este proyecto.

Tabla V. **Ficha técnica de los aceros**

DIN	AISI/SAE equivalente	No.de Colada	Medidas de la barra
16MnCr5	5115	320438	100x100 mm
16CrNi4	3215	32679	100x100 mm

Fuente: Proveedor. ThyssenKrupp Aceros y Servicios en Chile.

- Composición química

Tabla VI. **Composición química**

Acero	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Al	%Cu	%Mo	%V
16MnCr5	0,18	0,28	1,11	0,017	0,021	0,88	0,12	0,027	0,27	0,02	-----
16CrNi4	0,14	0,23	0,84	0,011	0,024	0,93	0,88	0,014	0,24	0,05	0,005

Fuente: Proveedor. ThyssenKrupp Aceros y Servicios en Chile.

- Propiedades mecánicas

Tabla VII. **Propiedades mecánicas**

Acero	Resistencia max. a la tracción [MPa]	% Elong. [%]	Resistencia a la fluencia [MPa]	Red. de Área [%]
16MnCr5	558	30	355	67
16CrNi4	1254	11,2	1017	55

Fuente: Proveedor. ThyssenKrupp Aceros y Servicios en Chile.

- Características

Tabla VIII. **Características**

DIN 16MnCr5	DIN 16CrNi4
Aceros de cementación aleada al cromo-manganeso de uso universal utilizado en piezas sometidas a medianas sollicitaciones mecánicas que requieran una superficie dura y un núcleo tenaz. Acero apto para el temple directo. Producto laminado en caliente y recocado.	Acero aleado utilizado en aquellas piezas en que se requiere una superficie dura y un núcleo tenaz. Se recomienda su uso en aplicaciones donde las sollicitaciones sean moderadas. Producto laminado en caliente y recocado.

Fuente: Proveedor. ThyssenKrupp Aceros y Servicios en Chile.

- Aplicaciones

Tabla IX. **Aplicaciones**

DIN 16MnCr5	DIN 16CrNi4
Componentes de ingeniería mecánica tales como: piñones, árboles de levas, cuerpo de válvulas, engranajes, pasadores, etc.	Usado en la fabricación de engranajes, piñones de ataque, arboles de levas, pins, cuerpos de válvulas, barras de torsión, pasadores de pistones, engranajes etc.

Fuente: Proveedor. ThyssenKrupp Aceros y Servicios en Chile.

- Especificaciones de tratamientos térmicos

Tabla X. **Tratamiento térmico**

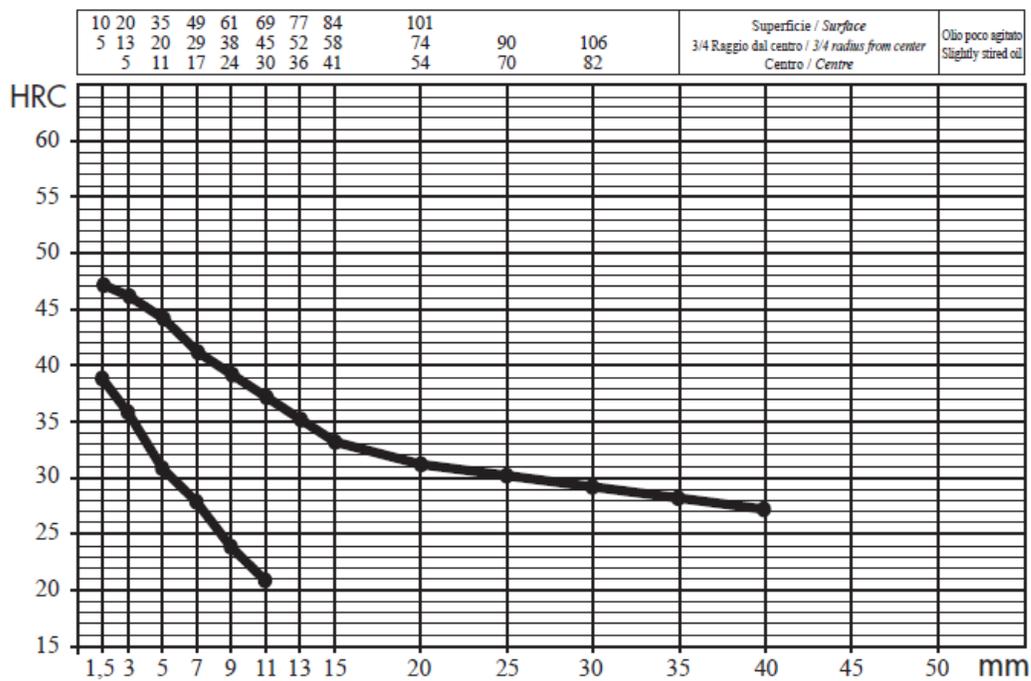
Tipo de Acero	Tipo de Tratamiento	T (°C)	Medio de enfriamiento
16MnCr5	Recocido	650-700	
	Cementación	880-980	Aceite(agua),baño caliente 160-250°C
	Temple Directo	880- 980	Aceite(agua),baño caliente 160-250°C
	Temple en el núcleo	860-900	Aceite(agua),baño caliente 160-250°C
	Temple del borde	780-820	Aceite(agua),baño caliente 160-250°C
	Revenido	150-200	Aire
16CrNi4	Recocido	650-700	Enfriar al aire o dentro del horno
	Cementación	900-950	Enfriar lentamente al aire
	Temple	830-900	Aceite o en sales
	Revenido	150-200	Aire

Fuente: Proveedor. ThyssenKrupp Aceros y Servicios en Chile.

5.1. Diagrama de templabilidad

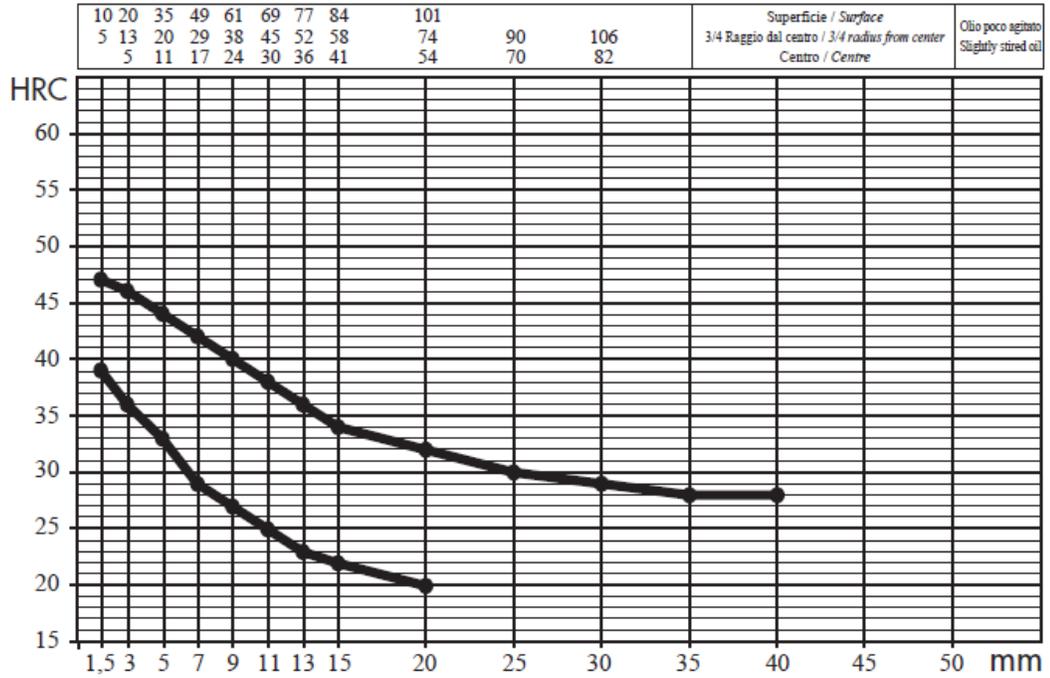
Las figuras 29 y 30, muestran los diagramas de templabilidad para los dos aceros (cementables) en estudio, obtenidos a partir del ensayo Jominy. Comparativamente, se observa que el acero DIN16CrNi4 exhibe una leve templabilidad superior respecto del Acero DIN 16MnCr5, a iguales distancias de profundidad, atribuibles al contenido de cromo y mayor contenido de níquel.

Figura 29. Diagrama de templabilidad del acero DIN 16MnCr5



Fuente: [http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/\\$File/16MnCr5_UNI_10084.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/$File/16MnCr5_UNI_10084.pdf). Consultada 25 de noviembre 2012.

Figura 30. Diagrama de templabilidad del acero DIN 16CrNi4



Fuente: [http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/\\$File/16NiCr4_UNI_10084.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5RQMFR/$File/16NiCr4_UNI_10084.pdf). Consultada 25 de noviembre 2012.

6. MATERIALES Y MÉTODO EXPERIMENTAL

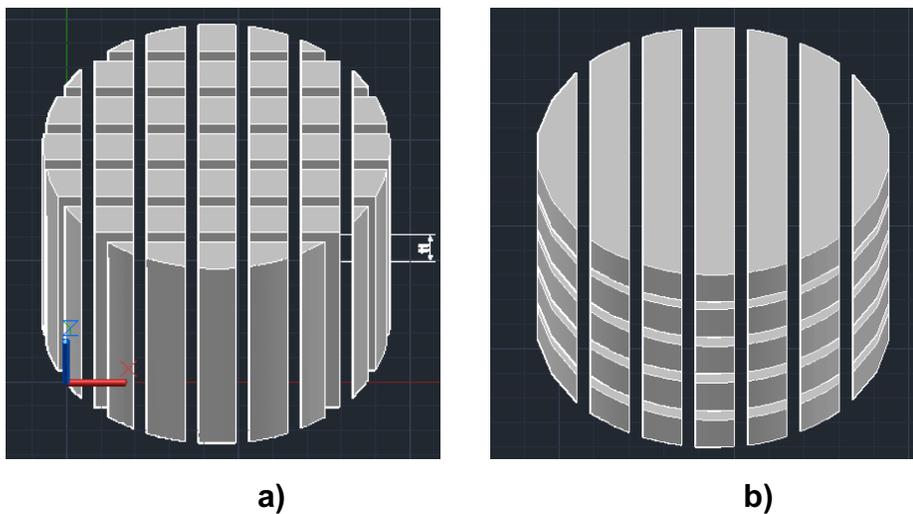
De acuerdo a los objetivos planteados en este estudio, se pretende comparar dos aceros de baja aleación, estructurales, utilizados en componentes mecánicos, los cuales mediante tratamientos térmicos de cementación-temple y revenido deben poseer una alta resistencia mecánica superficial, resistente al desgaste y un núcleo tenaz para soportar cargas de impactos. Los aceros seleccionados de procedencia Thyssen y codificados como DIN 16CrNi4 y 16MnCr5, poseen características mecánicas y químicas similares que se estudiaron exhaustivamente para mostrar las diferencias importantes que influyen en las propiedades metalográficas y la respuesta de éstos frente a las sollicitaciones mecánicas y de uso al que son normalmente expuestos.

Ambos pueden ser sometidos a Tratamientos Térmicos de cementación-temple y revenido para ser usados como material de engranajes, donde las zonas de mayor susceptibilidad al agrietamiento e inicio de fractura son las zonas del pie del diente. En particular, la curvatura y radio del pie del diente deben cumplir rigurosamente las especificaciones de ángulos, radio curvatura etc., para no constituir una microfisura causal de la fractura del engranaje.

Los aceros para este estudio, se adquirieron como trozos de barra de 4 pulgadas de diámetro ó espesor (100 milímetros), de los cuales se extrajeron y mecanizaron las probetas, como se muestra en la figura 31. Como la probeta Charpy con entalla en V, simula adecuadamente la curvatura y el Radio del pie entre los dientes de los engranajes, es que se determinó utilizar esta probeta estándar como la probeta base para todos los ensayos y análisis a realizar en la evaluación de los aceros. Para ello, se modificó el largo de la probeta Charpy

en un extremo de manera de poder obtener de ese extremo las probetas para el análisis metalográfico, ensayo dureza, etc.

Figura 31. **Simulación de mecanizado de probetas en trozo de barra**



Probeta Charpy mecanizada con orientación (a) longitudinal y (b) transversal.

Fuente: elaboración propia.

Previo a la extracción de probetas, con la finalidad de descartar la presencia de segregación química central de las barras que pudiesen inducir la obtención de resultados erróneos para los diferentes análisis y ensayos, se realizó el análisis químico de los elementos y los contenidos de microaleantes mediante espectrometría de emisión óptica (figura 32), en dos zonas diferentes; cercanas al borde y el núcleo. Los resultados obtenidos para ambas barras de acero se muestran en tabla XI. Se incluye la composición acorde a especificación DIN proporcionados por el proveedor, para los dos aceros. Los resultados indican que existe bastante homogeneidad química entre ambas zonas de análisis lo que permitió corroborar la homogeneidad de los aceros.

Figura 32. Espectrómetro de emisión óptica, SPECTRO-MAXx



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Tabla XI. Resultados de análisis químico para los aceros 16MnCr5 y 16CrNi4

Elemento	16MnCr5				16CrNi4			
	Zona 1 ⁵	Zona 2	Promedio	DIN	Zona 1	Zona 2	Promedio	DIN
%C	0,208	0,225	0,217	0,180	0,188	0,193	0,191	0,145
%Si	0,311	0,316	0,314	0,280	0,238	0,253	0,246	0,230
%Mn	1,110	1,100	1,105	1,110	0,833	0,834	0,834	0,840
%P	0,010	0,011	0,010	0,017	0,007	0,006	0,006	0,011
%S	0,020	0,023	0,021	0,021	0,029	0,027	0,028	0,024
%Cr	0,889	0,883	0,886	0,880	0,958	0,949	0,954	0,930
%Ni	0,118	0,118	0,118	0,120	0,945	0,952	0,949	0,880
%Al	0,024	0,026	0,025	0,027	0,014	0,014	0,014	0,014
%Cu	0,267	0,266	0,267	0,270	0,254	0,254	0,254	0,240
%Mo	0,007	0,008	0,007	0,020	0,040	0,040	0,040	0,050
%V	0,003	0,003	0,003	-----	0,005	0,005	0,005	0,005

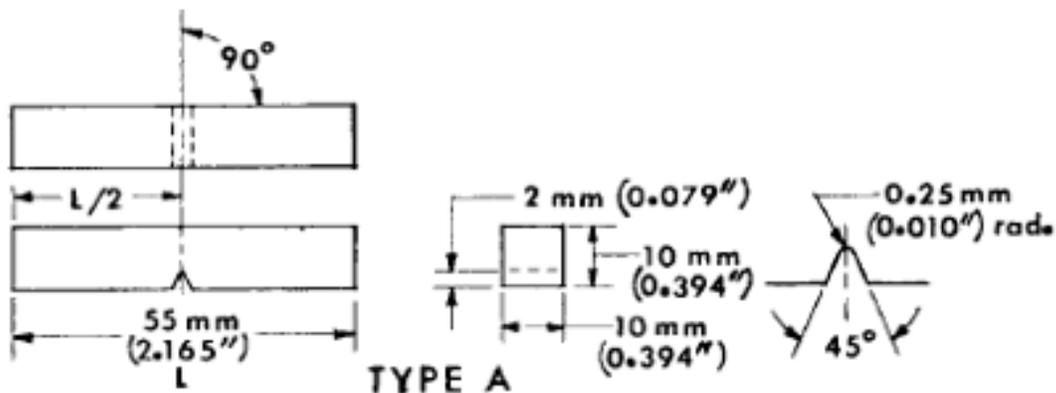
Fuente: elaboración propia.

⁵ Zona 1, corresponde al análisis químico del borde y la Zona 2 corresponde al análisis químico a cercanías del núcleo, del trozo de barra en ambos aceros.

6.1. Preparación de probetas

Para la preparación de las probetas Charpy se tomó como referencia la norma ASTM E23 (ASTM E0023-05 *Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, 2005). Las probetas Charpy tipo A mostradas en la figura 33, se mecanizaron con un extremo más largo (ver figura 34) para realizar el corte y preparar metalografía después de las diferentes etapas del tratamiento térmico.

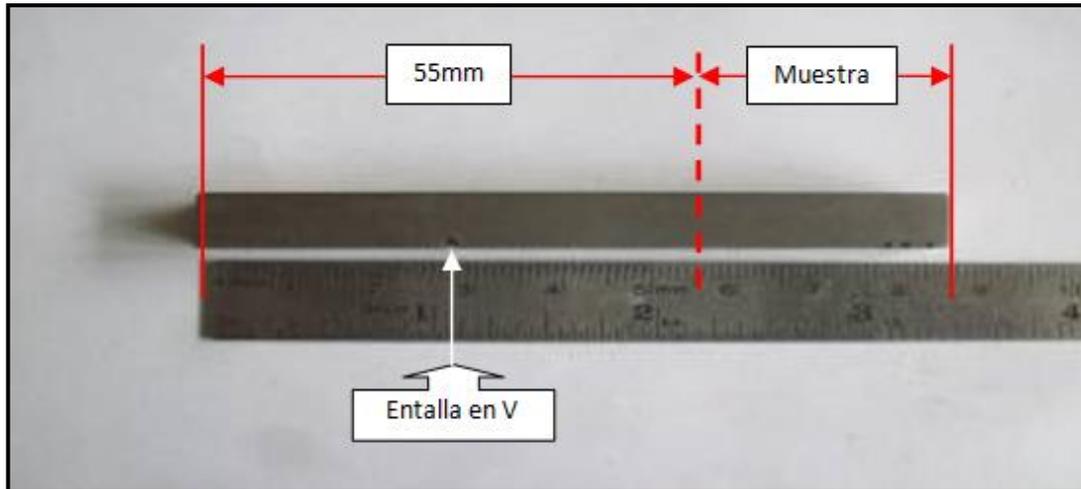
Figura 33. Especificación de probeta Charpy del tipo A



Fuente: ASTM E0023-05 *Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.

p. 2.

Figura 34. **Probeta Charpy tipo A con sobremedida para la toma de muestras metalográficas**

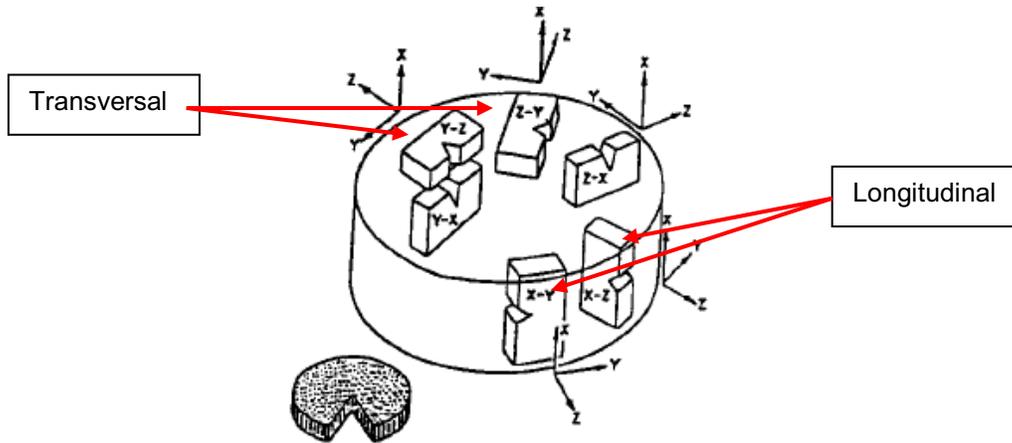


Fuente: elaboración propia.

Con la finalidad de conocer la tenacidad en dirección de la laminación y transversal a la laminación, se prepararon probetas Charpy seccionadas con Orientación Longitudinal (L) y seccionadas con Orientación Transversal (T)⁶, a partir de barras de 100 milímetros (4 pulgadas) de diámetro y 100 milímetros (4 pulgadas) de longitud. La orientación de la entalla se muestra en la figura 35.

⁶ Se hace referencia lo siguiente: L indica que la probeta Charpy fue seccionada con orientación Longitudinal; y T que fue seccionada con orientación Transversal.

Figura 35. **Orientación de probetas Charpy elaboradas**



Fuente: *ASTM E0023-05 Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, p. 19.

Con todas las probetas mecanizadas y marcadas e identificadas se procedió a realizar los tratamientos térmicos acorde al ciclo térmico; temperatura y tiempo de cementación - temple y revenido, ciclos térmicos que se muestran con detalle en tabla XIV.

6.2. **Ciclo térmico para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4**

El ciclo térmico, es el conjunto de variación de temperatura, entre límites determinados, a la que se somete un sistema (probeta) en función del tiempo. Para este caso, usando las ecuaciones 16, 17, 18 y 19, con los elementos microaleantes de la tabla XI de los aceros utilizados; obtenemos los parámetros en temperatura necesarios para realizar la cementación, temple y revenido. Dichos parámetros se observan en la tabla XII.

Tabla XII. **Temperaturas críticas A_1 y A_3 , temperatura de inicio de formación de martensita (Ms); según elementos microaleantes en los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4**

No. Ecuación	Temperaturas Críticas (°C)	16CrNi4	16MnCr5	Desviación Estándar (DS)
16	A_1	722,57	722,69	11,5
	A_1 -DS	711,07	711,19	
	A_1 +DS	734,07	734,19	
17	A_3	909,59	909,68	16,7
	A_3 -DS	892,89	892,98	
	A_3 +DS	926,29	926,38	
18	Ms	511,11	511,12	
19	Ms	536,43	536,41	

Fuente: elaboración propia.

Según las figuras 16, 17, 18 y 19 de los diagramas TTT y CTT, las temperaturas críticas e inicio de formación de martensita corresponden a temperaturas mostradas en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Temperaturas críticas A_1 y A_3 , inicio de formación de martensita (Ms); según diagramas TTT y CCT para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4**

Temperatura Crítica (°C)	Diagrama TTT		Diagrama CCT	
	16MnCr5	16CrNi4	16MnCr5	16CrNi4
A_1	740	735	750	745
A_3	840	825	850	830
Ms	390	380	400	500

Fuente: elaboración propia.

La temperatura del ciclo de cementación planteada fue de 900 grados centígrados, tomando como referencia los valores de A_3 de la tabla XIII, agregándole 50 grados centígrados y aproximándolo a 900 grados centígrados para ambos aceros; dicha temperatura está entre los valores obtenidos por las ecuaciones de la tabla XII. Teniendo presente que en la capa carburada existen distintas microestructuras se determinó la temperatura de 850 grados centígrados para el ciclo de temple, para no obtener un crecimiento de grano excesivo en la zona eutectoide y alcanzando una austenización máxima en la zona hipoeutectoide, esto para ambos aceros.

El tiempo de homogeneidad de la austenita que se dió a las Probetas Charpy fue de 1 hora; acorde al espesor de las probetas (10 milímetros) y al espesor de las paredes de la caja de acero inoxidable (3 milímetros), válido tanto para el ciclo de cementación como para el ciclo de temple.

Después del temple, se midió inmediatamente la dureza superficial en escala Rockwell-A. El tiempo de revenido dado, fue de 1 hora, en concordancia con las durezas superficiales alcanzadas < 61 Rockwell-C (82 dureza Rockwell-A). El Ciclo térmico completo se visualiza en la tabla XIV y en la figura 36.

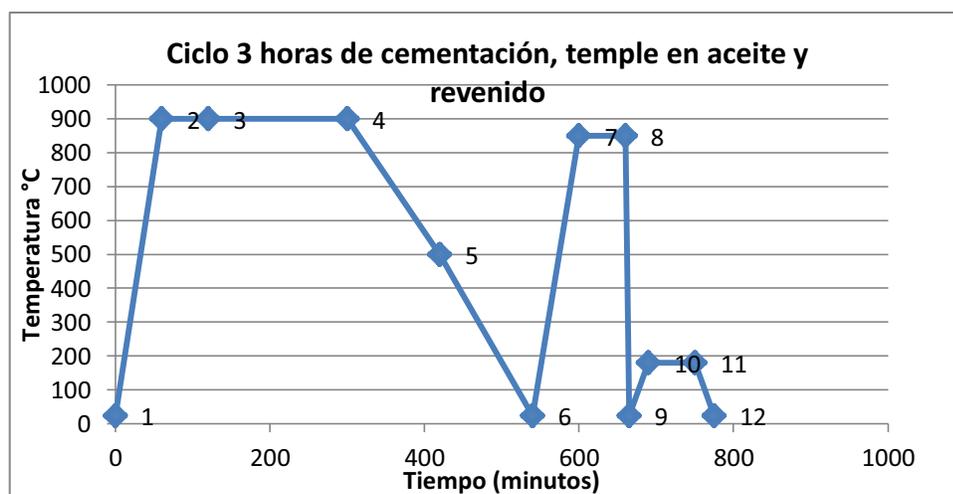
Se debe aclarar que en el punto No. 4 de la tabla XIV se presentan los tiempos de 0,5; 3; 6 y 9 horas de cementación, que corresponden a tiempos independientes de su ciclo. La figura 36, presenta el ciclo térmico completo del proceso para 3 horas de cementación, a modo de graficar el ciclo y hacerlo más didáctico.

Tabla XIV. **Ciclo térmico propuesto para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4.**

No.	Descripción	temperatura °C (grados centígrados)	Δ tiempo (minutos)
1	Temperatura ambiente	23	0
2	Calentamiento horno	900	60
3	Homogenización	900	60
4	Permanencia de cementación	900	30, 180, 360, 540
5	Enfriamiento en horno con caja	500	120
6	Enfriamiento al aire con caja	23	120
7	Calentamiento horno	850	60
8	Austenización (temple)	850	60
9	Enfriado en aceite	23	5
10	Calentamiento horno	180	25
11	Revenido	180	60
12	Enfriado al aire	23	25

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Ciclo térmico de cementación, temple y revenido**



Fuente: elaboración propia.

6.3. Tratamiento térmico cementación-temple-revenido

Para la cementación mediante carburantes sólidos, se preparó una mezcla entre carbón vegetal de granulometría de 4 milímetros, molido y 3 carbonatos diferentes (BaCO_3 , CaCO_3 y Na_2CO_3), que están presentes en el compuesto de cementación llamada mezcla CARON. Los compuestos de la mezcla carburante preparada, se muestran en la tabla III. Se preparó una caja de acero inoxidable austenítico de 3 milímetros de espesor para colocar las probetas Charpy y proceder a la cementación a los diferentes tiempos estipulados; la razón de usar una caja inoxidable fue para la durabilidad del mismo. La figura 37 muestra la secuencia del procedimiento llevado a cabo para la cementación detallada de la siguiente manera:

- (a) Acomodamiento de probetas sobre 5 centímetros de mezcla de cementación.
- (b) Probetas cubiertas con 5 centímetros de mezcla de cementación; colocando la caja en un horno secador a 90 grados centígrados por 12 horas para eliminar la humedad de la mezcla cementante.
- (c) Se cubrió con kaowool para evitar la filtración de oxígeno dentro de la caja.
- (d) Sellado de la caja con kaowool para evitar la filtración de oxígeno de la cámara del horno hacia la caja.
- (e) Sellado de caja con kaowool.
- (f) Colocación de caja en el horno. Con 1 hora de homogeneización a 900 grados centígrados seguido de las horas de cementación.

Figura 37. Procedimiento para la cementación



a)



b)



c)



d)



e)



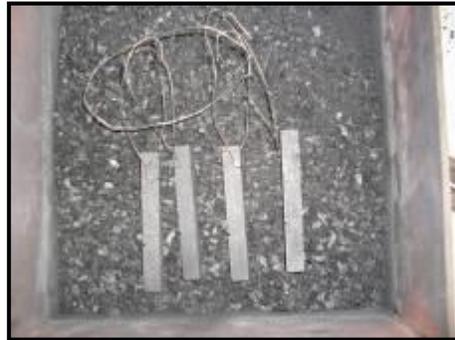
f)

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Con las probetas cementadas en las distintas horas propuestas, se procedió a realizar el temple para ambos aceros. La figura 38 detalla el procedimiento para la realización del temple, en donde la secuencia fue llevada de la siguiente manera:

- (a) Acomodamiento de probetas sobre 5 centímetros de carbón vegetal; amarradas con alambre (kanthal) para la extracción de los mismos.
- (b) Probetas cubiertas con 5 centímetros de carbón vegetal; colocando la caja en un horno secador con 90 grados centígrados por 12 horas para eliminar la humedad del carbón vegetal.
- (c) Se cubrió con kaowool para evitar la filtración de oxígeno dentro de la caja; se colocó la tapa a la caja sin kaowool en el contorno para luego introducirlo en el horno.
- (d) Caja metálica, donde se realizó temple en aceite.
- (e) Extracción de probetas a templar.
- (f) Enfriamiento de probetas en aceite Thermic Oil. La temperatura de temple fue de 850 grados centígrados, con tiempo de austenización de 1 hora.

Figura 38. Procedimiento para el temple



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC

Seguido del temple se introdujo las probetas en el horno, con un tiempo de permanencia de 1 hora a 180 grados centígrados sin medio carburante; para luego extraerlos y enfriados al aire (ver figura 39).

Figura 39. **Procedimiento del revenido**



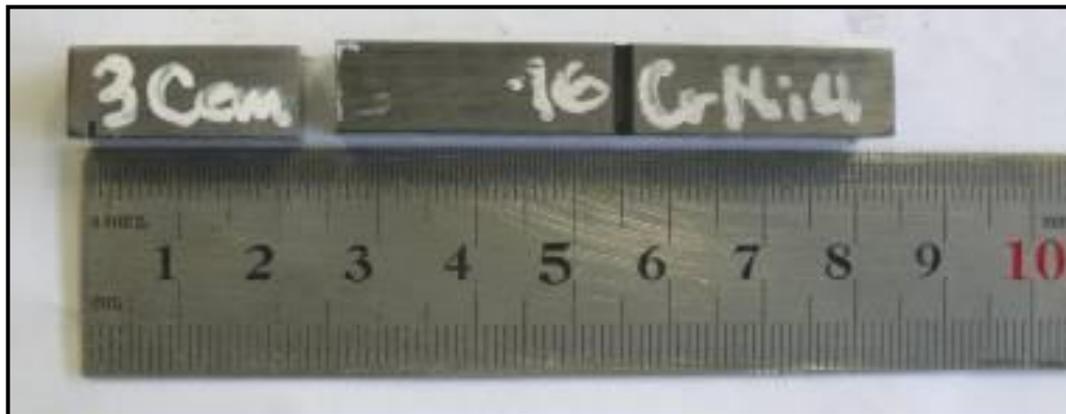
Fuente: laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

6.4. Preparación de probetas acorde a las etapas del proceso

Al término de cada etapa de los tratamientos térmicos se procedió a cortar las probetas Charpy con ayuda de la cortadora metalográfica Prazis (figura 40b) y discos especiales de corte marca Buehler, con fluido refrigerante para evitar el calentamiento de las probetas (figura 40c), para dejarlas con la longitud estándar como estipula la Norma ASTM E23 (figura 40a); cada muestra seccionada de cada probeta Charpy, se montó en baquelita para el análisis

metalográfico y evaluación de la evolución de los mismos en cada etapa del proceso, como también para la realización del perfil de dureza. En la figura 41 se visualizan muestras pulidas y atacadas con nital al 2 por ciento.

Figura 40. **Corte**



a)



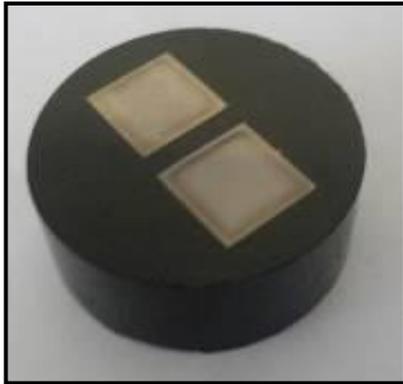
b)



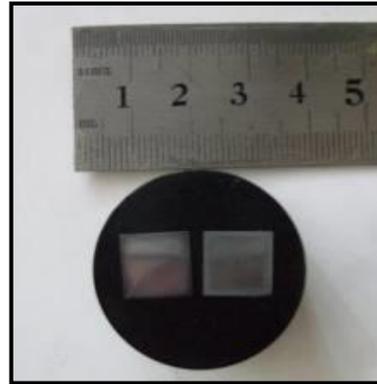
c)

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 41. **Montado de probetas**



a)



b)

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

6.4.1. **Preparación metalográfica**

El proceso de lijado se realizó manualmente acorde al proceso estándar, utilizando papeles abrasivos de granulometría 240, 360, 600, 1200 (granos por centímetro cuadrado), se procedió a lijar en un sentido de orientación pasando al siguiente papel abrasivo con un movimiento de 90 grados en ángulo inmediatamente después que se observó la desaparición de las rayas dejadas con el papel abrasivo anterior.

Después del lijado y lavado de las probetas se procedió al pulido con suspensión acuosa de alúmina (óxido de aluminio Al_2O_3) con granulometría de 0,5 micrones, el pulido se realizó con ayuda de la pulidora Ecomet 3 Buehler (figura 42), seguido de un lavado superficial acuoso de la muestra. El ataque químico para revelar límites de granos y las fases del tratamiento térmico, se realizó con nital al 2 por ciento.

Figura 42. **Pulido**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

6.5. Procedimientos de ensayos realizados

A continuación se detallan los ensayos mecánicos realizados y se pueden mencionar algunos, tales como: microfotografías, dureza e impacto. Dichos ensayos ayudan a entender la naturaleza de los materiales.

6.5.1. Microfotografías

El estudio metalográfico se realizó a través del Microscopio Olympus GX51 (figura 43a y b), tomando microfotografías usando los distintos objetivos (x5, x10, x20, x50 y x100). Con el aumento de x100, probetas pulidas y sin ataque químico se determinaron los tipos de inclusiones presentes en los aceros y con el mismo aumento pero con probetas pulidas y atacadas con nital al 2 por ciento se determinó el tamaño de grano ASTM de la ferrita. Las imágenes capturadas y las mediciones en la profundidad de la capa carburada y descarburizada fueron hechas con ayuda del software *Micrometrics SE Premium* (figura 43c).

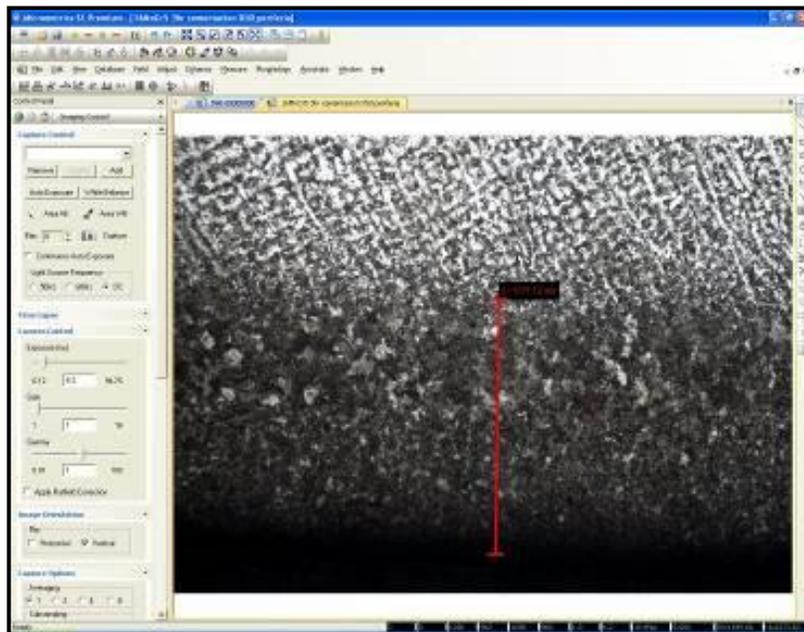
Figura 43. **Microfotografías**



a)



b)



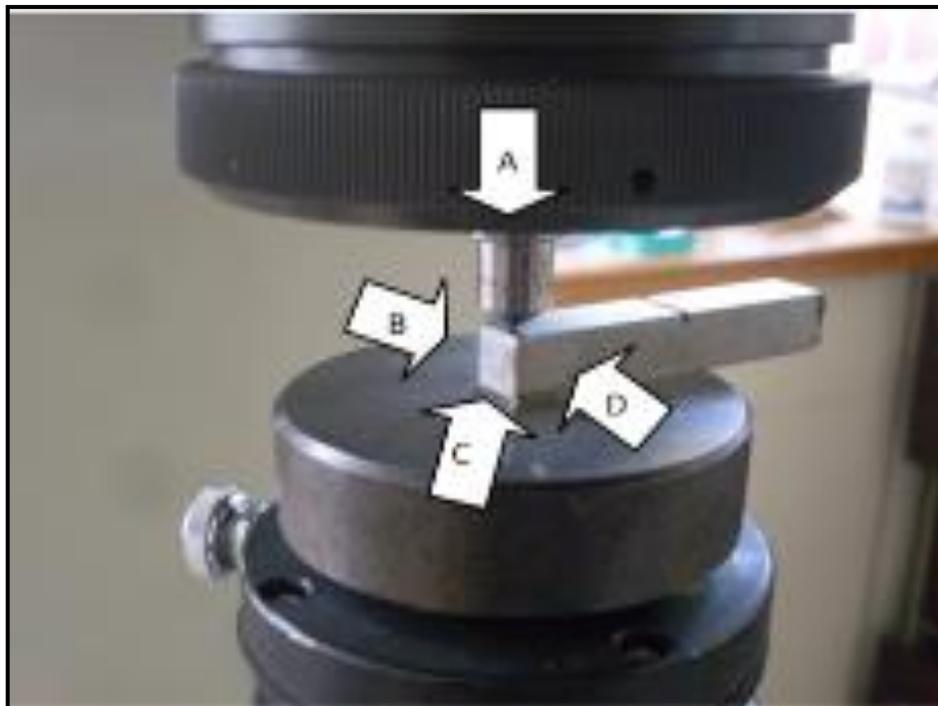
c)

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

6.5.2. Ensayo de dureza

En el ensayo de dureza superficial, se tomaron 8 muestras de dureza por cada probeta, 2 en el borde por cada lado A, B, C y D (figura 44) para corroborar la homogeneidad del tratamiento térmico de las probetas Charpy. Se trabajó con dureza Rockwell-A para las probetas tratadas térmicamente mientras que para las probetas en estado de suministro con dureza Rockwell-B; por razones que la norma ASTM E18 (ASTM E0018-05E01 *Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials Edition, 2005*) estipula. Del borde hacia la toma de la muestra de dureza existe entre 4 y 5 milímetros de distancia.

Figura 44. Ensayos de dureza superficial



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Para realizar el perfil de dureza borde-núcleo, se planteo la toma de 3 muestras, para observar la tendencia de la dureza, que tiende el borde hacia el núcleo; las muestras fueron tomadas de 0, 1, 2, y 5 milímetros del borde hacia el centro respectivamente (figura 45); haciendo referencia que la muestra en 0 milímetros fue la tomada con anterioridad en la dureza superficial. Se siguió trabajando con dureza Rockwell-A. Para este ensayo se tomaron las probetas Charpy más características tratadas térmicamente. Todas las muestras de durezas fueron tomadas con el Medidor de Dureza, Leco RT-240.

Figura 45. **Perfil de dureza borde-núcleo**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Mecánica, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

6.5.3. Ensayo de impacto

Cada una de las probetas Charpy cementadas, templadas y revenidas, fue sometida al ensayo de impacto a temperatura ambiente con la máquina medidora de Impacto Mohr & Federhaff AG PSW 30/15 (figura 46a). Se determinó de esta manera la energía absorbida por deformación plástica hasta la ruptura. La figura 46b muestra el centrado de la probeta Charpy en la máquina.

Figura 46. **Ensayo de impacto**



a)



b)

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Mecánica, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

6.5.4. **Fractografías y análisis químico (EDS)**

Posteriormente, las macrofractografías fueron realizadas con el microscopio Estereoscópico SZ61 (figura 47) y algunas de éstas, consideradas representativas del fenómeno, fueron analizadas con el Microscopio Electrónico de Barridos MEB⁷ para las microfractografías, como también el microanálisis EDS⁸ en algunos puntos específicos. En la figura 48a se visualiza el Microscopio Electrónico de Barridos utilizado, de marca JOEL, Modelo JSM-6380LV, y en la figura 48b se observa el montaje de las muestras analizadas con dicho microscopio.

⁷ Microscopio Electrónico de Barridos MEB (en su sigla en inglés SEM)

⁸ Espectrómetro de Dispersión de Energías (en su sigla en inglés EDS)

Figura 47. **Macrofractografías**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Mecánica, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 48. **Microfractografías y análisis químico (EDS)**



a)



b)

Fuente: Laboratorio de Investigaciones UdeC.

7. RESULTADOS

Para la recopilación de datos y el análisis de los mismos se distribuyeron los ensayos de la siguiente manera:

Tabla XV. **Distribución de ensayos, probetas Charpy T**

Probetas Charpy T		No. Muestra	Metalografías	Ensayo de dureza superficial	Perfil de dureza borde-núcleo	Ensayo de impacto	Fractografía microscopio estereoscópico	Fractografía SEM y EDS
Estado de suministro	16MnCr5	27	X	X		X	X	
	16CrNi4	28	X	X		X	X	
0,5 horas de cementación	16MnCr5	29	X	X		X	X	
	16CrNi4	30	X	X		X	X	
0,5 horas de cementación y temple	16MnCr5	31		X		X	X	
	16CrNi4	32		X		X	X	
0,5 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	33		X		X	X	
	16CrNi4	34		X		X	X	
6 horas de cementación	16MnCr5	35	X	X	X	X	X	
	16CrNi4	36	X	X	X	X	X	
6 horas de cementación y temple	16MnCr5	37		X	X	X	X	
	16CrNi4	38		X	X	X	X	
6 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	39		X	X	X	X	
	16CrNi4	40		X	X	X	X	
9 horas de cementación	16MnCr5	41	X	X		X	X	
	16CrNi4	42	X	X		X	X	
9 horas de cementación y temple	16MnCr5	43		X		X	X	
	16CrNi4	44		X		X	X	
9 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	45		X		X	X	
	16CrNi4	46		X		X	X	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Distribución de ensayos, probetas Charpy L

Probetas Charpy L		No. Muestra	Metalografías	Ensayo de dureza superficial	Perfil de dureza borde-núcleo	Ensayo de impacto	Fractografía microscopio estereoscópico	Fractografía SEM y EDS
Estado de suministro	16MnCr5	1	X	X		X	X	X
	16CrNi4	2	X	X		X	X	X
0,5 horas de cementación	16MnCr5	3	X	X		X	X	
	16CrNi4	4	X	X		X	X	
0,5 horas de cementación y temple	16MnCr5	5		X		X	X	
	16CrNi4	6		X		X	X	
0,5 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	7		X		X	X	
	16CrNi4	8		X		X	X	
3 horas de cementación	16MnCr5	9	X	X	X	X	X	
	16CrNi4	10	X	X	X	X	X	
3 horas de cementación y temple	16MnCr5	11	X	X	X	X	X	
	16CrNi4	12	X	X	X	X	X	
3 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	13	X	X	X	X	X	
	16CrNi4	14	X	X	X	X	X	
6 horas de cementación	16MnCr5	15	X	X	X	X	X	X
	16CrNi4	16	X	X	X	X	X	X
6 horas de cementación y temple	16MnCr5	17	X	X	X	X	X	X
	16CrNi4	18	X	X	X	X	X	X
6 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	19	X	X	X	X	X	
	16CrNi4	20	X	X	X	X	X	
9 horas de cementación	16MnCr5	21	X	X		X	X	
	16CrNi4	22	X	X		X	X	
9 horas de cementación y temple	16MnCr5	23		X		X	X	
	16CrNi4	24		X		X	X	
9 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	25		X		X	X	
	16CrNi4	26		X		X	X	

Fuente: elaboración propia.

7.1. Resultados metalográficos

La metalografía, estudia las características morfológicas de la estructura de un metal o aleación. A través del microscopio metalográfico se puede determinar el tamaño de grano, forma y distribución de las diversas fases e inclusiones, características íntimamente relacionadas con las propiedades mecánicas de los metales. Al conocer la microestructura presente en un determinado material nos permitirá dar conclusiones de los tratamientos térmicos y termomecánicos a la cual fue sometido.

La metodología de preparación y ataque de muestras, se procedieron según las normas:

- ASTM E3 (ASTM E0003-01 Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 2005) Guía para preparación de muestras metalográficas.
- ASTM E45 (ASTM E0045-97R02 Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, 2005) Determinación de inclusiones.
- ASTM E112 (ASTM E0112-96R04 Test Methods for Determining Average Grain Size, 2005) Determinación de tamaño de grano promedio.
- ASTM E1077 (ASTM E1077-01R05 Test Methods for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens, 2005) Estimación de la profundidad de descarburización.

En la tabla XVII y tabla XVIII se detallan los resultados experimentales de las metalografías realizadas:

Tabla XVII. Resultados de metalografías, probetas Charpy L

Probetas Charpy L	No. Muestra	Inclusiones del tipo D óxido globular, borde	Inclusiones del tipo D óxido globular, núcleo	Tamaño de grano ASTM Ferrita núcleo	Capa carburada (penetración) μm^9	Capa descarburizada μm	Fases en el borde	Fases en el núcleo
Estado de Suministro	1	Serie 2 fino	Serie 3 fino	4	—	—	Perlita, ferrita poliédrica y <i>Widmanstätten</i>	Perlita, ferrita poliédrica y <i>Widmanstätten</i>
	2	Serie 1 grueso	Serie 2 grueso	4	—	—	Perlita y ferrita proeutectoide	Perlita y ferrita proeutectoide
0,5 horas de Cementación	3	Serie 2 fino	Serie 3 fino	8	652,15	15,45	Colonias de Perlita fina y gruesa rodeadas de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide
	4	Serie 2 fino	Serie 3 fino	8	634,45	12,14	Colonias de Perlita fina rodeada de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide

⁹ μm = micrón = 1E-3 milímetros

Continuación de la tabla XVII.

3 horas de Cementación	16MnCr5	9	Serie 2 fino	Serie 3 fino	8	1071,12	21,97	Crecimiento de colonias de perlita fina rodeadas de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide
	16CrNi4	10	Serie 2 fino	Serie 3 grueso	8	819,00	11,59	Crecimiento de colonias de perlita fina rodeadas de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide
3 horas de Cementación y temple	16MnCr5	11	Serie 2 fino	Serie 1 grueso	—	—	—	Martensita sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida
	16CrNi4	12	Serie 2 fino	Serie 3 fino	—	—	—	Martensita sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida
3 horas de Cementación, temple y revenido	16MnCr5	13	Serie 1 fino	Serie 2 fino	—	—	—	Martensita revenida sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita revenida y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida
	16CrNi4	14	Serie 1 fino	Serie 2 fino	—	—	—	Martensita revenida sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita revenida y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida

Continuación de la tabla XVII.

6 horas de Cementación	16MnCr5	15	Serie 2 fino	Serie 3 fino	8	1306,50	17,00	Colonias de perlita fina y gruesa rodeadas de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide
	16CrNi4	16	Serie 2 fino	Serie 3 grueso	7	1211,42	21,97	Colonias de perlita fina rodeada de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide
6 horas de Cementación y temple	16MnCr5	17	Serie 3 fino	Serie 2 fino	—	—	—	Martensita sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida
	16CrNi4	18	Serie 3 fino	Serie 2 grueso	—	—	—	Martensita sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida
6 horas de Cementación, temple y revenido	16MnCr5	19	Serie 3 fino	Serie 3 grueso	—	—	—	Martensita revenida sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita revenida y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida
	16CrNi4	20	Serie 1 fino	Serie 2 fino	—	—	—	Martensita revenida sobre una matriz de austenita retenida y cementita secundaria combinada con carburos de cromo	Martensita revenida y bainita inferior a un bajo contenido de carbono, sobre matriz de austenita retenida

Continuación de la tabla XVII.

9 horas Cementación	16MnCr5	21	Serie 2 fino	Serie 3 fino	8	1560,41	14,36	Colonias de perlita fina rodeada de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide
	16CrNi4	22	Serie 4 fino	Serie 4 fino	8	1419,50	45,71	Colonias de perlita fina rodeada de cementita secundaria	Perlita y ferrita proeutectoide

Fuente: elaboración propia

Tabla XVIII. **Resultados de metalografías, probetas Charpy T**

Probetas Charpy T	No. Muestra	Inclusiones del tipo D óxido globular, borde	Inclusiones del tipo D óxido globular, núcleo	Tamaño de grano ASTM Ferrita núcleo	Capa carburada (penetración) μm	Capa descarbonizada μm	Fases en el borde	Fases en el núcleo
Estado de Suministro	16MnCr5	Serie 4 grueso	Serie 4 grueso	4	—	—	Perilita , ferrita poliédrica y <i>Widmanstätten</i>	Perilita, ferrita poliédrica y <i>Widmanstätten</i>
	16CrNi4	Serie 3 grueso	Serie 3 grueso	5	—	—	Perilita y ferrita proeutectoide (bandeado)	Perilita y ferrita proeutectoide (bandeado)
0,5 horas de Cementación	16MnCr5	Serie 3 grueso	Serie 3 fino	8	549,25	9,93	Colonias de perilita fina rodeadas de cementita secundaria	Perilita y ferrita proeutectoide (bandeado)
	16CrNi4	Serie 3 grueso	Serie 3 grueso	8	563,81	14,36	Colonias de perilita fina rodeada de cementita secundaria	Perilita y ferrita proeutectoide (bandeado)

Continuación de la tabla XVIII.

6 horas de Cementación	16MnCr5	35	Serie 4 fino	Serie 3 grueso	8	1330,10	25,61	Colonias de perlitita fina rodeada de cementita secundaria	Perlitita y ferrita proeutectoide (bandeado)
	16CrNi4	36	Serie 4 grueso	Serie 3 grueso	8	1193,65	23,31	Colonias de perlitita fina rodeada de cementita secundaria	Perlitita y ferrita proeutectoide (bandeado)
9 horas de Cementación	16MnCr5	41	Serie 4 fino	Serie 3 grueso	8	1529,25	31,35	Colonias de perlitita fina rodeada de cementita secundaria	Perlitita y ferrita proeutectoide (bandeado)
	16CrNi4	42	Serie 3 fino	Serie 3 grueso	8	1343,59	22,42	Colonias de perlitita fina rodeada de cementita secundaria	Perlitita y ferrita proeutectoide (bandeado)

Fuente: elaboración propia.

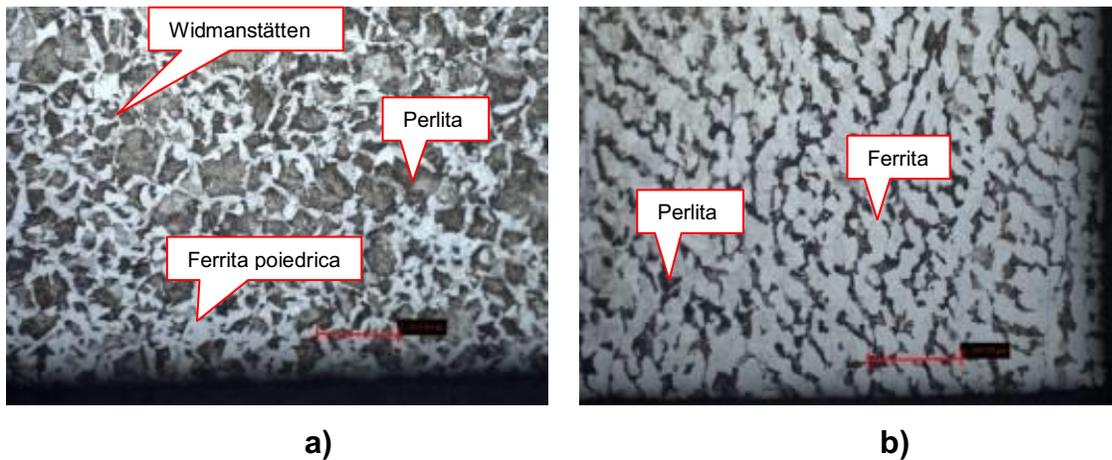
7.1.1. Descripción de fotomicrografías

Se tomaron fotomicrografías a distintos aumentos para profundizar las características de cada muestra, según la evolución del mismo durante los tratamientos térmicos realizados.

Las mediciones de profundidad de penetración de la capa carburizada y capa descarburizada de las metalografías fueron hechas con el software *Micrometrics SE Premium*.

Cabe mencionar que se tomaron en cuenta las más representativas.

Figura 49. **Muestras en estado de suministro probetas Charpy L Nital 2%**



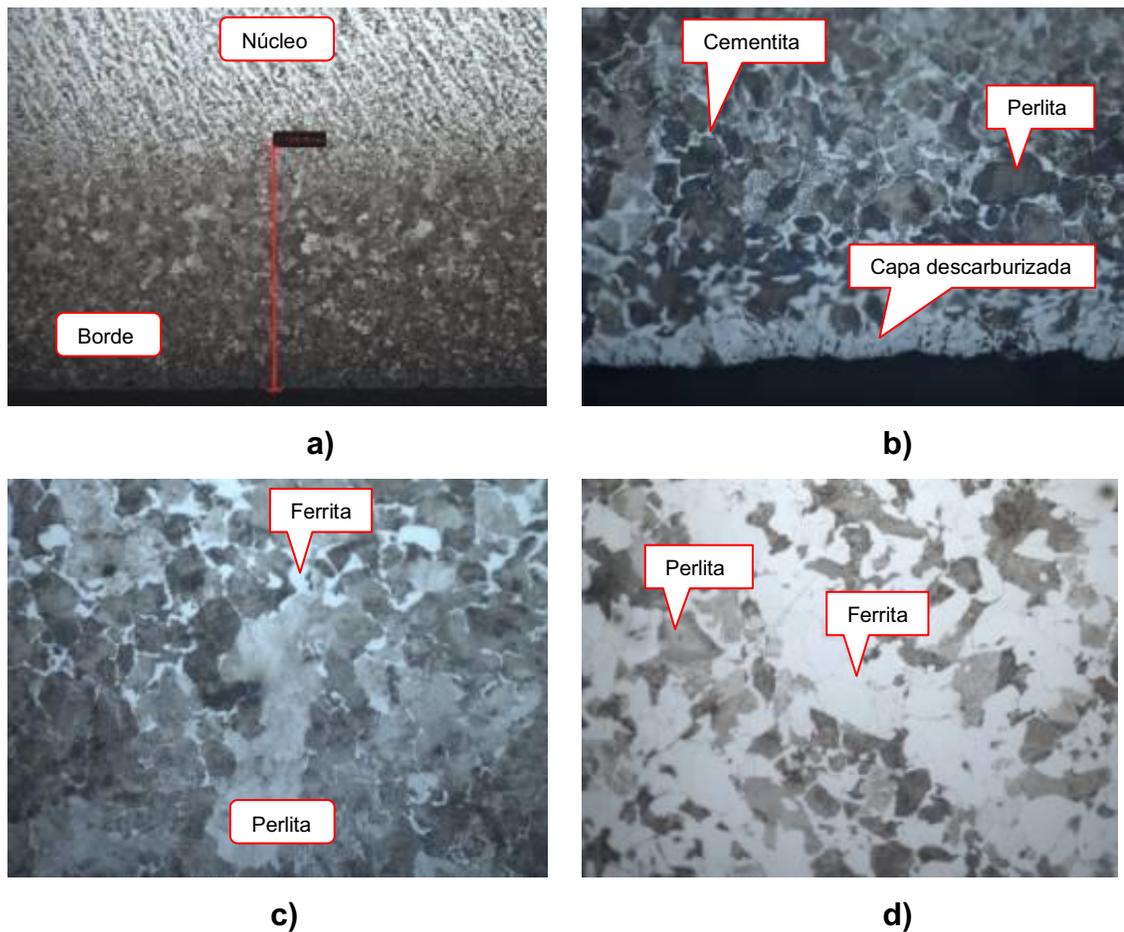
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Muestra No. 1, DIN 16MnCr5, borde, tamaño de grano de la ferrita 4 ASTM, perlita, ferrita poliédrica y algo acicular (*Widmanstätten*)

consecuencia de un enfriamiento no bien controlado, reglilla 215,43 micrones, x 100.

- (b) Muestra No. 2, DIN 16CrNi4, borde, tamaño de grano de la ferrita 4 ASTM, perlita y ferrita proeutectoide, reglilla 247,23 micrones, x 100.

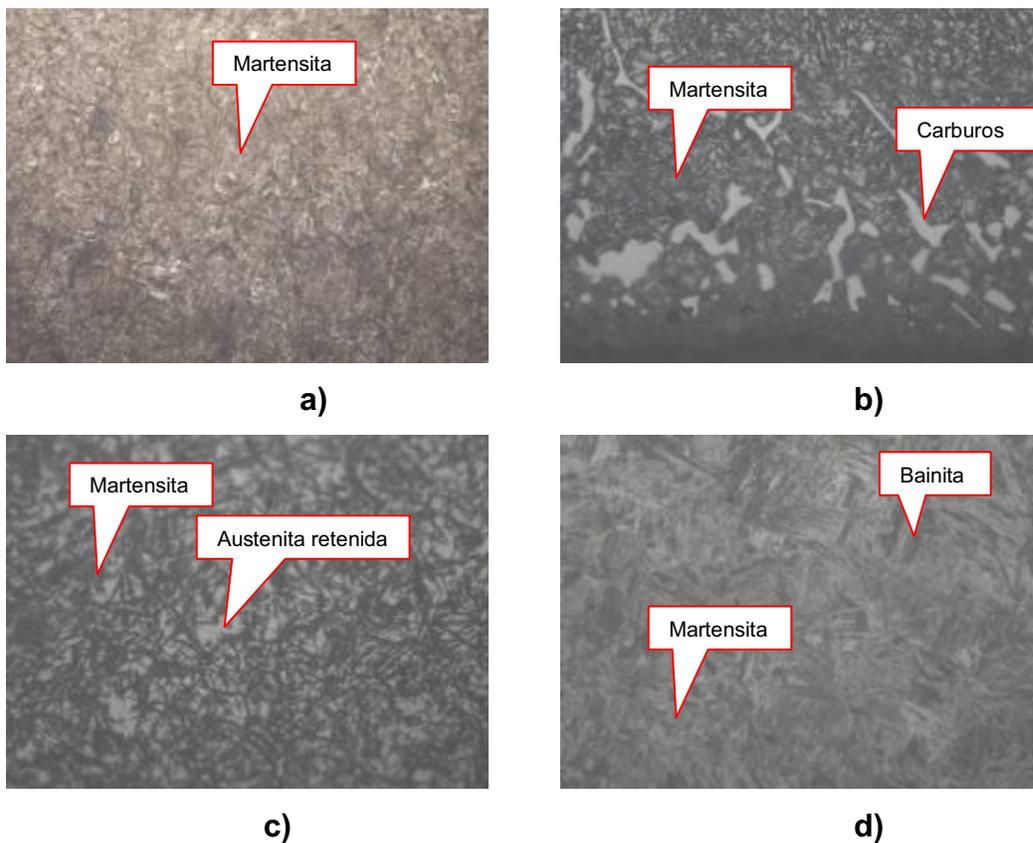
Figura 50. **Muestra No. 15, acero DIN 16MnCr5, 6 horas de cementación a 900°C. Nital 2%**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Capa cementada con un espesor de 1,3 milímetros, x 50.
- (b) Borde, zona hipereutectoide, colonias de perlita fina rodeadas de cementita secundaria, capa descarburizada 17 micrones, x 500.
- (c) Transición, zona eutectoide (perlita) e hipoeutectoide, (ferrita y perlita) x 500.
- (d) Núcleo, perlita y ferrita proeutectoide, x 500.

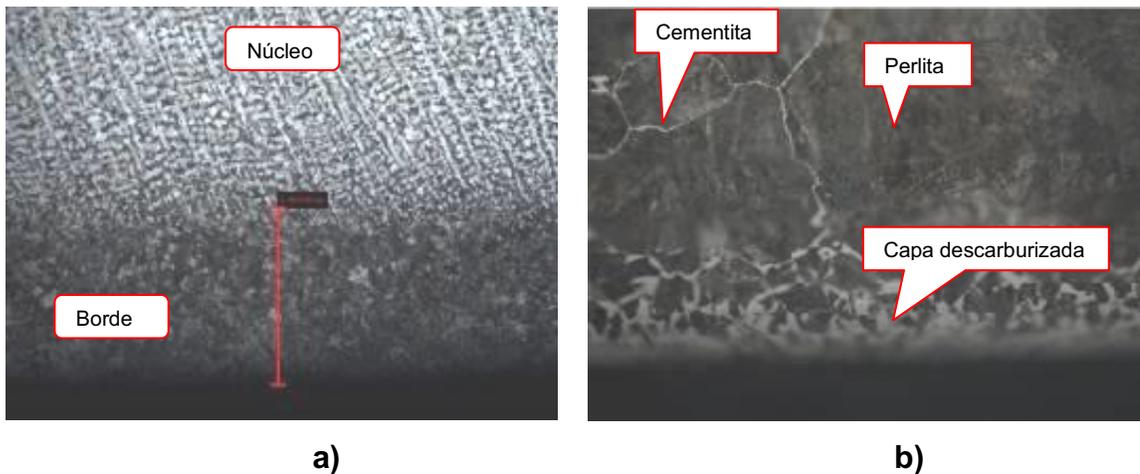
Figura 51. **Muestra No. 17, acero DIN 16MnCr5, 6 horas de cementación a 900°C y templada en aceite a 850°C. Nital 2%**



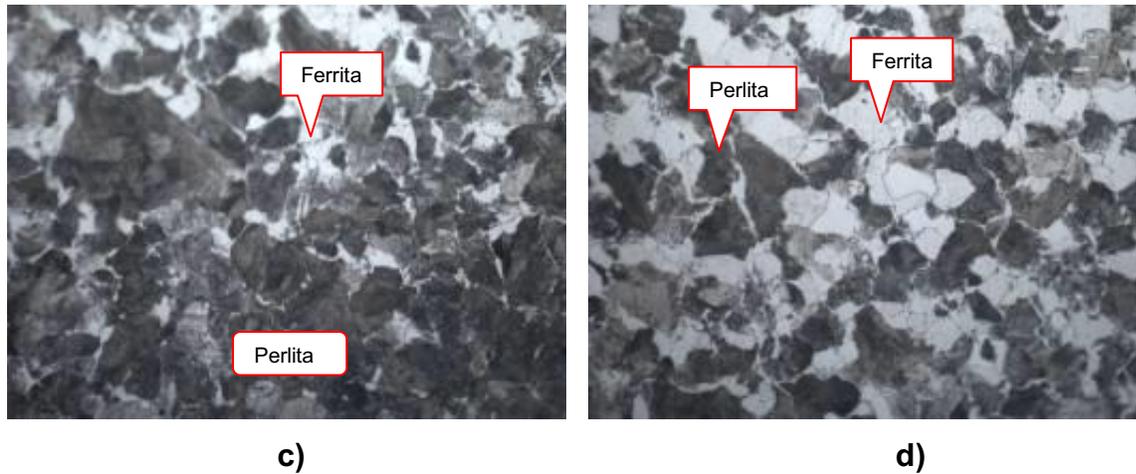
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Transición, zona eutectoide, martensita, x 500.
- (b) Borde, zona hipereutectoide, martensita sobre una matriz de austenita retenida, combinación de cementita secundaria con carburos de cromo, x 1 000.
- (c) Transición, zona eutectoide, martensita sobre matriz de austenita retenida, x 1 000.
- (d) Núcleo, martensita y bainita inferior (zonas oscuras) a un bajo contenido de carbono, x 1 000

Figura 52. **Muestra No. 10, acero DIN 16CrNi4, 3 horas de cementación a 900°C. Nital 2%**



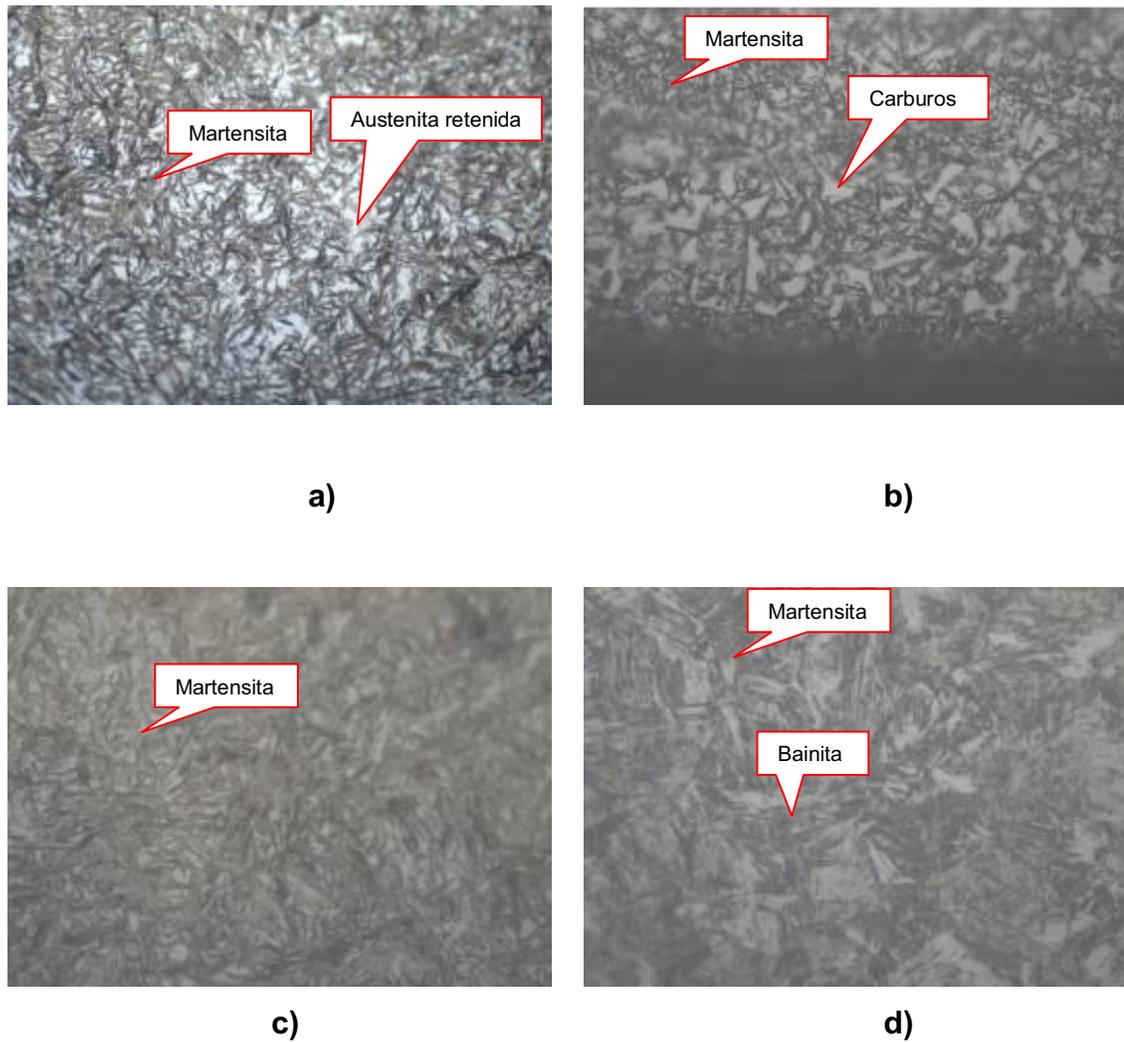
Continuación de la figura 52.



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Capa cementada con un espesor de 0,81 milímetros, x 50.
- (b) Borde, zona hipereutectoide, crecimiento de colonias de perlita fina rodeadas de cementita secundaria, capa descarburizada 11,59 micrones, x 500.
- (c) Transición, zona eutectoide (perlita) e hipoeutectoide, (ferrita y perlita) x 500.
- (d) Núcleo, perlita y ferrita proeutectoide, x 500.

Figura 53. **Muestra No. 12, acero DIN 16CrNi4, 3 horas de cementación a 900°C y templada en aceite a 850°C. Nital 2%**

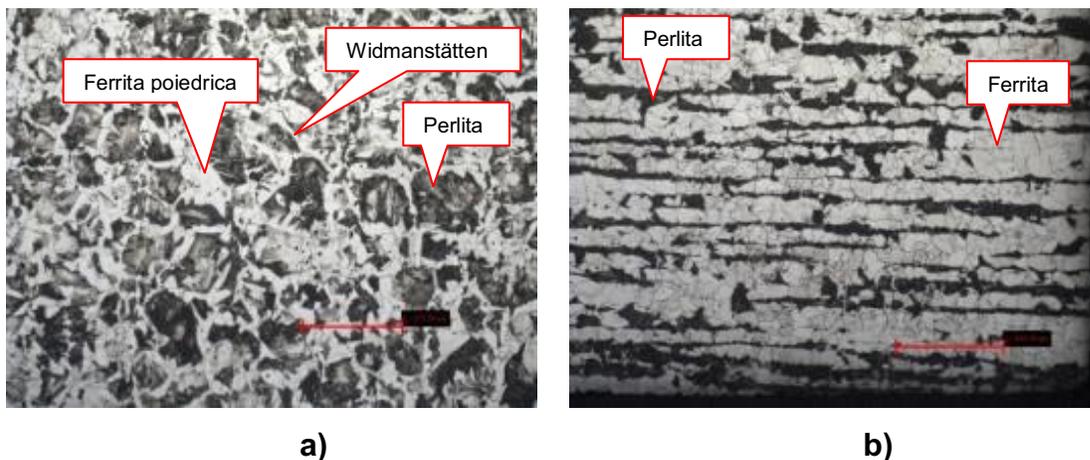


Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Transición, zona eutectoide, martensita sobre una matriz blanca de austenita retenida x500.

- (b) Borde, zona hipereutectoide, martensita sobre una matriz de austenita retenida, combinación de cementita secundaria con carburos de cromo, x 1 000.
- (c) Transición, zona eutectoide, martensita sobre matriz de austenita retenida, x 1 000.
- (d) Núcleo, martensita y bainita inferior (zonas oscuras) a un bajo contenido de carbono, x 1 000.

Figura 54. **Muestras en estado de suministro probetas Charpy T Nital 2%**

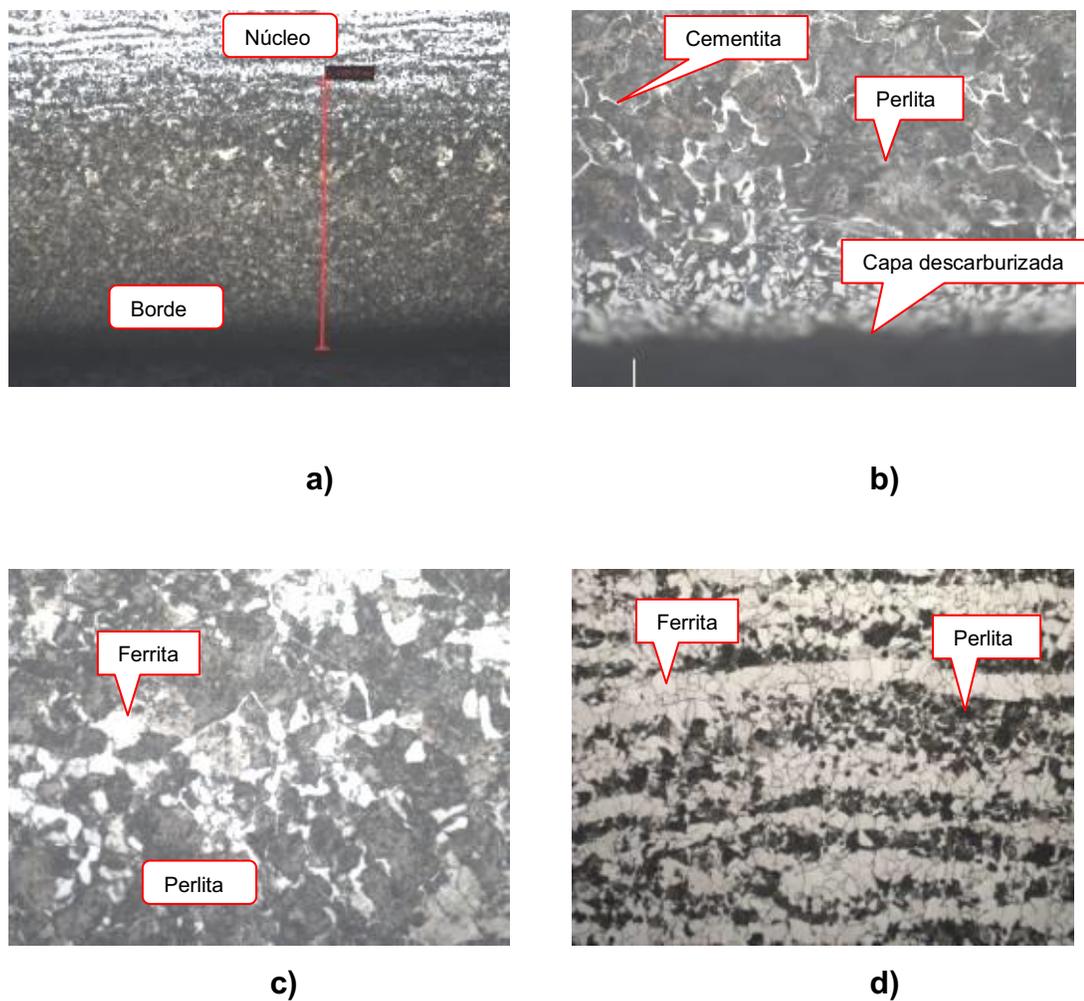


Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Muestra No. 27, DIN 16MnCr5, núcleo, tamaño de grano de la ferrita 4 ASTM, perlita, ferrita poliédrica y algo acicular (*Widmanstätten*) consecuencia de un enfriamiento no bien controlado, reglilla 272,3 micrones, x100;

- (b) Muestra No. 28, DIN 16CrNi4, borde, tamaño de grano de la ferrita 5 ASTM, perlita y ferrita proeutectoide, efecto de bandeado por laminación, reglilla 292,39 micrones, x100.

Figura 55. **Muestra No. 41, acero DIN 16MnCr5, 9 horas de cementación a 900°C. Nital 2%**

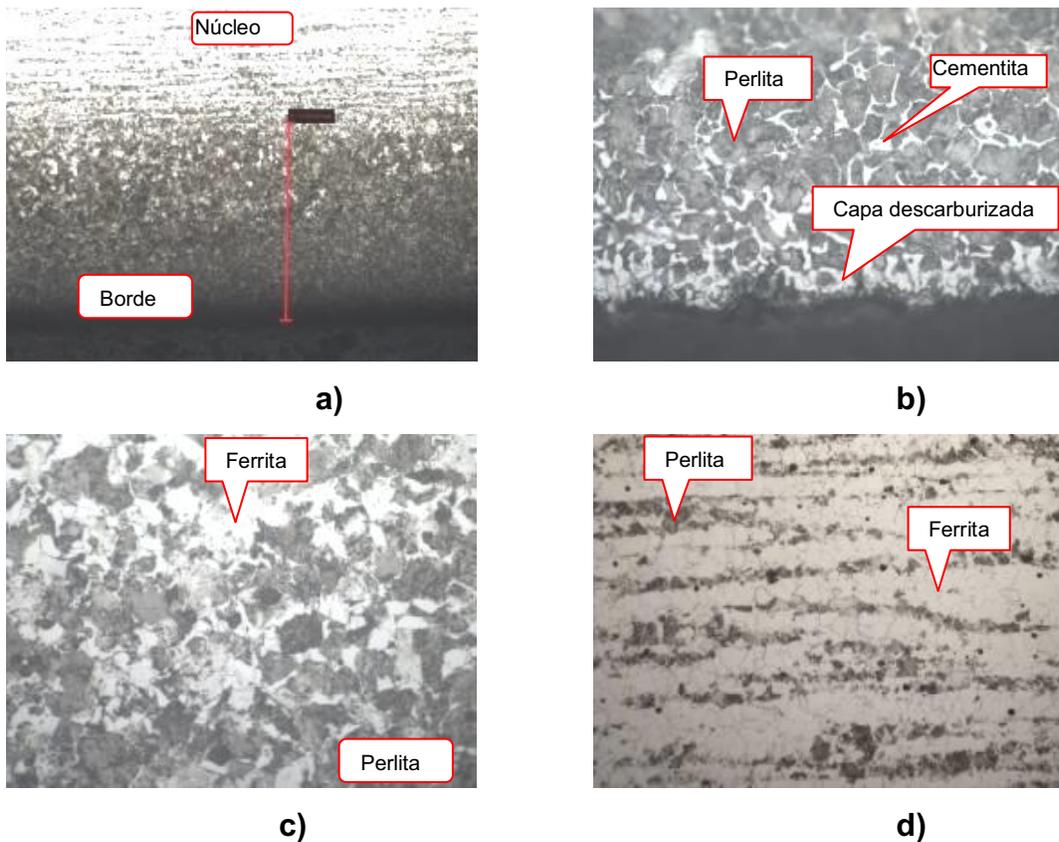


Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Capa cementada con un espesor de 1,52 milímetros, x50.

- (b) Borde, zona hipereutectoide, colonias de perlita fina rodeadas de cementita secundaria, capa descarburizada 31,35 micrones, x 500.
- (c) Transición, zona eutectoide (perlita) e hipoeutectoide, (ferrita y perlita), x 500.
- (d) Núcleo, perlita y ferrita proeutectoide, efecto de bandeo por laminación, x 200.

Figura 56. **Muestra No. 36, acero DIN 16CrNi4, 6 horas de cementación a 900°C. Nital 2%**



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

- (a) Capa cementada con un espesor de 1,19 milímetros, x 50.
- (b) Borde, zona hipereutectoide, colonias de perlita fina rodeadas de cementita secundaria, capa descarburizada 23,31 micrones, x500.
- (c) Transición, zona eutectoide (perlita) e hipoeutectoide, (ferrita y perlita) x 500.
- (d) Núcleo, perlita y ferrita proeutectoide, efecto de bandeo por laminación, x 200.

7.2. Resultados de difusión

Los elementos solventes en la difusión intersticial, son por lo regular hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que por tener cada uno de estos un radio atómico pequeño, son idóneos para ocupar posiciones intersticiales.

Los factores importantes en la difusión son los siguientes:

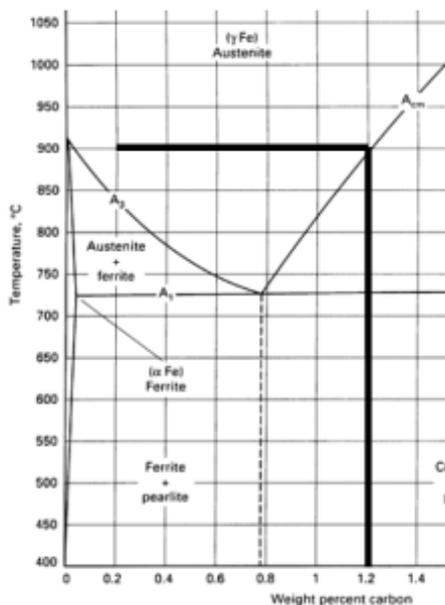
- Elemento solvente y disolvente
- Temperatura
- Defectos en la estructura cristalina del material disolvente

Cada elemento disolvente tendrá un coeficiente de difusión distinto según la estructura cristalina que presenta y la temperatura en la que es expuesta, como por ejemplo el Fe, que es, un elemento metálico característico por su alotropía. El hierro gamma posee las características idóneas para que suceda la difusión intersticial por poseer energía de activación necesaria para que ocurra el flujo de átomos intersticiales en este caso, átomos de carbono y cambiar así

las microestructuras propias del acero. Recordando que los átomos de carbono pueden ocupar espacios intersticiales, vacantes o sustituir ciertos átomos de Fe, ya que al tener la energía de activación apropiada cada átomo vibra rápidamente alrededor de su posición reticular aprovechando de esta manera la difusión de átomos.

Verhoeven, 1987, dice, que la máxima concentración de carbono que puede difundir el Fe como disolvente, va depender de la temperatura. Los aceros utilizados DIN 16MnCr5 y DIN 16CrNi4 se expusieron a 900 grados centígrados para la cementación, por lo cual un aproximado de la máxima solubilidad del carbono en el hierro gamma va ser de 1,2 por ciento de carbono, como se muestra en la simulación de la figura 57.

Figura 57. **Representación de la solubilidad del carbono en hierro gamma para una temperatura de 900 °C**



Fuente: *Metal Handbook Volume 4 Heat Treating*. p. 103.

Para efecto de este trabajo se procedió a corroborar la segunda ley de Fick, despejando C_x (ecuación 28) y obtener de esta manera la concentración última de la capa cementante, que sería cercana a la concentración del acero en estado de suministro (ver tabla XIX).

$$C_x = (C_s - C_0) \left(1 - \text{ferr} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) + C_0 \quad (28)$$

Asumiendo que:

C_x = Porcentaje de concentración de carbono experimental a la distancia x a través del tiempo

C_s = Porcentaje de concentración superficial del carbono en la mezcla carburante (asumiendo que es la misma de la figura 57)

C_0 = Porcentaje en peso del carbono del acero en estado de suministro (ver tabla XI)

x = Distancia de penetración de la capa cementada de probetas Charpy L

D = Coeficiente de difusión del carbono en hierro gamma a 900 grados centígrados (según figura 28)

t = Tiempo de carburación (cementación)

$\text{ferr}(\beta)$ = Función de error (según tabla IV)

Tabla XIX. Datos teóricos y experimentales para determinar el $\%C_x$

Tipo de Acero	$\%C_0$	$\%C_S$ teórico	D teórico a 900° C (cm ² /s)	tiempo (segundos)	Penetración x (centímetros)	β	$ferr(\beta)$	$\%C_x$ experimental
16CrNi4	0,19	1,2	1E-07	1800	0,063445	2,3645	0,9986	0,19191
				10800	0,081900	1,2461	0,9205	0,27076
				21600	0,121142	1,3033	0,9340	0,25713
				32400	0,141950	1,2469	0,9405	0,25057
16MnCr5	0,21	1,2	1E-07	1800	0,065215	2,4304	0,9989	0,21758
				10800	0,107112	1,6297	0,9779	0,23824
				21600	0,130650	1,4056	0,9523	0,26341
				32400	0,156041	1,3707	0,9473	0,26833

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de C_x de la tabla XIX, son cercanas a la concentración de carbono inicial (estado de suministro) de los aceros en estudio, esto demuestra la veracidad de la segunda ley de Fick, y su aplicación para este trabajo.

Para la práctica es necesario conocer el coeficiente de difusión para proceder a cementar diferentes piezas mecánicas, dándole el tiempo necesario a cada pieza para obtener la capa cementada requerida. Los coeficientes de difusión del carbono en los aceros DIN 16CrNi4 y 16MnCr5 se muestran en la tabla XX, el análisis de dichos coeficientes se desarrolló a raíz de la función de error gaussiana de la segunda ley de Fick y despejando el coeficiente de difusión, en donde tenemos:

$$D = \frac{1}{4t} \left(\frac{x}{\beta} \right)^2 \quad (29)$$

Asumiendo que:

$D =$ Coeficiente de difusión del carbono en hierro gamma a 900 grados centígrados, experimental.

$C_x =$ C_0 concentración de la capa cementada, cercana del final de la zona de transición e inicio de la morfología propia del acero en estado de suministro.

$C_s =$ Porcentaje de concentración superficial del carbono en la mezcla carburante.

$C_0 =$ Porcentaje en peso del carbono del acero en estado de suministro (ver tabla XI).

$x =$ Distancia de penetración de la capa cementada de probetas Charpy L.

$t =$ Tiempo de carburación (cementación).

$\beta =$ constante de coeficiente de error, experimental.

Tabla XX. **Datos teóricos y experimentales para determinar el coeficiente de difusión (D)**

Tipo de Acero	$\%C_x$ teórico	$\%C_0$	$\%C_s$ teórico	tiempo (seg)	Penetración X (centímetros)	$ferr(\beta)$ experimental	β experi- mental	D experimental (cm^2/s)	D exp. Promedio (cm^2/s)
16CrNi4	0,19	0,19	1,2	1800	0,063445	1	2,7	7,67E-08	3,57E-08
				10800	0,081900	1	2,7	2,13E-08	
				21600	0,121142	1	2,7	2,33E-08	
				32400	0,141950	1	2,7	2,13E-08	
16MnCr5	0,21	0,21	1,2	1800	0,065215	1	2,7	8,10E-08	4,26E-08
				10800	0,107112	1	2,7	3,64E-08	
				21600	0,130650	1	2,7	2,71E-08	
				32400	0,156041	1	2,7	2,58E-08	

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la tabla XX servirán para conocer la profundidad de capa cementada a través del tiempo, usando la ecuación 29 y despejando x , el cual el resultado estará dado en centímetros (ecuación 30).

$$x = 2 \beta \sqrt{tD} \quad (30)$$

Asumiendo que:

$\beta = 2,7$ por tener un $ferr(\beta)$ igual a 1.

$t =$ Tiempo de carburación (cementación).

$D =$ Coeficiente de difusión, promedio o experimental que está en función del tiempo de la tabla XX.

Caso análogo se puede hacer despejando t para conocer el tiempo de cementación para una x profundidad de capa cementada.

Para el análisis de resultados de las capas cementadas en función del tiempo, se procedió a graficar dichos resultados de las probetas Charpy, para determinar la influencia que tienen en la orientación y distribución de los granos con el sentido longitudinal y transversal, de mecanizado de las probetas.

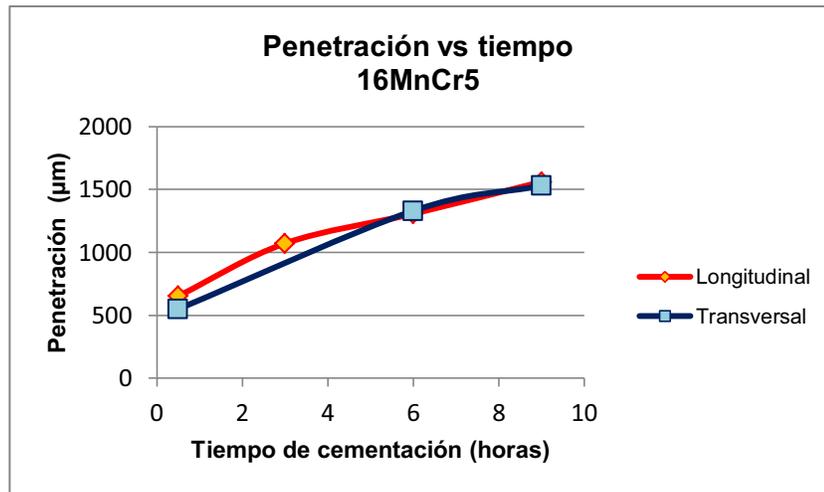
Los resultados graficados en las figuras 58, 59 y la tabla XXI indican una penetración bastante regular y homogénea para ambos aceros (L y T). Variaciones leves atribuibles a mayor bandeado en 16CrNi4 y mayor contenido en níquel en comparación al 16MnCr5.

Tabla XXI. **Resultados en la penetración de las capas carburadas**

Tiempo de cementación (horas)	DIN 16MnCr5		DIN 16CrNi4	
	Penetración, probetas Charpy L (μm)	Penetración, probetas Charpy T (μm)	Penetración, probetas Charpy L (μm)	Penetración, probetas Charpy T (μm)
0,5	652,1	549,2	634,4	563,8
3	1071,1	---	819,0	---
6	1306,5	1330,1	1211,4	1193,6
9	1560,4	1529,2	1419,5	1343,5

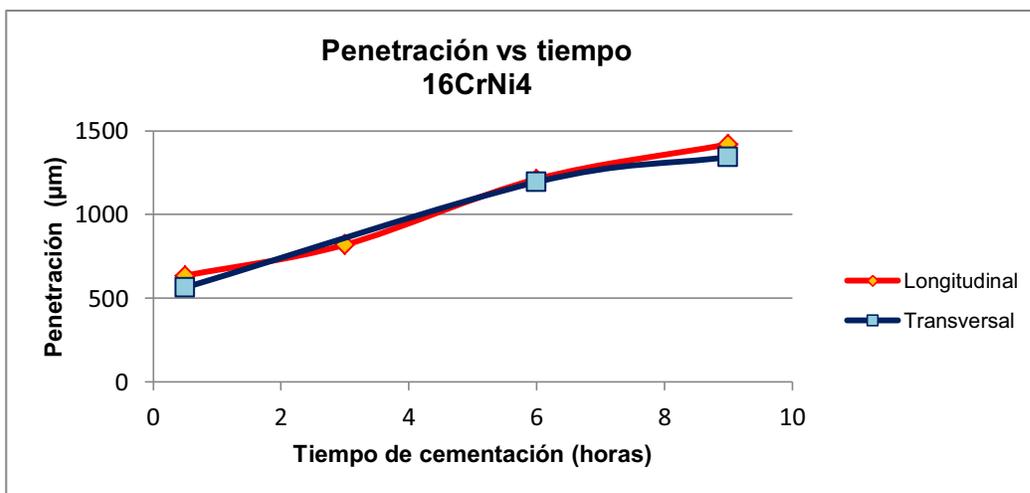
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Penetración de la capa cementada en función del tiempo para el acero DIN 16MnCr5 a 900°C**



Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Penetración de la capa cementada en función del tiempo para el acero DIN 16CrNi4 a 900°C**



Fuente: elaboración propia.

7.3. Resultados de dureza

La dureza es una propiedad fundamental de los materiales y está relacionada con la resistencia mecánica. La dureza puede definirse como la resistencia que opone un material a la penetración de un indentador bajo carga de compresión sobre la superficie.

7.3.1. Dureza superficial

El método para la obtención de los datos de dureza superficial, consistió en tomar 8 medidas de dureza por cada probeta Charpy, 2 en el borde por cada arista, para corroborar la homogeneidad del tratamiento térmico en cada probeta; se trabajó con dureza Rockwell-A para las probetas tratadas térmicamente mientras que para las probetas en estado de suministro con escala Rockwell-B; por razones que la norma ASTM E18 estipula (tabla XXII).

Del borde hacia la toma de dureza existe entre 4 y 5 milímetros de distancia. La dureza obtenida en los aceros (estado de suministro), fue de 86 dureza Rockwell-B en el acero 16MnCr5 y 79,1 dureza Rockwell-B para el acero 16CrNi4, tanto para probetas Charpy L y T. Se puede observar los resultados de dureza superficial en la tabla XXIII, con sus respectivas comparaciones entre aceros para probetas Charpy L y T. Gráficos se muestran en las figuras 60 y 61.

Tabla XXII. **Escala de dureza Rockwell**

Escala	Indentador	Carga Kgf	Aplicaciones típica de escala
A	Diamante	60	Carburos cementados, acero delgado y acero endurecido superficial
B	Bola 1/16 pulgada	100	Aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio, hierro maleable, etc

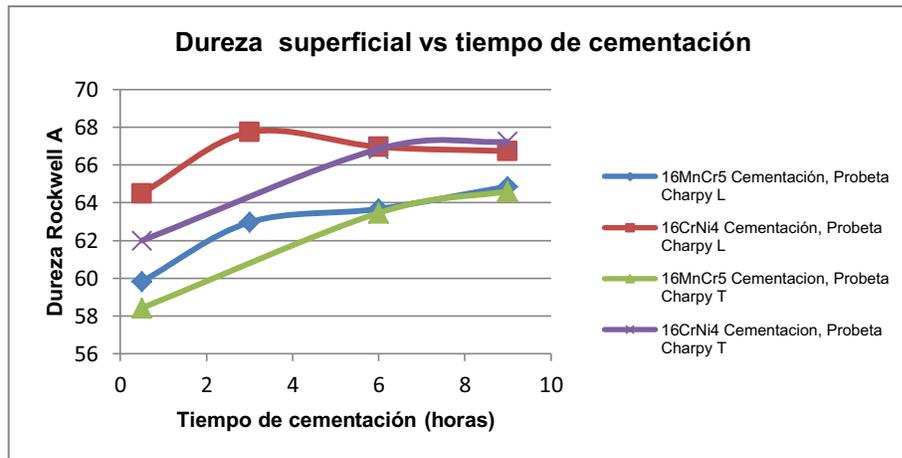
Fuente: *ASTM E0018-05E01 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*. p. 4.

Tabla XXIII. **Resultados del ensayo de dureza superficial para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4**

Probetas Charpy	Tiempo de cementación (horas)	Dureza HRA [HRC]					
		Cementación		Cementación y temple		Cementación temple y revenido	
		16MnCr5	16CrNi4	16MnCr5	16CrNi4	16MnCr5	16CrNi4
L	0,5	59,8	64,5	81,8 [61]	81,9 [61]	80,3 [58]	80,4 [59]
	3	63,0	67,7	80,2 [58]	79,1 [56]	79,5 [57]	78,7 [55]
	6	63,7	67,0	80,9 [59]	80,1 [58]	79,1 [56]	78,2 [54]
	9	64,9	66,7	79,9 [57]	77,0 [52]	78,2 [54]	75,3 [49]
T	0,5	58,4	62,0	82,1 [62]	83,5 [64]	81,4 [60]	80,8 [59]
	6	63,5	66,9	79,2 [56]	78,3 [55]	78,3 [55]	77,4 [53]
	9	64,6	67,2	78,4 [55]	75,5 [49]	78,3 [55]	77,5 [53]

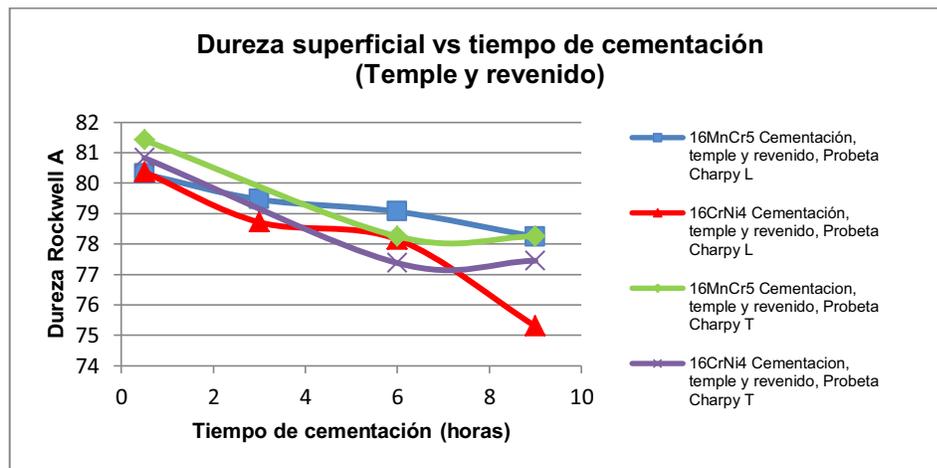
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. Dureza superficial en función del tiempo de cementado para ambos aceros. Probetas Charpy L y T



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Dureza superficial en función del tiempo de cementado (temple y revenido) para ambos aceros. Probetas Charpy L y T



Fuente: elaboración propia.

7.3.2. Perfil de dureza borde-núcleo

El perfil de dureza permite determinar el comportamiento del material, ya sea superficial o internamente; en este caso, frente a un proceso de cementación, temple y revenido, en donde se determina el efecto generado por la difusión del carbono en los aceros DIN 16MnCr5 y DIN 16CrNi4.

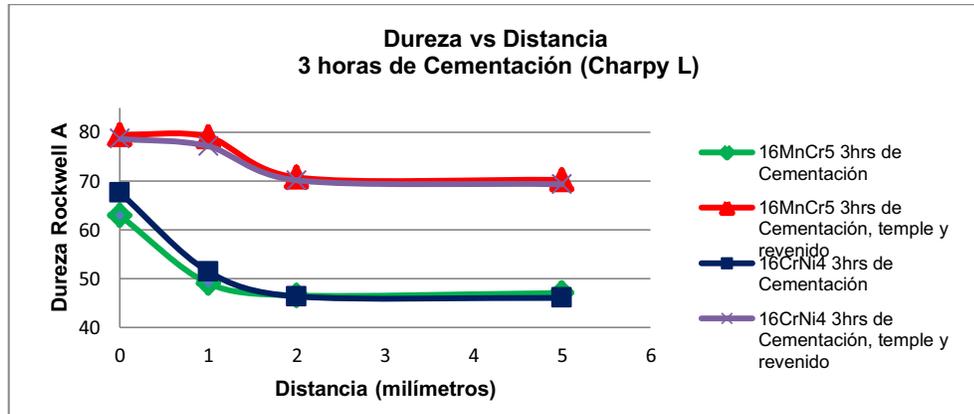
El método para la obtención de los datos consistió en trazar puntos desde el borde de una cara superficial con dirección al núcleo de la muestra seleccionada. Ver resultados en la tabla XXIV. Las figuras 62, 63 y 64 muestran gráficamente la evolución de la dureza acorde a la penetración de carbono desde la superficie y la penetración del temple acorde a la composición química del acero.

Tabla XXIV. **Resultados del ensayo de perfil de dureza para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4**

Probeta Charpy	Tiempo de cementación (horas)	Distancia del borde al núcleo (mm)	Dureza HRA [HRC]					
			Cementación		Cementación y temple		Cementación, temple y revenido	
			16MnCr5	16CrNi4	16MnCr5	16CrNi4	16MnCr5	16CrNi4
L	3	0	63,0	67,7	80,2 [58]	79,1 [56]	79,5 [57]	78,7 [55]
		1	49,1	51,5	78,6 [55]	78,1 [54]	79,1 [56]	77,2 [53]
		2	46,6	46,4	72,0 [43]	68,1 [35]	70,8 [41]	70,2 [40]
		5	47,1	46,1	70,9 [41]	66,2 [32]	70,3 [40]	69,4 [38]
	6	0	63,7	67,0	80,9 [59]	80,1 [58]	79,1 [56]	78,2 [54]
		1	58,8	56,8	78,8 [56]	77,0 [52]	78,6 [55]	76,5 [51]
		2	46,7	44,3	69,5 [38]	69,3 [38]	71,7 [42]	70,2 [39]
		5	43,1	43,4	66,3 [32]	66,5 [32]	69,5 [38]	68,2 [36]
T	6	0	63,5	66,9	79,2 [56]	78,4 [55]	78,3 [55]	77,4 [53]
		1	56,1	52,3	78,2 [54]	77,1 [52]	75,7 [50]	76,0 [50]
		2	46,8	45,6	69,6 [38]	69,2 [38]	68,8 [37]	68,2 [36]
		5	43,0	43,7	68,1 [35]	66,4 [32]	65,3 [30]	64,9 [29]

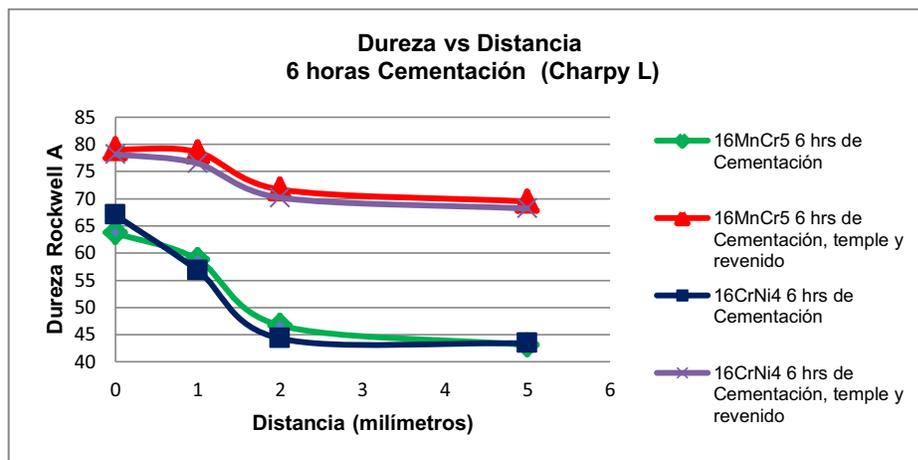
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Perfil de dureza en función de la distancia en ambos aceros, 3 horas de cementación, templado y revenido. Probetas Charpy L**



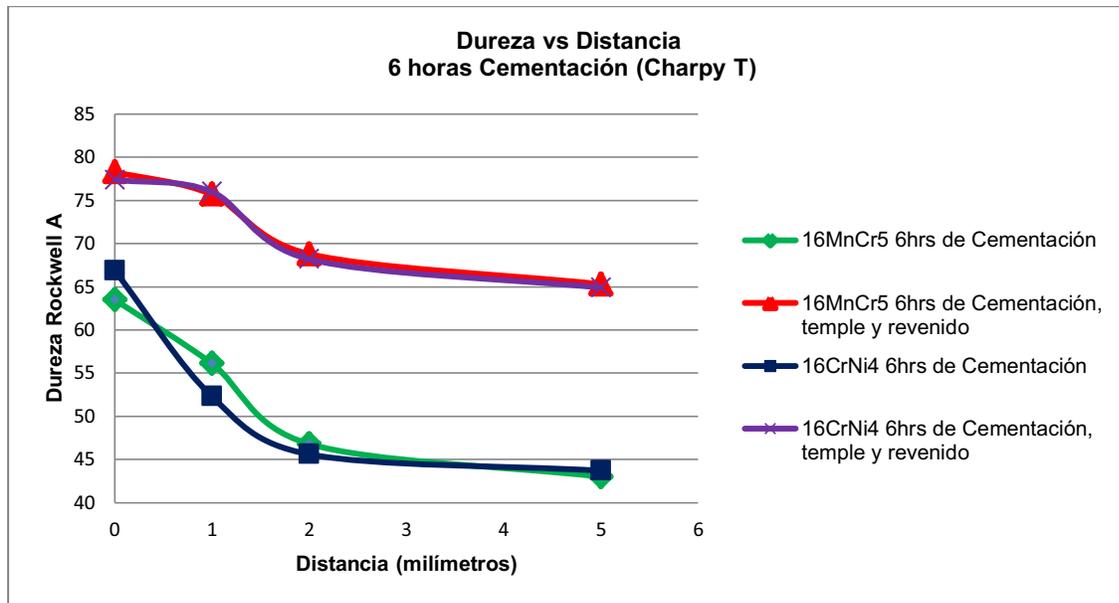
Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Perfil de dureza en función de la distancia en ambos aceros, 6 horas de cementación, templado y revenido. Probetas Charpy L**



Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Perfil de dureza en función de la distancia en ambos aceros, 6 horas de cementación, templado y revenido. Probetas Charpy T**



Fuente: elaboración propia.

7.4. Resultados de tenacidad ensayo de impacto Charpy

El ensayo de impacto determina la energía absorbida en la deformación y destrucción de la probeta. Se determina por la energía potencial de un péndulo en el momento inicial (elevación a un cierto ángulo), energía que es transformada en cinética y transfiere al acero de la probeta durante el golpe de impacto.

Las probetas Charpy tipo A, se manufacturaron según la norma ASTM E23, con entalla en V, se ensayaron a temperatura ambiente. En esta etapa, ya se tomaron las muestras para realizar las metalografías, por ende, las probetas

tienen la medida exacta de 55 milímetros de largo, requisito de dicha norma. Los resultados de las probetas en las diferentes etapas de los tratamientos térmicos se muestran en la tabla XXV, dichos resultados fueron restados por el valor de vacío del Medidor de Impacto.

Es importante conocer la tendencias que tiene el tiempo de cementación en las diferentes etapas de los tratamientos térmicos con la energía absorbida de la probetas. En las figuras 65 a 72 se pueden apreciar dichas tendencias. Se hace referencia que los valores de la tabla XXVI en el tiempo de cementación de 0 horas y su respectiva tenacidad corresponden a las probetas en estado de suministro.

Tabla XXV. **Resultados del ensayo de impacto para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4, de probetas Charpy tipo A**

Ensayo de impacto, según ASTM E0023-05 Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.			
Probeta Charpy tipo A			
Valor de vacío	1,96 Joules	Seccionado longitudinalmente	Seccionado transversalmente
	Tipo de acero	Joules	Joules
Estado de suministro	16MnCr5	45,11	9,81
	16CrNi4	141,22	49,03
0,5 horas de cementación	16MnCr5	20,59	33,34
	16CrNi4	62,76	29,42
0,5 horas de cementación y temple	16MnCr5	4,90	5,88
	16CrNi4	4,90	6,86
0,5 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	5,88	4,90
	16CrNi4	3,92	3,92
3 horas de cementación	16MnCr5	3,92	
	16CrNi4	33,34	
3 horas de cementación y temple	16MnCr5	5,88	
	16CrNi4	5,88	
3 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	5,88	
	16CrNi4	3,92	
6 horas de cementación	16MnCr5	2,94	2,94
	16CrNi4	17,65	15,69
6 horas de cementación y temple	16MnCr5	5,88	4,90
	16CrNi4	3,92	4,90
6 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	3,92	3,92
	16CrNi4	2,94	3,92
9 horas de cementación	16MnCr5	3,92	5,88
	16CrNi4	27,46	15,69
9 horas de cementación y temple	16MnCr5	3,92	4,90
	16CrNi4	2,94	3,92
9 horas de cementación, temple y revenido	16MnCr5	3,92	3,92
	16CrNi4	2,94	3,92

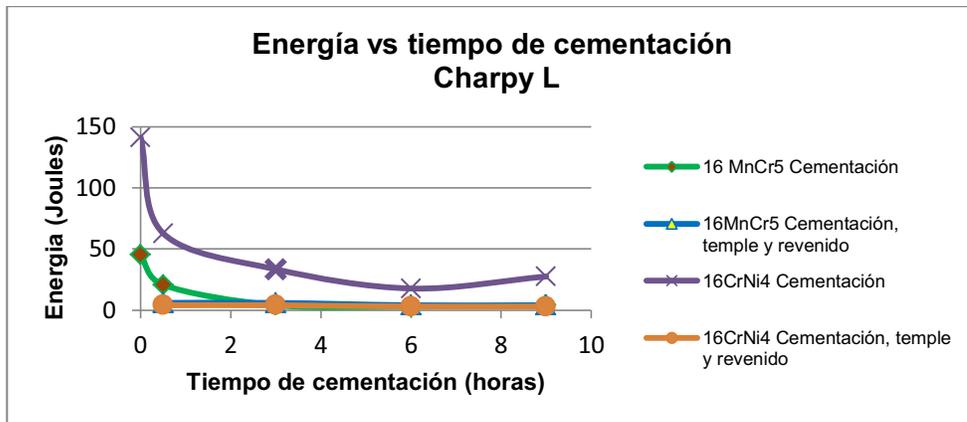
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados del ensayo de impacto para los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4 y su relación con la capa cementada y tiempo de cementación**

Probeta Charpy	Tipo de acero	Tiempo de cementación (horas)	Penetración μm	Tenacidad en cementación (Joules)	Tenacidad en cementación y temple (Joules)	Tenacidad en cementación, temple y revenido (Joules)
L	16MnCr5	0	0	45,11	----	---
		0,5	652,15	20,59	4,90	5,88
		3	1071,12	3,92	5,88	5,88
		6	1306,50	2,94	5,88	3,92
		9	1560,41	3,92	3,92	3,92
	16CrNi4	0	0	141,22	---	---
		0,5	634,45	62,76	4,90	3,92
		3	819,00	33,34	5,88	3,92
		6	1211,42	17,65	3,92	2,94
		9	1419,50	27,46	2,94	2,94
T	16MnCr5	0	0	9,81	---	---
		0,5	549,25	33,34	5,88	4,90
		6	1330,10	2,94	4,90	3,92
		9	1529,25	5,88	4,90	3,92
	16CrNi4	0	0	49,03	---	---
		0,5	563,81	29,42	6,86	3,92
		6	1193,65	15,69	4,90	3,92
		9	1343,59	15,69	3,92	3,92

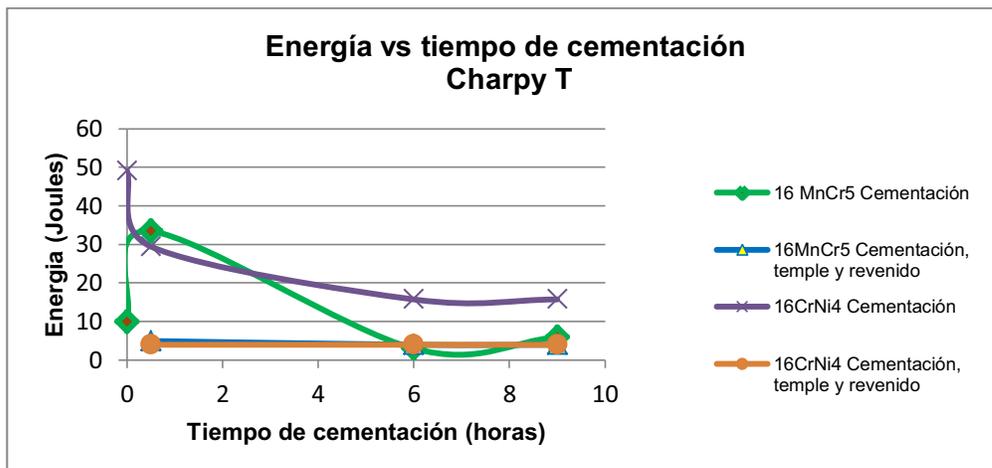
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para ambos aceros. Probetas cementadas, templadas y revenidas. Probetas Charpy L**



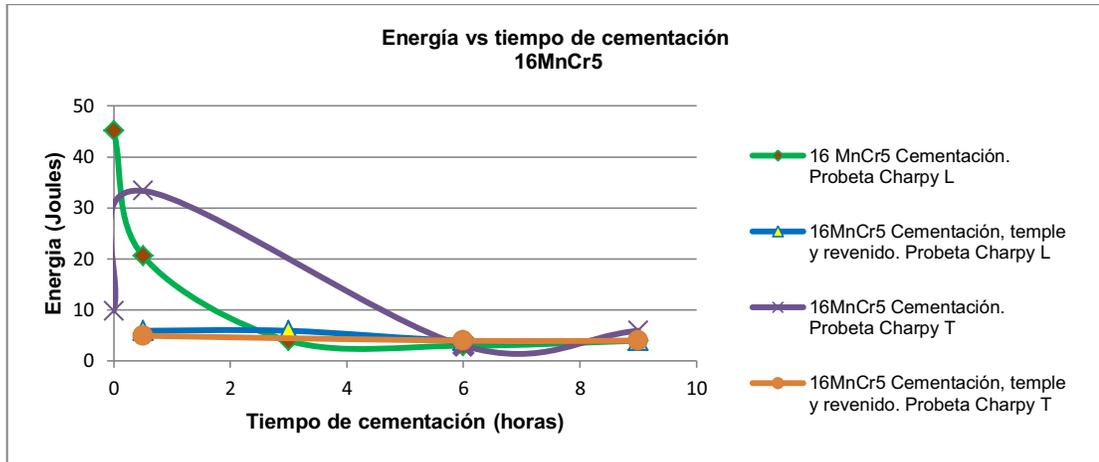
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **Energía absorbida en función de la capa cementada para ambos aceros. Probetas cementadas, templadas y revenidas. Probetas Charpy T**



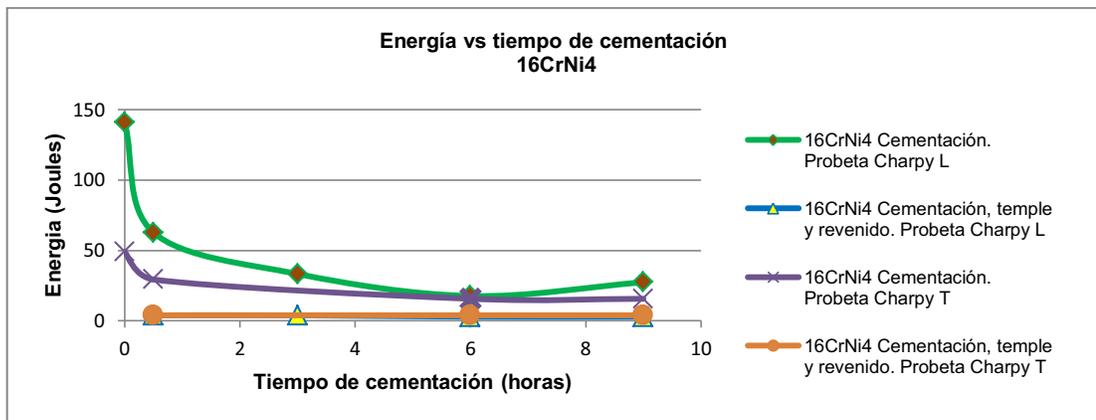
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16MnCr5. Probetas cementadas, templadas y revenidas**



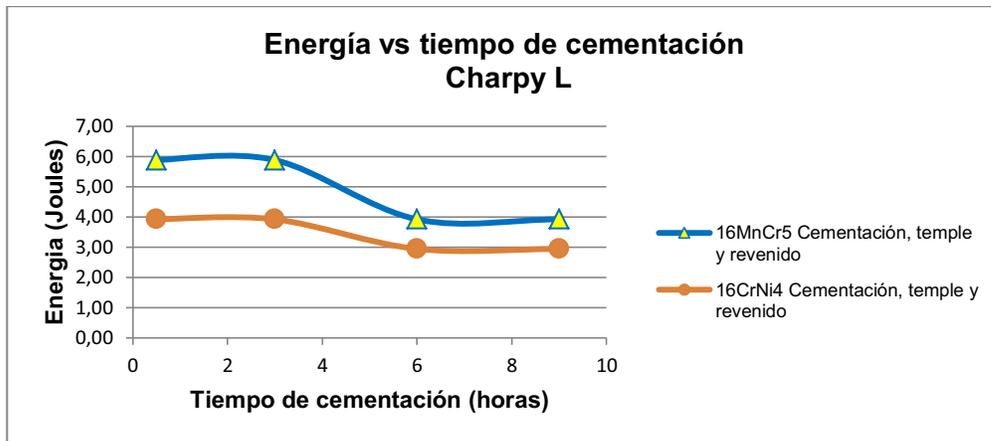
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16CrNi4. Probetas cementadas, templadas y revenidas**



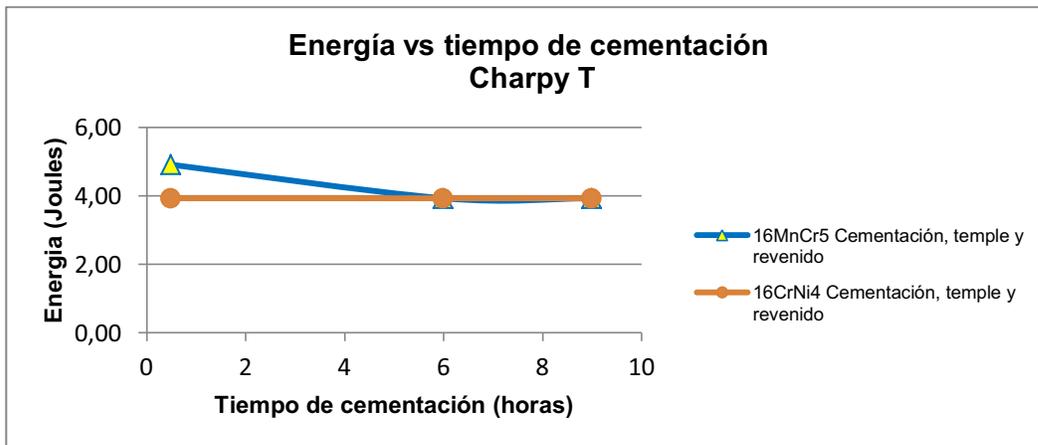
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para ambos aceros. Probetas templadas y revenidas. Probetas Charpy L**



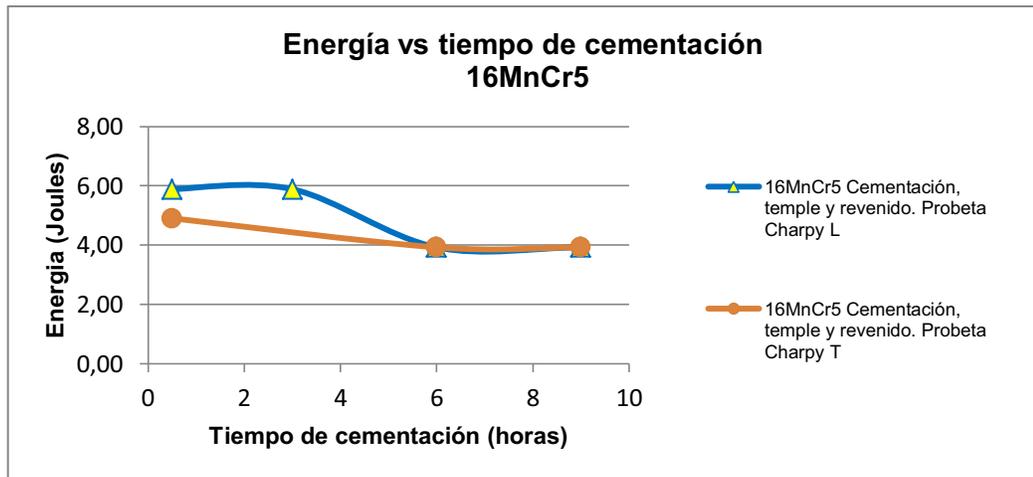
Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para ambos aceros. Probetas templadas y revenidas. Probetas Charpy T**



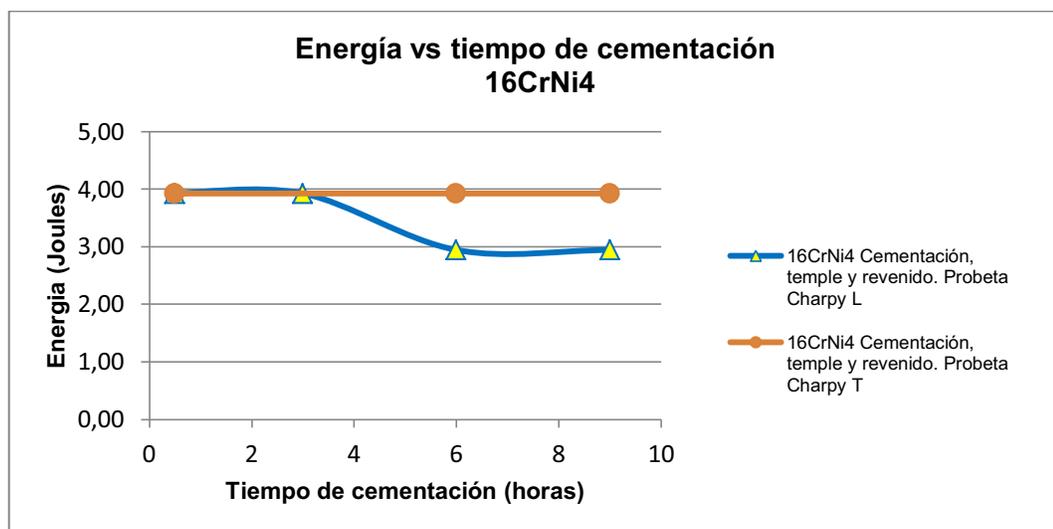
Fuente: elaboración propia.

Figura 71. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16MnCr5. Probetas templadas y revenidas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 72. **Energía absorbida en función del tiempo de cementación para un acero DIN 16CrNi4. Probetas templadas y revenidas**



Fuente: elaboración propia.

7.5. Fractografías

El propósito de fractografía consiste en analizar la superficie de fractura de modo de relacionar las características de la topografía de fractura con las causas y los mecanismos que pudieron provocar la fractura. El microscopio electrónico de barrido MEB (en su sigla en inglés SEM), fue el instrumento utilizado para realizar las fractografías y consiste en una columna óptica electrónica que va montada en una consola principal, un control, sistema de visualización, una fuente de poder y caja donde está ubicada una bomba de vacío.

El MEB está diseñado para funcionar como microscopio capturador de imágenes. La incorporación de un espectrómetro de dispersión de energías (en su sigla en inglés EDS) permite realizar microanálisis químico en zonas o puntos específicos de interés. El MEB funciona mediante un filamento de tungsteno que genera electrones, éstos apuntan o bombardean en línea recta la superficie de la pieza a examinar.

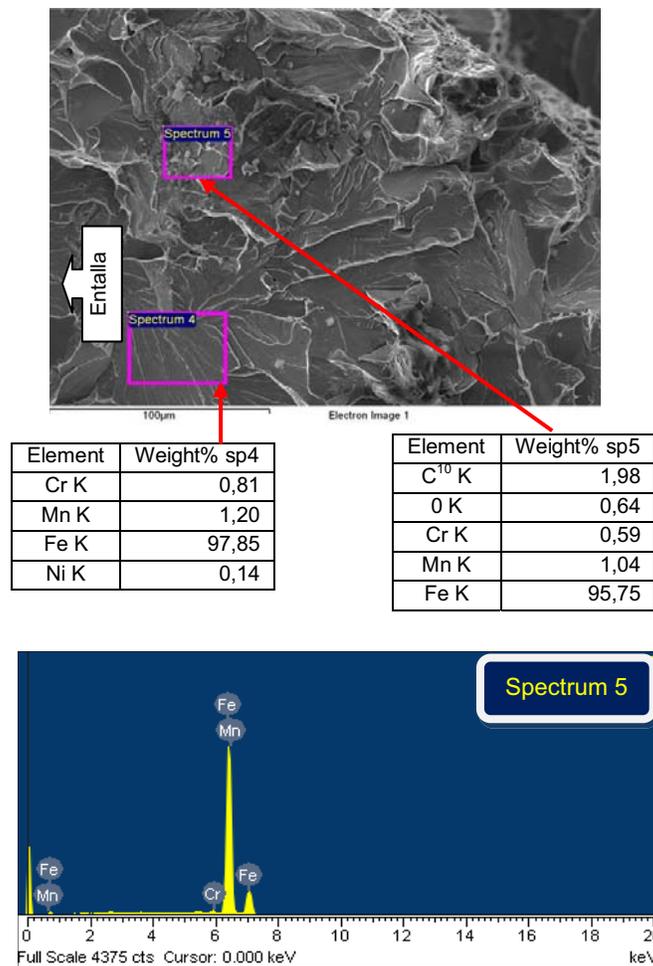
La pieza previamente debe ser metalizada con un película de oro para mejorar su conductividad (cuando ésta se requiera, en materiales con baja conductividad) de un espesor entre 0,04 y 0,006 micrones en un equipo adicional, en donde la pieza se introduce en una cámara con gas inerte, donde se hace pasar un diferencial de potencia entre la pieza y una placa de oro en sentido opuesto por un tiempo determinado (dicha película no fue necesaria).

Los electrones que son bombardeados sobre la pieza generan diferentes longitudes de onda por el electrón arrancado de la muestra, las cuales de cierto rango son captadas y transformadas en imágenes que permiten su manipulación. El EDS, determina por la capacidad de éste en identificar

mediante la energía de las capas de valencia de cada elemento, principalmente la primera capa (K) y con menor precisión la segundas (L).

Se tomaron las muestras más representativas de las probetas Charpy L del ensayo de impacto, para esta etapa de resultados.

Figura 73. **Fractografía, 16MnCr5. Estado en suministro. (SEM y EDS)**

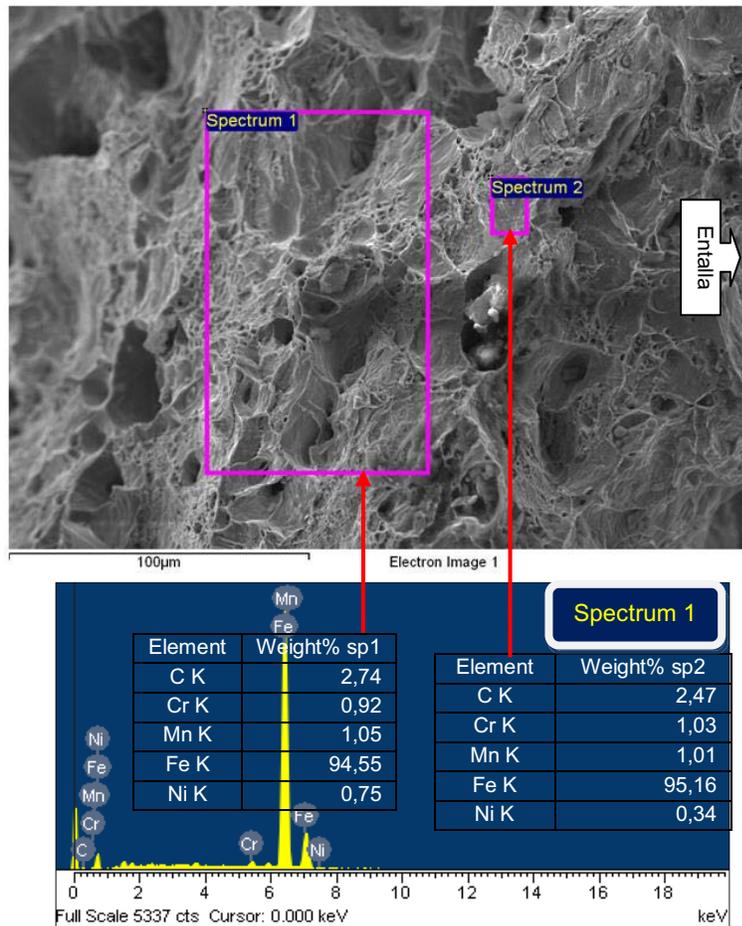


Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

¹⁰ Los elementos Carbono “C” y Oxígeno “O”, no son datos relevantes, por tener un radio atómico, demasiado pequeños para que el espectrómetro de dispersión de energías (EDS) obtenga datos cuantificados exactos.

La figura 73, muestra fractura frágil con presencia de Clivaje (*Cleavage*). Microfractografía tomada en el núcleo x500.

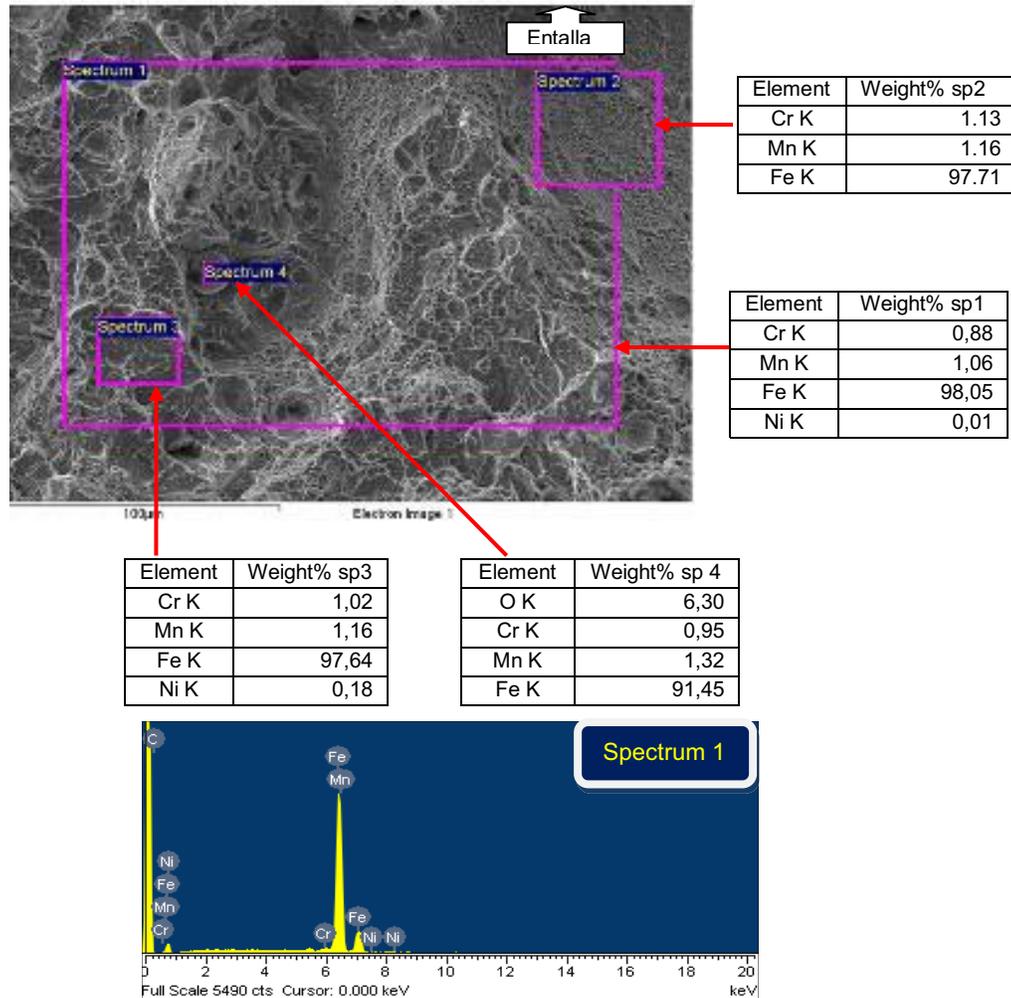
Figura 74. **Fractografía, 16CrNi4. Estado en suministro. (SEM y EDS)**



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

La figura 74, muestra fractura de carácter dúctil con presencia de hoyuelos (*Dimples*) en forma de copas parabólicas, y microcavidades. Microfractografía tomada en el borde x500.

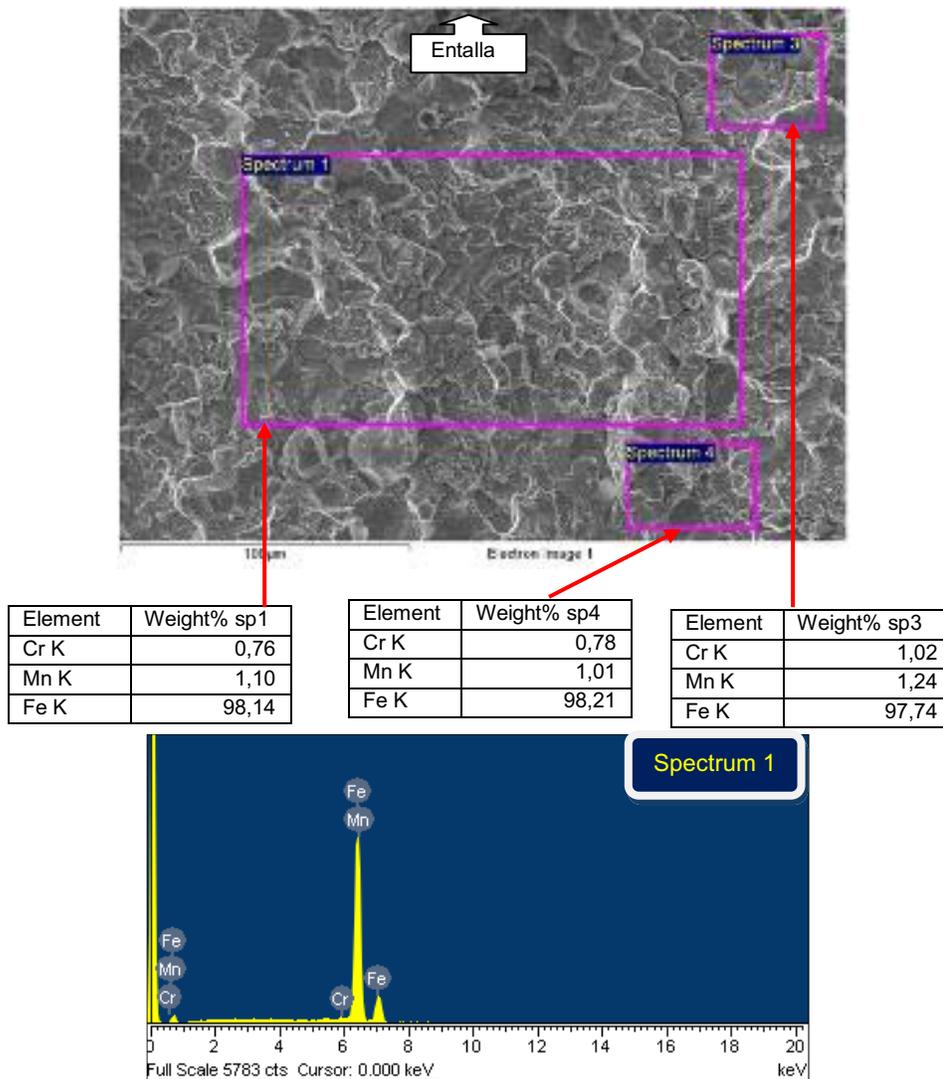
Figura 75. Fractografía, 16MnCr5. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Núcleo x500



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

En la figura 75, la superficie analizada muestra fractura de carácter mixto. Presencia de clivaje en zona de análisis del espectro 3 (sp3), presencia de óxido en el sp4 que origina el hoyuelo alrededor de él, microporos en el sp2.

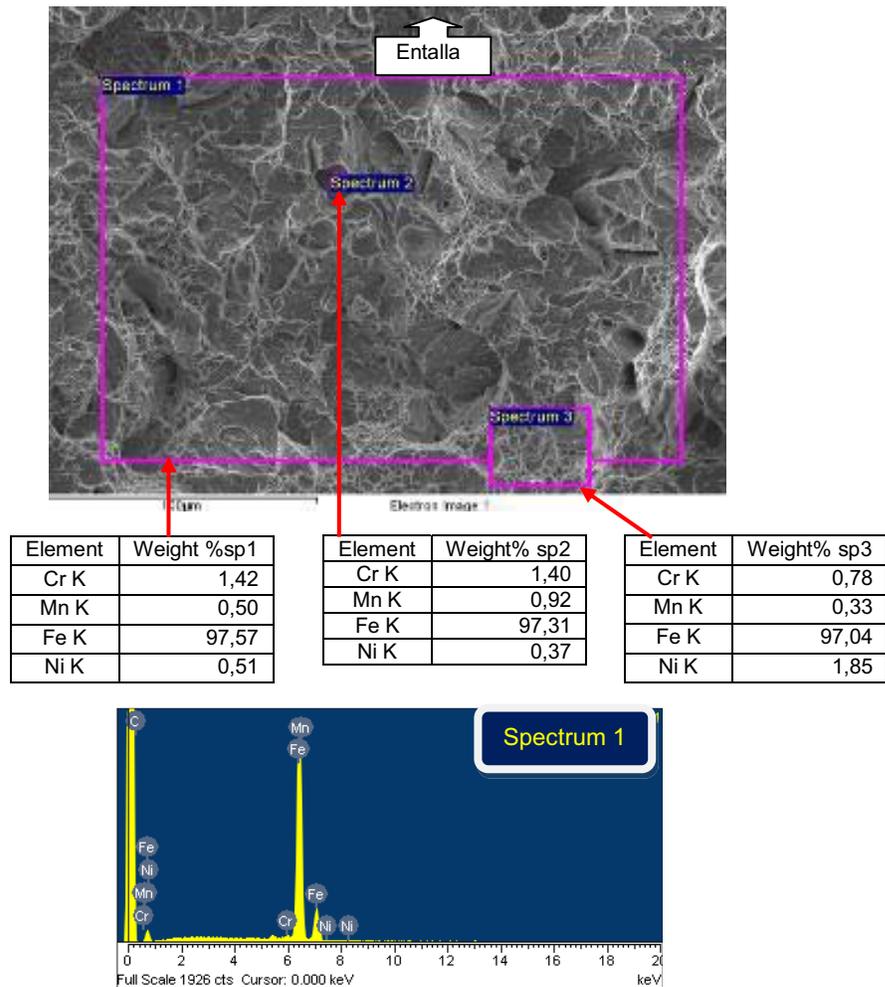
Figura 76. **Fractografía, 16MnCr5. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Borde x500**



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

La figura 76, presenta la zona del borde, con mayor presencia de fractura intergranular, se visualiza el tamaño de grano de la austenita alcanzado. Los EDS medidos, revelan que el manganeso está homogéneamente distribuido, a diferencia del cromo que muestra variaciones punto a punto.

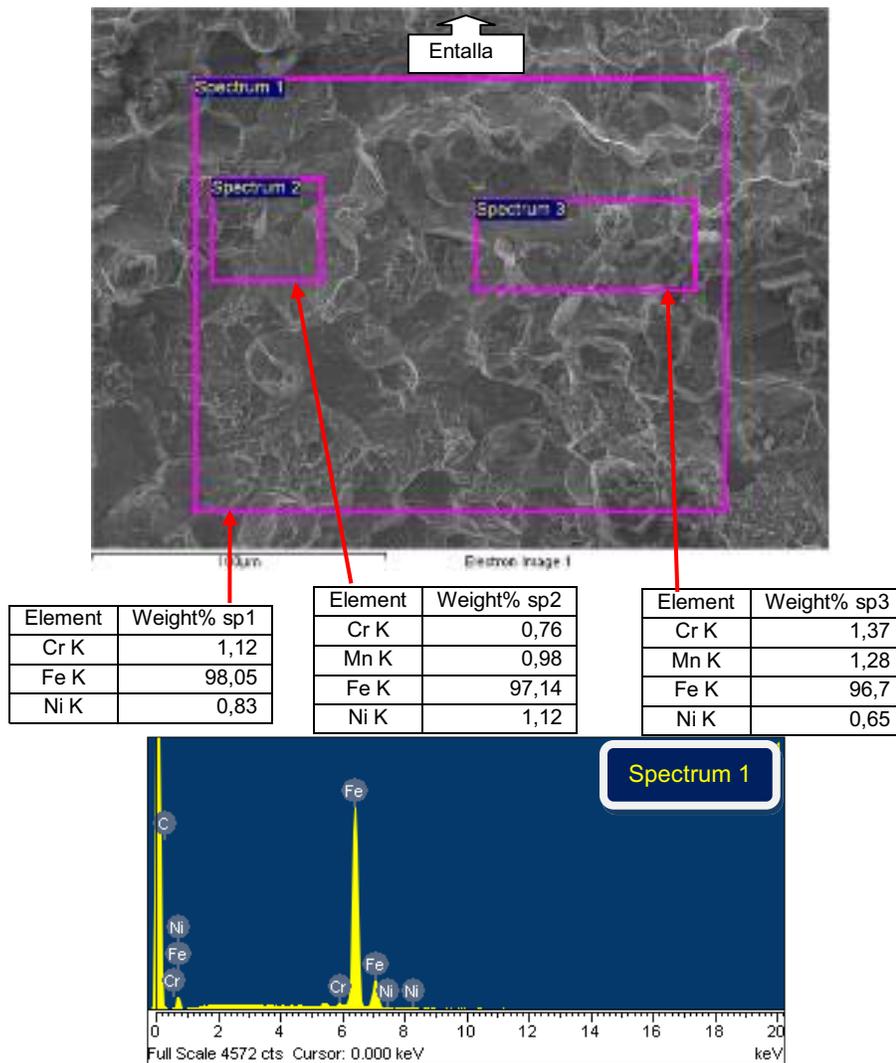
Figura 77. Fractografía, 16CrNi4. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Núcleo x500



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

La figura 77, muestra la zona del núcleo de la probeta. Evidencia superficie de fractura mixta con presencia de clivaje (frágil) y de hoyuelos (dúctil). Los microanálisis EDS confirman los elementos Cr, Ni y Mn en este acero. Ni y Mn se observan bastante más variables punto a punto.

Figura 78. Fractografía, 16CrNi4. 6 horas de cementación y temple. (SEM y EDS). Borde x500



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

La figura 78, muestra la zona del borde de la probeta, con fractura del tipo intergranular, se visualiza el tamaño de grano de la austenita alcanzado, mayor en comparación con la figura 76. Presentando de esta manera, como resultado final (cementación-temple), mayor fragilidad para este acero.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se discutirá brevemente metodologías recientes, realizadas en investigaciones para los aceros 16MnCr5 y 16CrNi4 como también en aceros al bajo carbono; en la parte de innovaciones en tratamientos térmicos, soldadura, mecanizado; seguido de ésto se discutirán los resultados de este trabajo.

Existen procedimientos de soldaduras para los aceros 16MnCr5, teniendo cambios significativos en la zona afectada térmicamente (ZAT) como también la utilización del metal de aporte en la soldadura (Centinkaya, Cemil and Arabaci, Ugur, *Flash butt welding application on 16MnCr5 chain steel and investigations of mechanical properties*, 2005). Para la cementación, este caso no es muy práctico para realizarlo dado que existe morfología distinta en el borde y en el núcleo, que provoca la heterogeneidad de dureza en la pieza al momento de la soldadura. Lo más conveniente es remplazar la pieza completa (engranaje, eje, piñón, válvula, etc.), como medida de seguridad para no dañar los equipos como la integridad humana.

En el trabajo de Guagliano, M.; Riva, E. y Guidetti, M., 2000, demuestran que, el mayor desgaste en un engranaje sucede en el flanco de ataque, creado por el impacto entre dientes como también por las marcas producidas en el proceso de mecanizado, que provocan microfisuras. La capa cementante en esta zona, sufre de picaduras y propagación de grietas que minimizan la vida útil del engranaje. Los impactos en el flanco de ataque se propagan hasta llegar al radio del pie del diente, dado que en esa zona, se encuentran concentraciones de esfuerzos.

La literatura nos hace referencia que el oxígeno dentro de la caja en la cementación con materiales sólidos es necesario para que se produzca el carbón naciente en la descomposición del monóxido de carbono y los catalizadores presentes. Existen muchos métodos más para la cementación, como lo son, cementación en líquido y en gas; ahora bien, el costo es relevante para la fabricación de piezas requeridas, por el equipo y los materiales involucrados, como también la influencia del tiempo de cementación y su temperatura de difusión.

Se ha hecho investigación para un sistema de baja presión para conocer la difusión del carbono en las concentraciones de acetileno, etileno e hidrógeno a una temperatura de 950 grados centígrados y después enfriando a temperatura ambiente por corriente de nitrógeno a una presión de 0,5 megapascales (Gorockiewicz, R., *The kinetics of low-pressure carburizing of alloy steels*, 2011).

Es de suma importancia establecer en la cementación, la temperatura a la que se va realizar el temple, por tener diferentes fases en la capa cementada y no olvidando la del núcleo, propio del acero base; en la zona hipereutectoide no tendrá mucha importancia si la temperatura del temple sea sobre la A_{cm} o abajo de la misma; si es sobre la A_{cm} se tendrá como resultado la máxima saturación de martensita; si es entre la A_{cm} y A_1 como se realizó en este trabajo, se tendrá como resultado un poco menos de la máxima saturación de martensita como también la aparición de cementita.

Ambas tienen buenas propiedades a la resistencia al desgaste; sin embargo, la zona hipoeutectoide estará afectada si la temperatura es sobre la A_3 por que habrá un crecimiento de grano alto, que lo hará algo más frágil al núcleo, disminuirá la tenacidad, por ende se tiene que llegar a una temperatura

de austenización que considere ambas zonas. Maleque, M. A.; Poon, Y. M. y Masjuki, H. H., 2004, recopilaron datos del comportamiento del acero AISI 3115, sometiendo probetas a temple en agua y estableciendo temperaturas de austenización entre la A_1 y A_3 ; los resultados dan conocer el comportamiento mecánico que tiene la ferrita en combinación con la martensita.

Los métodos para realizar el temple y revenido como lo son el *martempering* y el *austempering*, que son procesos llevados a cabo para encontrar estructuras bainíticas y martensíticas, hoy en día están cambiando.

Se ha descubierto un nuevo método para obtener una formación de bainita sin carburo, partiendo de un revenido entre la martensita inicial y final (Edmonds, D. V.; He, K; Rizzo, F. C.; De Cooman, B. C.; Matlock, D. K. and Speer, J. G. *Quenching and partitioning martensite - A novel steel heat treatment*. 2006), donde la estructura final del proceso va a depender mucho del requerimiento de la pieza, dado que cada estructura lleva consigo propiedades mecánicas y físicas que lo hace característico para el resultado final. Para este trabajo se realizó el método convencional de templado y revenido.

Los hornos para tratamientos térmicos, que alcanzan temperaturas alrededor de 1 200 grados centígrados; si bien, son muy conocidos, sirven para realizar tratamientos térmicos en piezas mecánicas con dimensiones establecidas según el tamaño del horno; sin embargo dentro de la industria existen piezas de gran dimensión que necesitan un pre y post tratamiento térmico, donde los hornos no son muy prácticos. Para este caso, es que existen otros métodos para elevar la temperatura a zonas determinadas, como el método por flama y por inducción.

En la actualidad hay métodos más eficientes y adecuados para realizar endurecimiento superficial, uno de los cuales consiste en el tratamiento térmico de láser. Se han calculado mapas de procesos para el tratamiento térmico de diodo láser, identificando una región tratable de calor en términos de intensidad del láser y el tiempo de interacción con un modelo de conducción de calor (Ki, Hyungson and So, Sangwoo, *Process map for laser heat treatment of carbon steels*, 2012).

Según los resultados de la tabla XX, la difusión del carbono en el acero 16CrNi4 es menor que la del 16MnCr5, esto debido de que el primero tiene un mayor contenido de Ni, no tan significativo en peso, pero aun así influyó en la difusión, a pesar que los otros elementos aleantes no difieren mucho en contenido de peso (ver tabla XI). Se comprobó de esta manera que los elementos disueltos en la ferrita como en este caso el níquel, disminuye notablemente la difusión del carbono en el Fe_γ

Se hace referencia que la ecuación 30, servirá como base de conocimiento para obtener el tiempo ó la profundidad de la capa cementada requerida en los aceros DIN 16MnCr5 y DIN 16CrNi4, tomando como referencia de Coeficiente de Difusión, los presentes en la tabla XX; siempre y cuando, la temperatura de cementación, sea del orden de 900 grados centígrados, temperatura a la cual se desarrollaron las pruebas en este trabajo.

En las figuras 58 y 59, se puede apreciar la tendencia de la difusión del carbono a través del tiempo, donde la pendiente del gradiente va disminuyendo conforme pasa el tiempo, esto debido a que el borde de la capa cementada, la solubilidad del carbono en el Fe_γ es máxima, formando una zona que corresponde al acero hipereutectoide que obstaculiza la difusión del carbono. La literatura nos hace referencia que la difusión de elementos sucede de una

concentración mayor a una menor. Se puede observar que se obtiene la misma tendencia de difusión en probetas seccionadas con orientación longitudinal como también transversal.

En estado de suministro el 16MnCr5 tiene 86 en dureza Rockwell-B (52,8 dureza Rockwell-A) mientras tanto el 16CrNi4 con 79,1 en dureza Rockwell-B (48,9 dureza Rockwell-A) en donde la figura 60 demuestra una tendencia en el aumento de dureza en la capa carburada conforme aumenta el tiempo de cementación, esto es debido al aumento de cementita y otros carburos en el borde. La dureza del 16CrNi4 es entre 2 y 7 por ciento mayor que el 16MnCr5 en la parte del cementado debido a que el níquel al igual que el cromo ayuda a aumentar la dureza y bajar la temperatura crítica A_3 , no obstante también retiene austenita.

En la figura 61 se observa los resultados de dureza del temple y revenido, alcanzando durezas máximas para ambos aceros, entre 80,3 y 81,8 dureza Rockwell-A (58 y 61 dureza Rockwell-C), marcando en ambos aceros un descenso mientras se aumentó el tiempo de cementación, obteniendo como descenso mínimo entre 75,5 y 78,4 dureza Rockwell-A (49 y 55 dureza Rockwell-C) para las 9 horas de cementación seguido del temple y revenido, esto debido a la descarburización presente en ciertas regiones como también el aumento de austenita retenida pese a la existencia de carburos.

El revenido tuvo como fin primordial aliviar tensiones residuales en la superficie de la capa cementada, el tiempo y la temperatura que se le dió al mismo, fue el necesario, mayor tiempo y temperatura involucraría la disminución de la dureza en la superficie.

En las figuras 62, 63 y 64 se observan los perfiles de dureza para ambos aceros; medidos desde la superficie de la capa cementada hasta el núcleo, de las muestras tomadas de las probetas Charpy L y T; en la cementación se observa una curva suave que indica la disminución de la dureza, con esto se puede comprobar las diferentes fases que se presentan en la capa cementada, desde una zona hipereutectoide donde se hace presente la cementita en combinación con la perlita y la otra zona hipoeutectoide, con ferrita en combinación con la perlita.

Mientras que en el temple y revenido se observa un cambio brusco de la dureza, marcando de esta manera, la zona con mayor dureza (capa superficial martensítica) y la zona con mayor tenacidad (núcleo). El propósito de la construcción del perfil de dureza borde-núcleo, sirvió para obtener una idea de la disminución de dureza a través de la superficie y el núcleo, de lo que será en alguna pieza mecánica de grandes dimensiones, en el cual, el núcleo puede presentar una dureza menor a medida que se aleja de la capa cementada-templada y revenida.

Las durezas alcanzadas y el comportamiento del perfil de ambos aceros, no son muy distintas, según los datos recopilados (tabla XXIV) se puede afirmar con esto, que la templabilidad para ambos aceros es muy similar.

Las figuras 65 a la 72, demuestran la energía absorbida de los aceros en el ensayo de impacto en probetas Charpy L y T. En la figura 65, el 16CrNi4 en la etapa de cementación tiende a absorber más energía en comparación al 16MnCr5. A medida que la penetración del carbono avanza con el tiempo en la cementación, la tenacidad de ambos aceros va descendiendo en donde se hace notar que la capa cementada influye de gran manera. En las siguientes etapas, temple y revenido, ambos aceros para las diferentes horas de cementación,

muestran que la tenacidad disminuye aun más entre 2,9 y 6,8 joules para ambos aceros, marcando así una similitud en los resultados finales entre los dos aceros microaleados.

En la figura 66 aparece una anomalía de absorción de energía para el acero 16MnCr5, en estado de suministro la tenacidad es de 9,81 joules mientras que, a 0,5 horas de cementación es de 33,34 joules, lo cual podría atribuirse a la aparición de ferrita *Widmanstätten* debido a microsegregaciones químicas que propició la heterogeneidad de la morfología del acero en estado de suministro (ver figura 54a).

En las figuras 67 y 68, se presenta la influencia que tienen las probetas mecanizadas en forma longitudinal y transversal en los diferentes aceros; en la cementación se ve marcada esta influencia, por lo que, el resultado final (cementación-temple y revenido), será el mismo para las diferentes orientaciones de mecanizado.

En la figura 73 se puede apreciar la fractografía del acero 16MnCr5 en estado de suministro, la fractura es de carácter frágil por la presencia de clivaje donde se observan “camino de clivaje” (*river patterns*) mostrando los granos de ferrita formados. Si bien, ciertos aceros frágiles presentan este tipo de fractura, en este caso la energía absorbida en el ensayo de impacto fue de 45,11 joules lo cual lo hace en cierta manera dúctil en comparación con el mismo acero templado y revenido.

Mientras que en la figura 74 la fractura es de carácter dúctil, mostrando microcavidades y hoyuelos (*dimples*) de distintas formas y tamaños, característica del acero 16CrNi4 en estado de suministro, donde la energía absorbida fue de 141,22 joules. En las figuras 75 y 77, la fractura es de carácter

mixta, con presencia de zonas de clivaje de reducida magnitud y la coalescencia de microcavidades tipo *dimples*; fenómeno observado en ambos núcleos de los aceros ensayados.

Las figuras 76 y 78, muestran fractura del tipo mixto con cuasi-clivaje como también del tipo intergranular, característicos de una zona más frágil (borde). En ambas figuras se puede notar el crecimiento alcanzado por el grano de austenita; el 16CrNi4 presenta más fractura intergranular, esto quiere decir que a pesar de que en estado de suministro era más dúctil que el 16MnCr5, en el temple y revenido, presentó un comportamiento contrario y como resultado final ambos aceros alcanzaron una similitud en absorción de energía (3,92 joules como máximo para el 16CrNi4 y 5,88 joules para el 15MnCr5).

Se hace énfasis que la descarburización presente es casi inevitable; dos de los principales gases, capaces de descarburar el acero son el vapor de agua y el oxígeno; el vapor de agua actúa como oxidante al reaccionar con la ferrita y producir óxido de hierro $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{FeO} + \text{H}_2$, el carbono en el acero con el vapor de agua produce monóxido de carbono $\text{C}_{\text{Fe}} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ y el CO produce la reacción del gas de agua $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. La descarburización por el oxígeno sucede como $\text{C}_{\text{Fe}} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ y la oxidación con la reacción $2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$ (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos térmicos de los aceros, 1984).

En este trabajo se eliminó el vapor de agua, colocando la mezcla carburante en horno secador a 90 grados centígrados por 12 horas; y la filtración de oxígeno se minimizó con kaowool sellando de esta manera la caja que contenía las probetas. No se debe eliminar completamente el oxígeno dentro de la caja, dado que, el oxígeno produce monóxido de carbono y a su vez produce dióxido de carbono y carbón naciente.

CONCLUSIONES

1. La probeta Charpy estándar del tipo A, utilizada en este estudio para caracterizar el proceso de difusión, tratamientos térmicos y las propiedades mecánicas de los aceros mayormente empleados en componentes mecánicos como engranajes y otros, es efectivamente adecuada para los objetivos planteados. Sin embargo para llegar a un estudio más profundo en el comportamiento de los aceros cementados-templados y revenidos se deja como opción la realización de ensayos de tracción.
2. Se comprobó la veracidad de utilizar las ecuaciones referidas en el *Metals Handbook* que permiten determinar los rangos de temperaturas críticas A_1 , A_3 y M_s necesarias para los distintos tratamientos térmicos, ecuaciones de mucha utilidad cuando se desconocen los diagramas TTT y CCT para determinados aceros.
3. Acerca de la difusión: el coeficiente de difusión del carbono en el acero microaleado DIN 16MnCr5 es mayor en comparación al acero DIN 16CrNi4 para la temperatura de 900 grados centígrados; obteniendo 0,8 milímetros de penetración de capa cementada, que se alcanza a las 3 horas de cementación para el 16CrNi4 y a las 2 horas de cementación para el 16MnCr5. Estos valores experimentales fueron corroborados teóricamente mediante la segunda ley de Fick como fines prácticos en la manufactura de engranajes.

4. Acerca de los resultados de dureza: las durezas alcanzadas y el comportamiento del perfil de dureza, no son muy distintas, con variaciones mínimas de 1 a 2 dureza Rockwell-C, algo menor para el acero DIN 16CrNi4 en comparación al acero DIN 16MnCr5 en la condición de templado y templado-revenido. Acorde a esto, se puede afirmar que la templabilidad de ambos aceros son muy similares.

5. Acerca del ensayo de impacto: en ambos aceros templados y revenidos para las diferentes horas de cementación, se observó que la tenacidad disminuye hasta valores promedio de 3,92 joules para rangos de 6 a 9 horas de cementación, marcando así una similitud en los resultados finales entre los dos aceros microaleados (levemente superiores para el acero 16MnCr5 en comparación con 16CrNi4, pese a que este último presentó en su estado normalizado de suministro una tenacidad 141,22 joules).

6. Fractografía: En su condición normalizado (estado de suministro) el acero 16MnCr5 es comparativamente más frágil que el 16CrNi4, atribuible a microsegregación de Cr, Ni y Mn; sin embargo, esto debiera examinarse mediante una investigación metalográfica exhaustiva. Posterior a la cementación, en el temple, ambos aceros presentan una fractura de carácter mixto en los núcleos de la probetas (clivaje en zonas puntuales y *dimples*), característica de los aceros de bajo contenido de carbono y en la zona borde de la entalla en concordancia con los resultados de tenacidad se observa fractura del tipo intergranular, como consecuencia del alto contenido de carbono en dicha zona notándose el crecimiento alcanzado por el grano de austenita, mayor para el 16CrNi4 en comparación al 16MnCr5.

7. De acuerdo a los resultados obtenidos durante la presente investigación, en función de la metodología empleada, puede afirmarse con alta aproximación que dichos resultados, son extrapolables al tratamiento de endurecimiento superficial de engranajes diseñados como elementos de transmisión de potencia.

8. Finalmente, se concluye en función de los resultados expuestos y analizados, en que los objetivos propuestos en el planteamiento del proyecto, fueron cumplidos en su totalidad.

RECOMENDACIONES

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC a través del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas”:

1. Equipar el Laboratorio de Metalografía, en aras de poder realizar investigaciones exhaustivas en distintos metales, en las líneas de investigación correspondientes. Equipos como lo son: espectrómetro de emisión óptica, microscopio metalográfico, cortadora y pulidora metalográfica. Como también los materiales: alúmina y pasta de diamante, para el pulido; ácido nítrico, etanol, ácido clorhídrico, sulfato de cobre, ácido pícrico entre otros reactivos, para el ataque químico revelador de los límites de granos en los distintos metales.
2. Continuar con la investigación en temas a fines a los tratamientos térmicos de los aceros, que puedan propocionar un mayor soporte científico-tecnológico en el desarrollo de los procesos metalúrgicos del país.
3. Realizar investigaciones similares a la presente en aceros de disponibilidad local.

A los sectores involucrados, científico-técnicos y productivos:

4. Las variables más importantes de esta investigación son: la temperatura y el tiempo; se recomienda realizar investigaciones exhaustivas en el análisis de la difusión, dureza y tenacidad en probetas cementadas a temperaturas mayores a 900 grados centígrados y comparar los resultados con el presente trabajo, considerando los elementos microaleantes de las probetas a ensayar.
5. Para un estudio más profundo en el comportamiento mecánico de la cementación, el temple y revenido en los aceros analizados en este trabajo se deja como opción la realización de ensayos de tracción.
6. Considerar la fresa de módulo que sirve en la manufactura del engranaje para obtener referencia adecuada de la capa cementante requerida, dado que a medida que aumenta el diámetro primitivo es necesario una capa cementante más profunda, para soportar las sollicitaciones mecánicas necesarias. La tabla I y la ecuación 12 están a disposición en este trabajo como guía de lo referido con anterioridad.
7. La ecuación 30 del presente trabajo servirá como base de conocimiento para obtener el tiempo o la profundidad de la capa cementada requerida en los aceros DIN 16MnCr5 y 16CrNi4, tomando como referencia de Coeficiente de Difusión, los presentes en la tabla XX; siempre y cuando, la temperatura de cementación, sea del orden de 900 grados centígrados, temperatura a la cual se desarrollaron las pruebas en este trabajo.

8. La descarburización es casi inevitable en los tratamientos térmicos pese a las precauciones tomadas; dos de los principales gases capaces de descarburar el acero son el vapor de agua y el oxígeno; es de vital importancia deshumedecer en un secador la mezcla cementante antes de alcanzar la temperatura de austenización, recomendable a 100 grados centígrados entre 9 a 12 horas para evaporar efectivamente de esta manera las partículas de agua presentes y sellar la caja que contiene el acero a cementar con kaowool para minimizar la filtración de oxígeno. No se debe eliminar completamente el oxígeno dentro de la caja, dado que, el oxígeno produce monóxido de carbono y a su vez produce dióxido de carbono y carbón naciente.

9. Cuando se requiera ciertas zonas blandas de las piezas que estarán sometidas al proceso de cementación, es recomendable realizar el procedimiento de cobreado electrolítico; que consiste en pintar las superficies que se deseen cementar, la mezcla de la pintura contendrá cera, trementina, asfalto entre otras resinas especiales, seguido de un baño de cobreado electrolítico, en donde se adhiere una capa de cobre sobre las zonas sin pintar, que son las que se requieren blandas. A elevadas temperaturas se quema la capa de pintura, cementándose esas superficies, mientras que en las superficies cobreadas no estarán expuestas a la difusión del carbono. Este procedimiento se hace a temperaturas menores de 1 000 grados centígrados y en superficies libres de grasa para que el cobre se adhiere efectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *Introducción a la metalurgia*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. 192 p.
2. APRAIZ BARREIRO, José. *Tratamientos Térmicos de los aceros*. 8a ed. España: Dossat, 1984. 741 p.
3. ASKELAND, Donald R. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3a ed. Mexico: International Thomson, 1998. 778 p.
4. American Society for Testing and Materials. *E0003-01 Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 12 p.
5. _____. *E0018-05E01 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials Edition*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 10 p.
6. _____. *E0023-05 Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 26 p.
7. _____. *E0045-97R02 Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*. Estados Unidos: ASTM International, 2005.

8. _____. *E0112-96R04 Test Methods for Determining Average Grain Size*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 18 p.
9. _____. *E0140-05 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 21 p.
10. _____. *E1077-01R05 Test Methods for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 10 p.
11. CALLISTER, Williams D. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. España: Reverte, 1995. 459 p. Vol. 1.
12. CASILLAS, A. L. *Máquinas cálculos de taller*. España: Máquinas, 1981. 643 p.
13. CENTINKAYA, Cemil; ARABACI, Ugur. *Flash butt welding application on 16MnCr5 chain steel and investigations of mechanical properties*. Turquía: Materials and design 27 (2006) 1187-1195. 2005. 9 p.
14. DIETER, George E. *Mechanical Metallurgy*. Reino Unido: McGraw-Hill, 1988. 751 p.

15. EDMONDS, D. V.; et al. *Quenching and partitioning martensite - A novel steel heat treatment*. Reino Unido: Materials science and engineering A 438-440 (2006) 25-34. 2006. 10 p.
16. GOROCKIEWICZ, R. *The kinetics of low-pressure carburizing of alloy steels*. Polonia: Vacuum 86 (2011) 448-451. 2011. 4 p.
17. GUAGLIANO, M.; RIVA, E.; GUIDETTI, M. *Contact fatigue failure analysis of shot-peened gears*. Italia: Engineering failure analysis 9 (2002) 147-158. 2000. 12 p.
18. Ki, Hyungson and So, Sangwoo. *Process map for laser heat treatment of carbon steels*. Corea del Sur: Optics & laser technology 44 (2012) 2106-2114. 2012. 9 p.
19. LINDENVALD, Nora. *La estructura de los metales*. 3a ed. Buenos Aires: Geminis S. R. L. 1980. 315 p.
20. MALEQUE, M. A.; POON, Y. M.; MASJUKI, H. H. *The effect of intercritical heat treatment on the mechanical properties of AISI 3115 steel*. Malasia: Journal of materials processing technology 153-154 (2004) 482-487. 2004. 6 p.
21. *Metals Handbook. Fractograph*. Estados Unidos: ASM international Handbook, 1998. 857 p. Vol. 12
22. _____. *Heat Treatin*. Estados Unidos: ASM international Handbook, 1998. 2173 p. Vol. 4

23. _____. *Mechanical Testing and Evaluation*. Estados Unidos: ASM international Handbook, 2003. 2235 p. Vol. 8.
24. _____. *Metallography and Microstructure*. Estados Unidos: ASM international Handbook, 1998. 1627 p. Vol. 9.
25. SEETHARAMAN, Seshadri. *Fundamentals of metallurgy*. Reino Unido: Woodhead Publishing Limited, 2005. 574 p.
26. SMALLMAN, R. E.; NGAN, A. H. W. *Physical metallurgy and advanced materials*. 7a ed. Reino Unido: Elsevier, 2007. 650 p.
27. SYDNEY H., Avner. *Introducción a la metalurgia física*, 2a ed. México: McGraw-Hill, 1988. 695 p.
28. VERHOEVEN, John D. *Fundamentos de metalurgia física*. México: Limusa, 1987. 593 p.

APÉNDICES

Conversión de dureza I

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^c		Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number	
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)		A Scale, 60-kgf (HRA)	D Scale, 100-kgf (HRD)
68	940	...	...	920	85.6	76.9
67	900	...	...	895	85.0	76.1
66	865	...	...	870	84.5	75.4
65	832	...	(739)	846	83.9	74.5
64	800	...	(722)	822	83.4	73.8
63	772	...	(705)	799	82.8	73.0
62	746	...	(688)	776	82.3	72.2
61	720	...	(670)	754	81.8	71.5
60	697	...	(654)	732	81.2	70.7
59	674	...	634	710	80.7	69.9
58	653	...	615	690	80.1	69.2
57	633	...	595	670	79.6	68.5
56	613	...	577	650	79.0	67.7
55	595	...	560	630	78.5	66.9
54	577	...	543	612	78.0	66.1
53	560	...	525	594	77.4	65.4
52	544	(500)	512	576	76.8	64.6
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1
48	484	451	455	510	74.7	61.4
47	471	442	443	495	74.1	60.8
46	458	432	432	480	73.6	60.0
45	446	421	421	466	73.1	59.2
44	434	409	409	452	72.5	58.5
43	423	400	400	438	72.0	57.7
42	412	390	390	426	71.5	56.9
41	402	381	381	414	70.9	56.2
40	392	371	371	402	70.4	55.4
39	382	362	362	391	69.9	54.6
38	372	353	353	380	69.4	53.8
37	363	344	344	370	68.9	53.1
36	354	336	336	360	68.4	52.3
35	345	327	327	351	67.9	51.5
34	336	319	319	342	67.4	50.8
33	327	311	311	334	66.8	50.0
32	318	301	301	326	66.3	49.2
31	310	294	294	318	65.8	48.4
30	302	286	286	311	65.3	47.7
29	294	279	279	304	64.8	47.0
28	286	271	271	297	64.3	46.1
27	279	264	264	290	63.8	45.2
26	272	258	258	284	63.3	44.6
25	266	253	253	278	62.8	43.8
24	260	247	247	272	62.4	43.1
23	254	243	243	266	62.0	42.1
22	248	237	237	261	61.5	41.6
21	243	231	231	256	61.0	40.9
20	238	226	226	251	60.5	40.1

Fuente: ASTM E0140-05 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. p. 3.

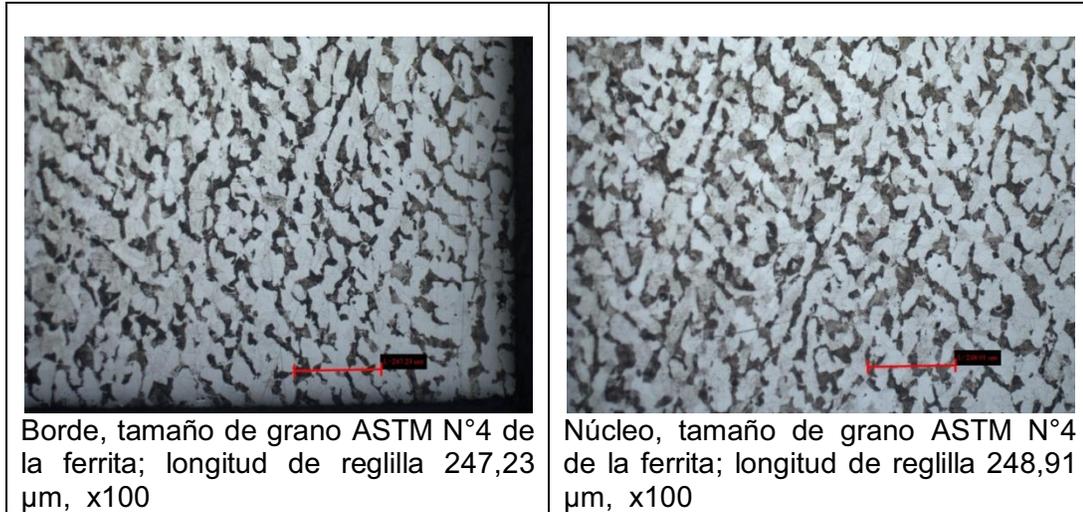
Conversión de dureza II

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hard- ness Number, 3000-kgf, (HBS)	Knoop Hard- ness Number, 500-gf, and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, (HRA)
100	240	240	251	61.5
99	234	234	246	60.9
98	228	228	241	60.2
97	222	222	236	59.5
96	216	216	231	58.9
95	210	210	226	58.3
94	205	205	221	57.6
93	200	200	216	57.0
92	195	195	211	56.4
91	190	190	206	55.8
90	185	185	201	55.2
89	180	180	196	54.6
88	176	176	192	54.0
87	172	172	188	53.4
86	169	169	184	52.8
85	165	165	180	52.3
84	162	162	176	51.7
83	159	159	173	51.1
82	156	156	170	50.6
81	153	153	167	50.0
80	150	150	164	49.5
79	147	147	161	48.9
78	144	144	158	48.4
77	141	141	155	47.9
76	139	139	152	47.3
75	137	137	150	46.8
74	135	135	147	46.3
73	132	132	145	45.8
72	130	130	143	45.3
71	127	127	141	44.8
70	125	125	139	44.3
69	123	123	137	43.8
68	121	121	135	43.3
67	119	119	133	42.8
66	117	117	131	42.3
65	116	116	129	41.8
64	114	114	127	41.4
63	112	112	125	40.9
62	110	110	124	40.4
61	108	108	122	40.0
60	107	107	120	39.5

Fuente: *ASTM E0140-05 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.* p. 4

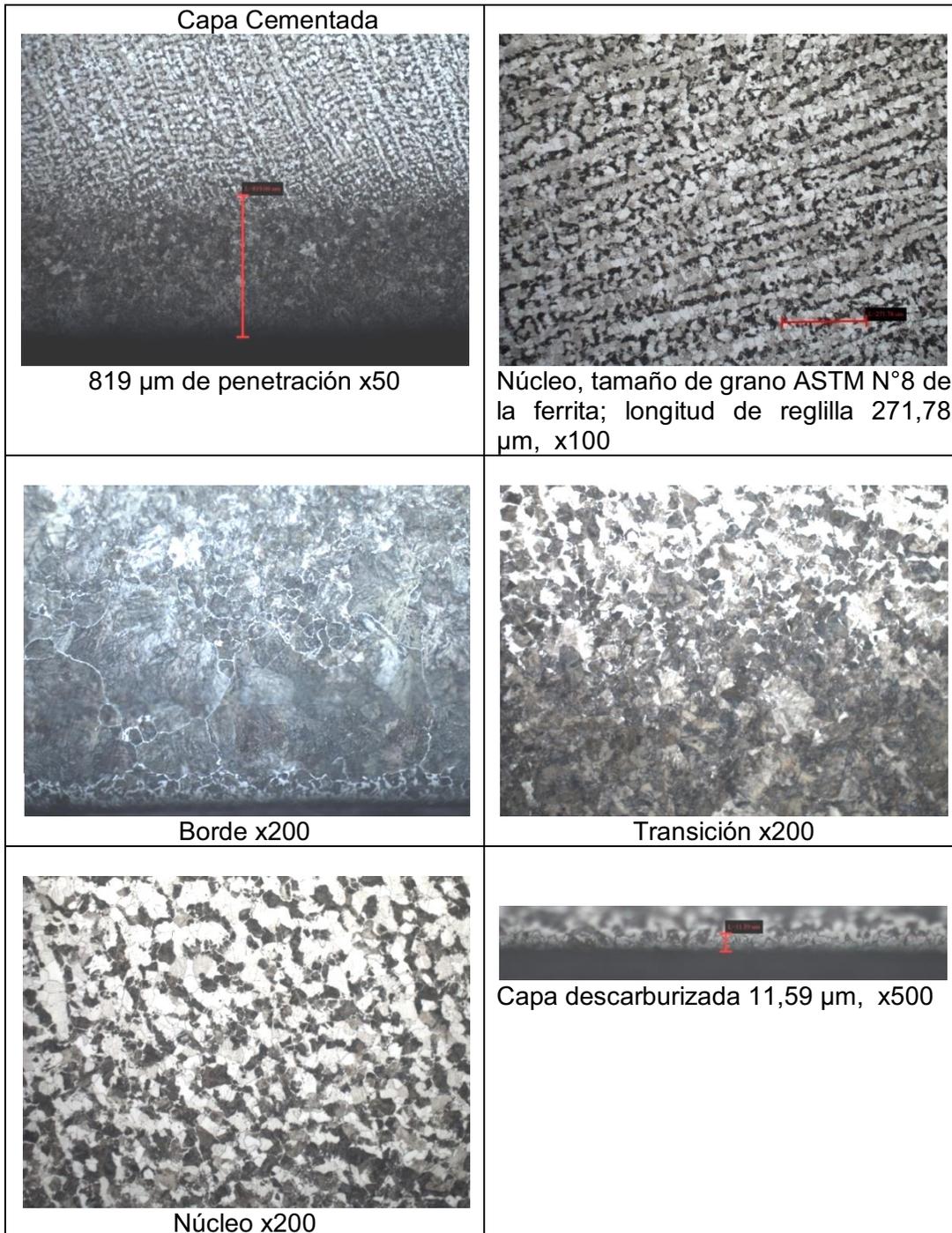
ANEXOS

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. Estado de suministro



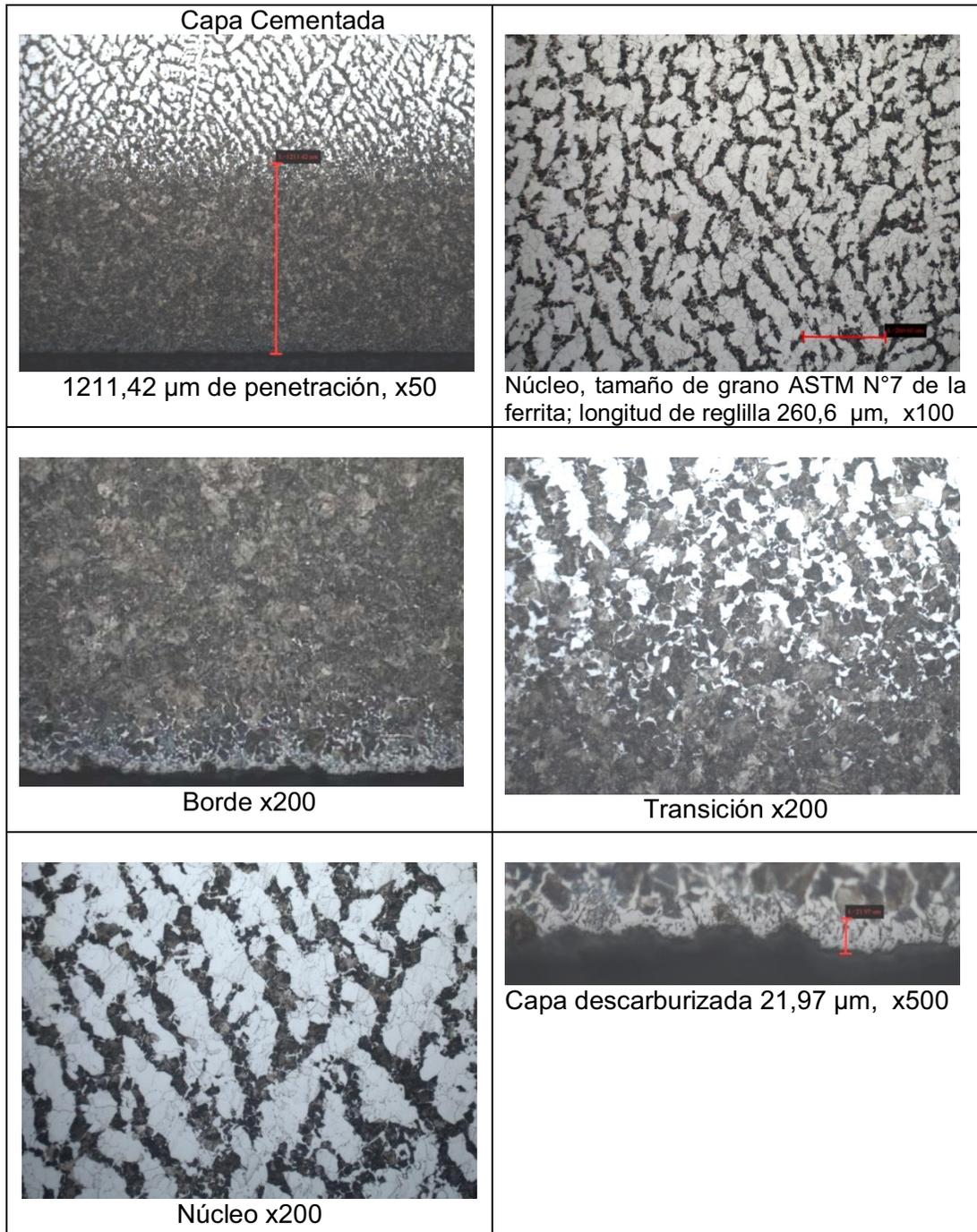
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 3 horas de cementación



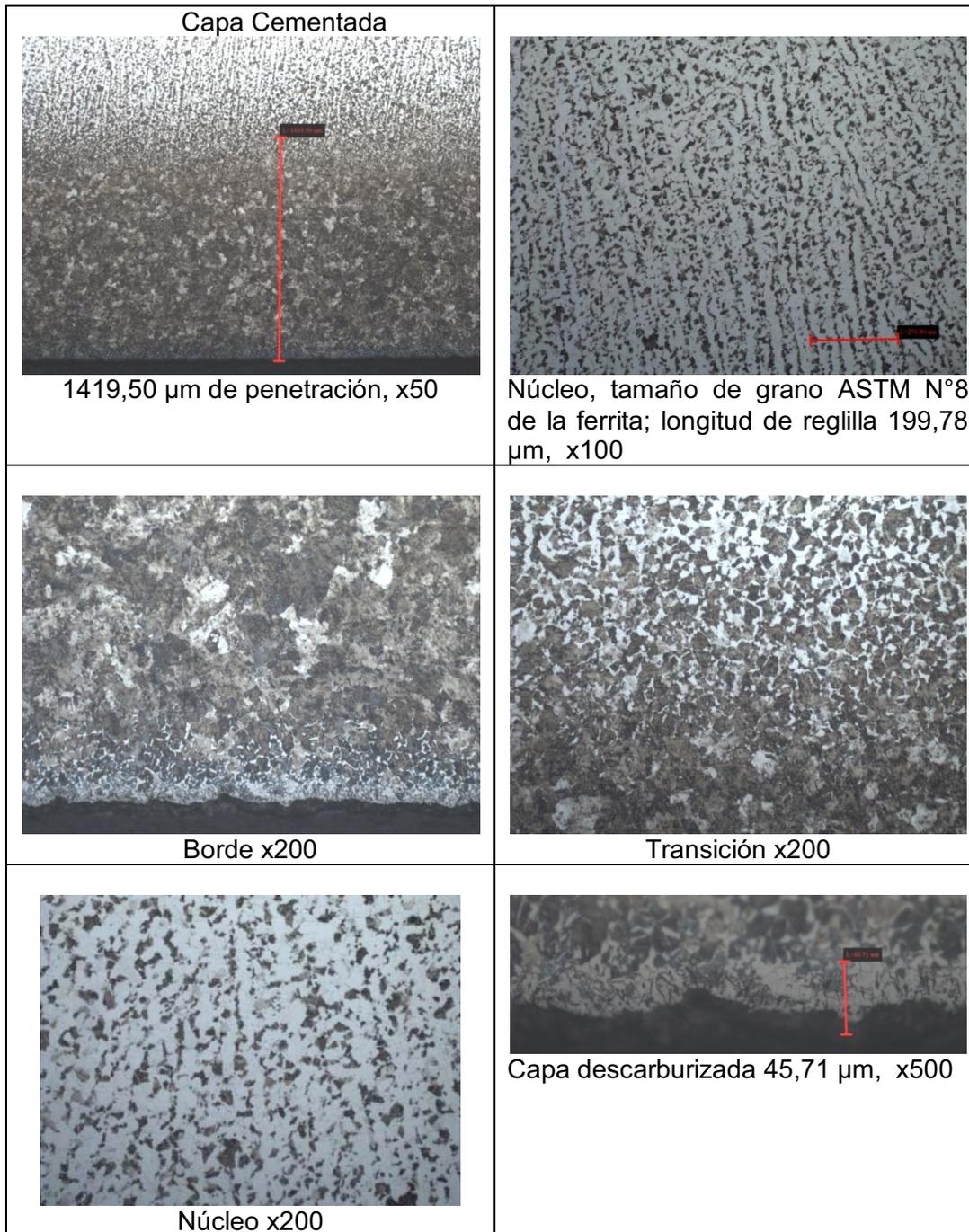
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 6 horas de cementación



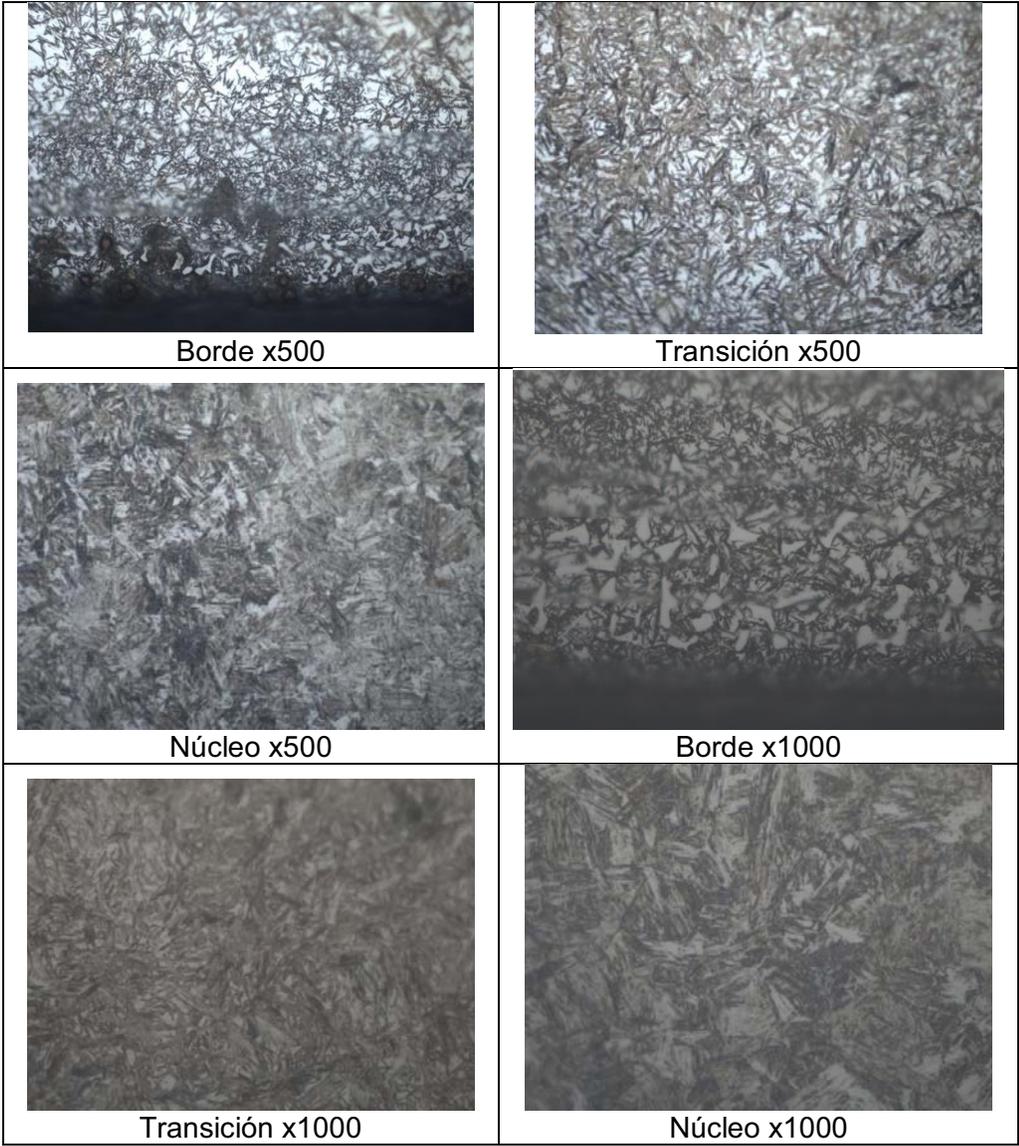
Fuente: Laboratorio de Ingeniería, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 9 horas de cementación



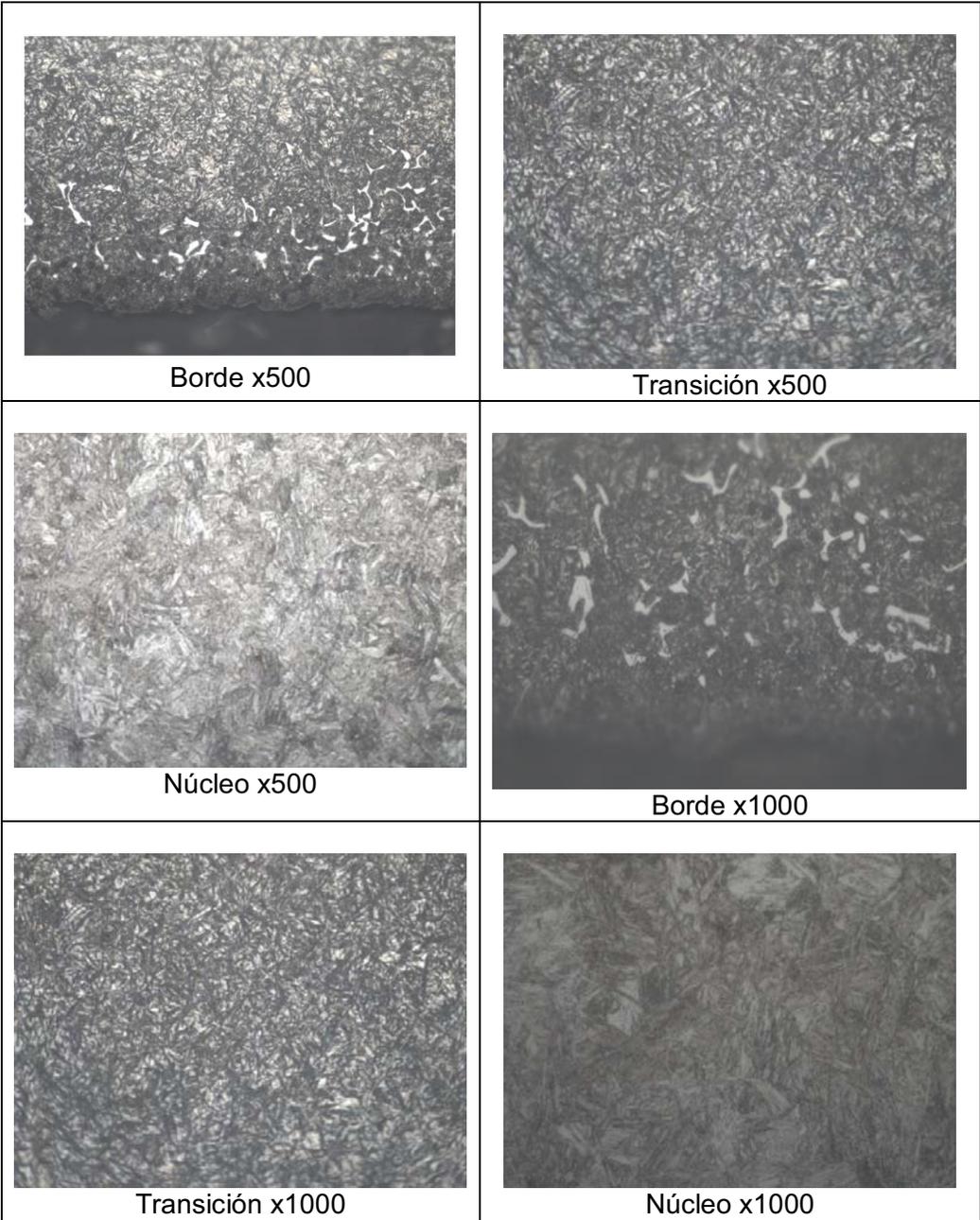
Fuente: Laboratorio de Ingeniería, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 3 horas de cementación y temple en aceite



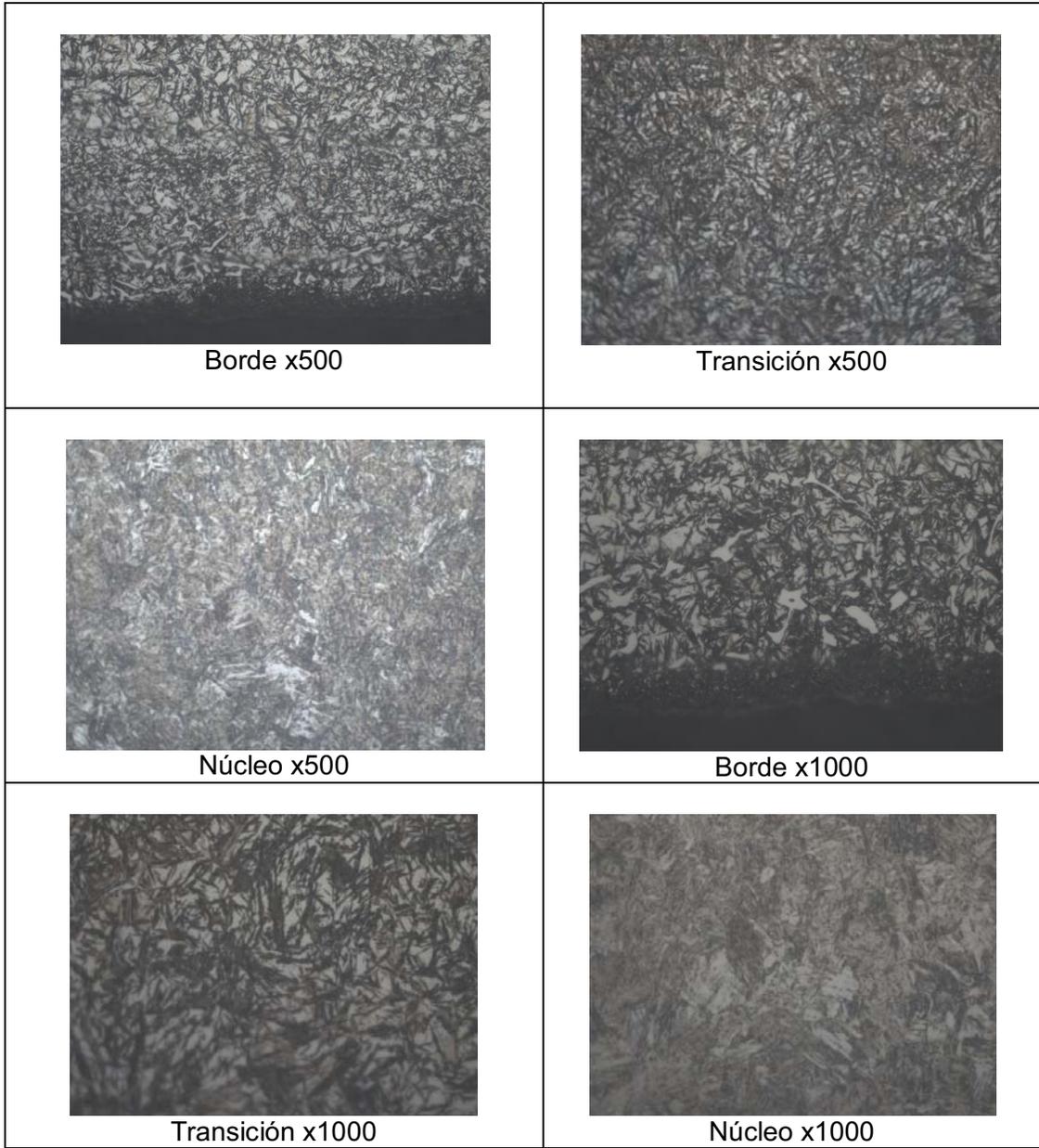
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 6 horas de cementación y temple en aceite



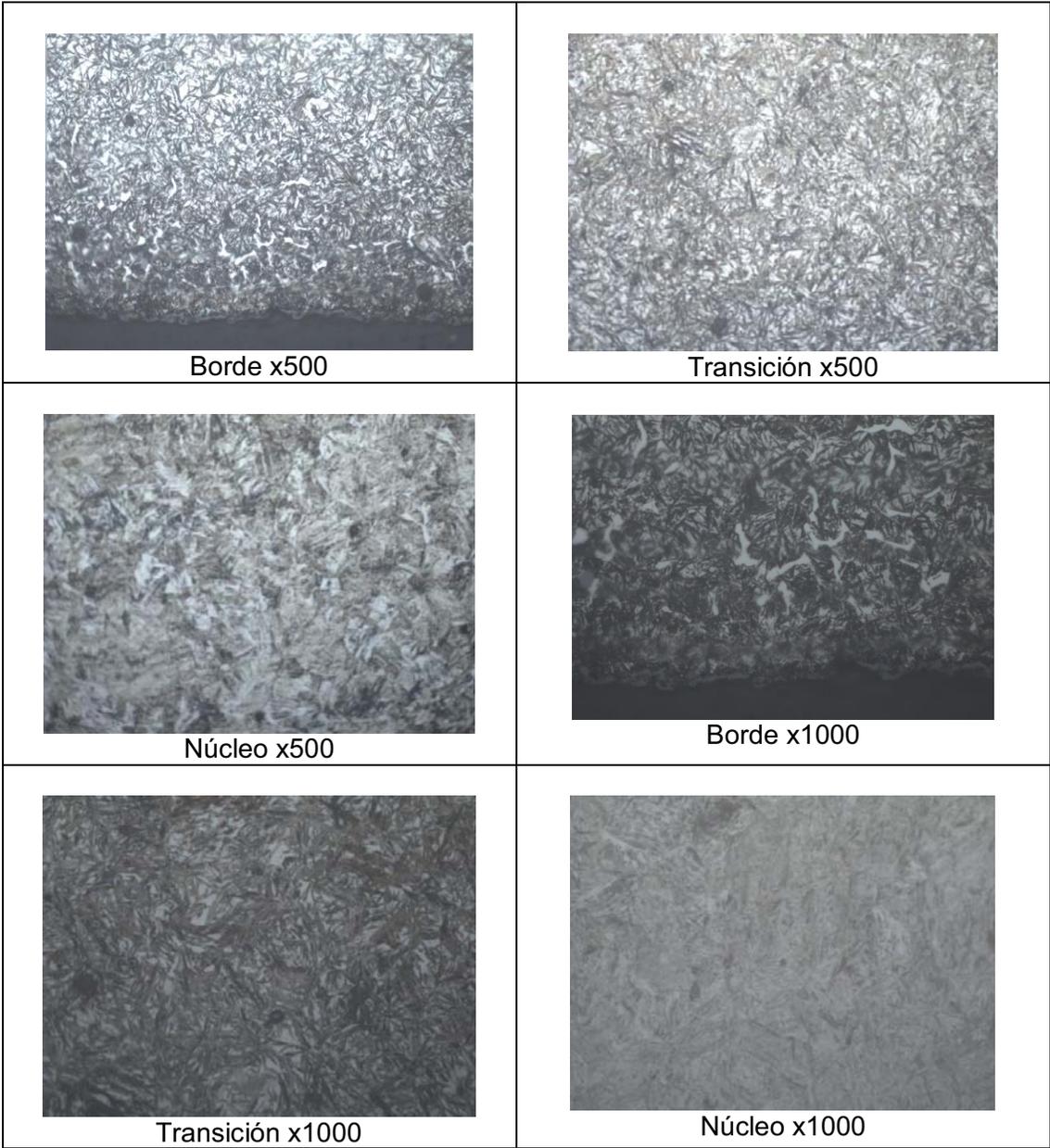
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 3 horas de cementación, temple en aceite y revenido



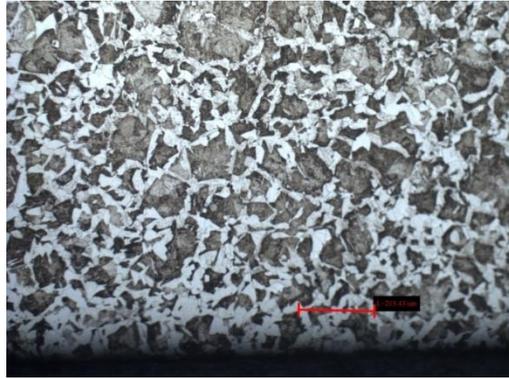
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, longitudinal. 6 horas de cementación, temple en aceite y revenido

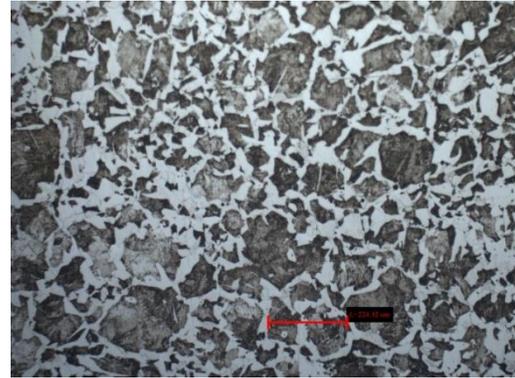


Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, longitudinal. Estado de suministro



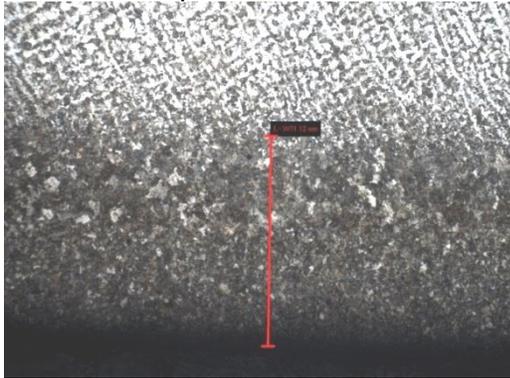
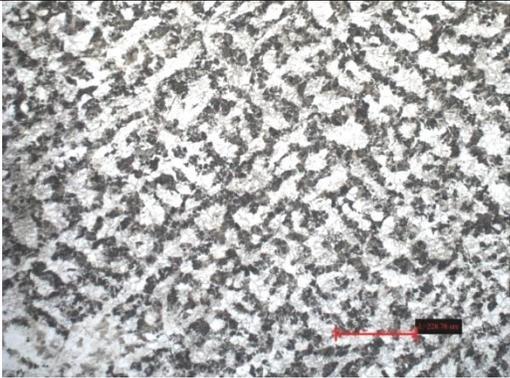
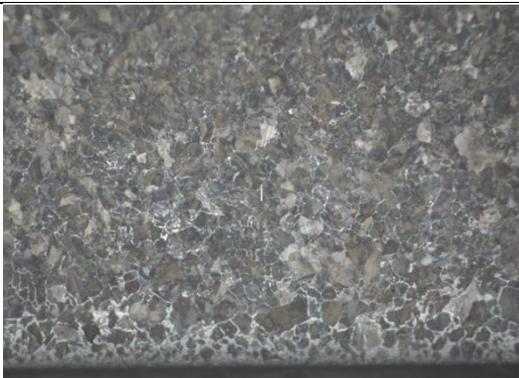
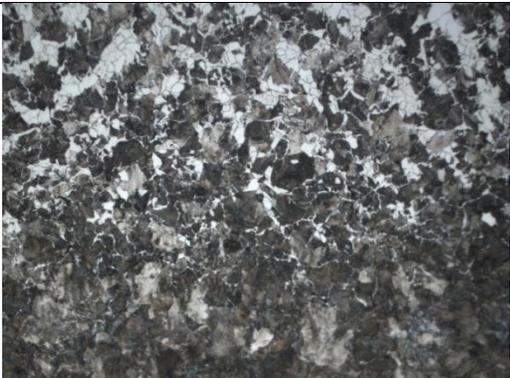
Borde, tamaño de grano ASTM N°4 de la ferrita; longitud de reglilla 215,43 μm , x100



Núcleo, Tamaño de grano ASTM N°4 de la ferrita; longitud de reglilla 224,32 μm , x100

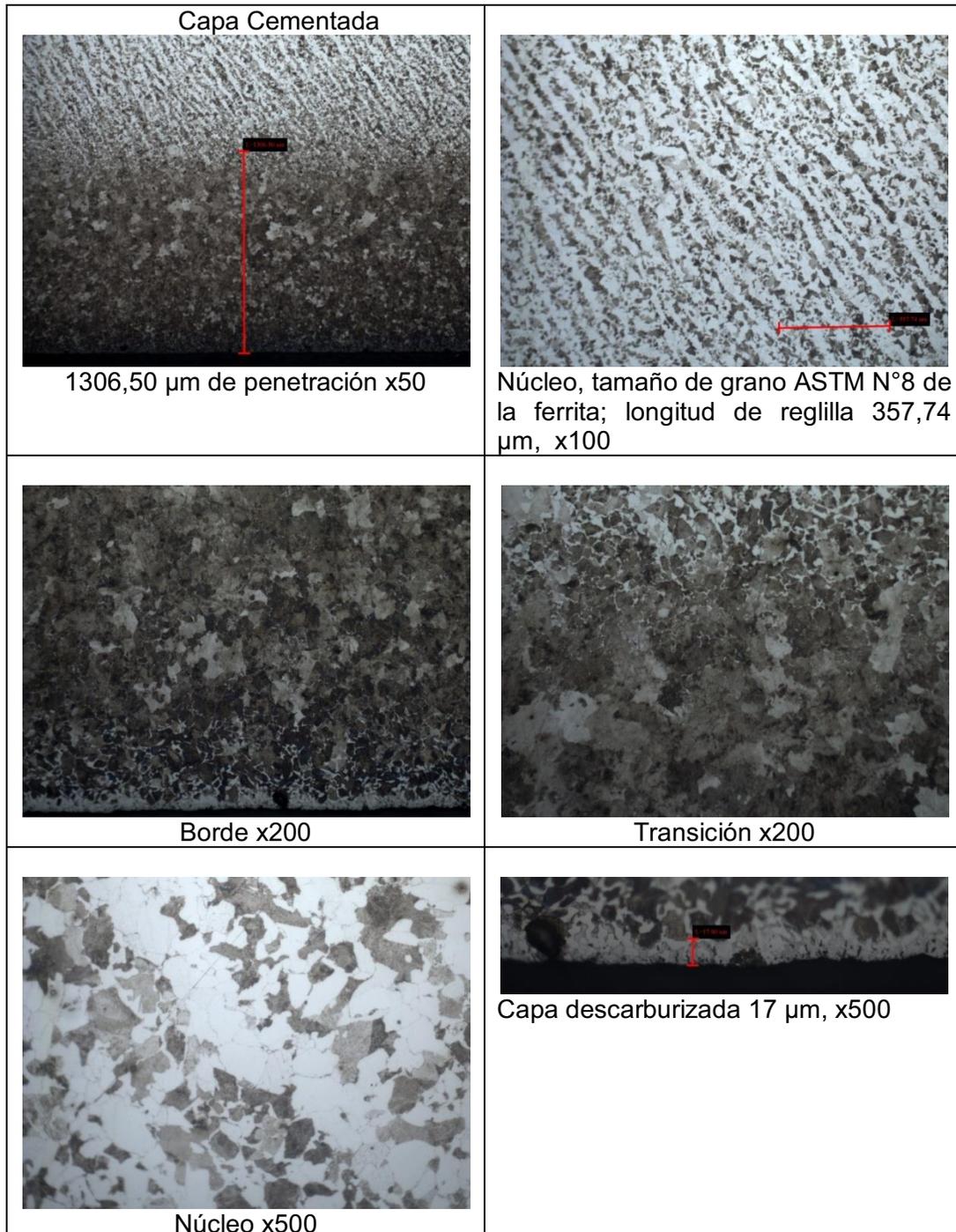
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5; longitudinal. 3 horas de cementación

<p>Capa Cementada</p>  <p>1071,12 μm de penetración x50</p>	 <p>Núcleo, tamaño de grano ASTM N°8 de la ferrita; longitud de reglilla 228,78 μm, x100</p>
 <p>Borde x200</p>	 <p>Transición x200</p>
 <p>Núcleo x200</p>	 <p>Capa descarburizada 21,97 μm, x500</p>

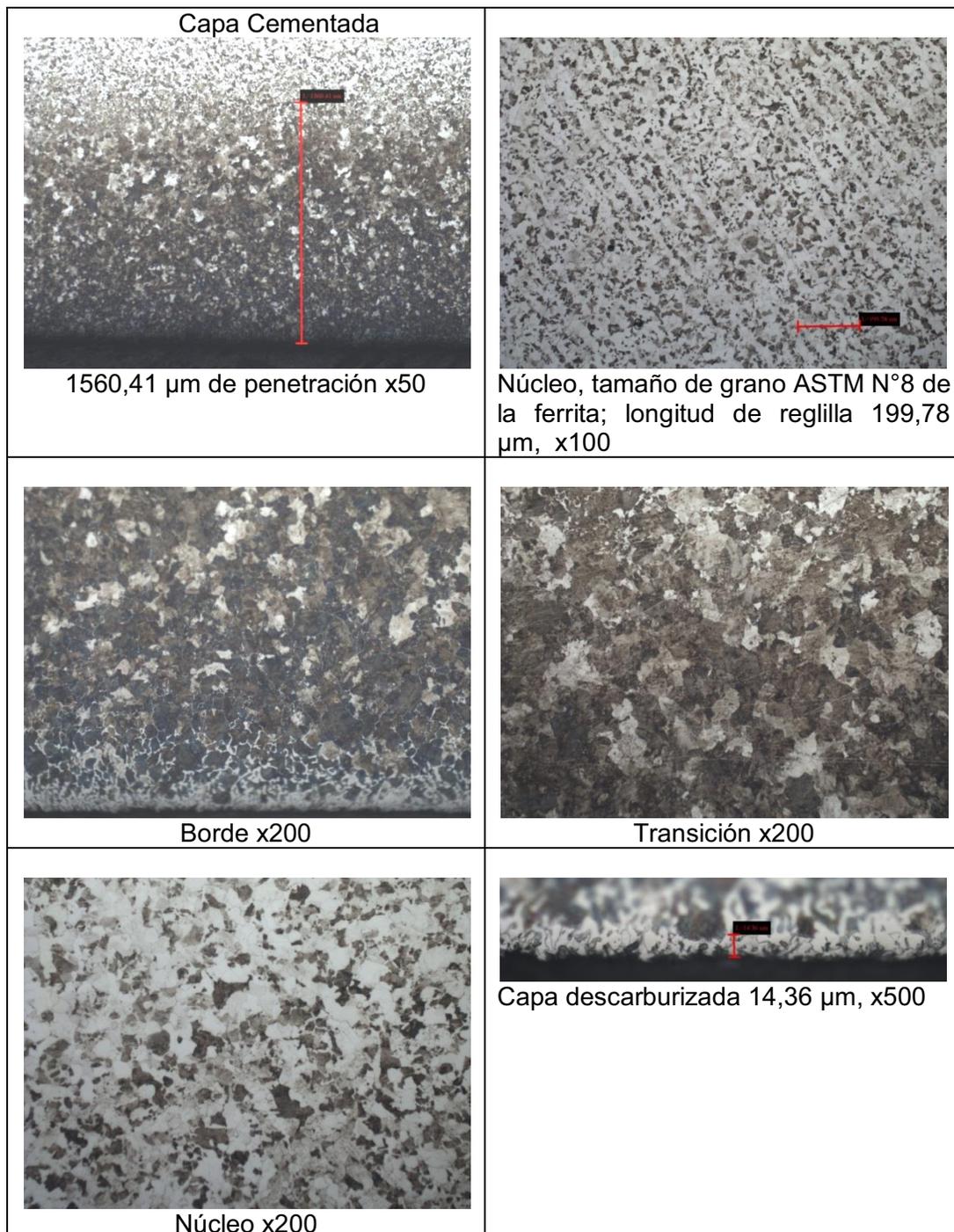
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, longitudinal. 6 horas de cementación



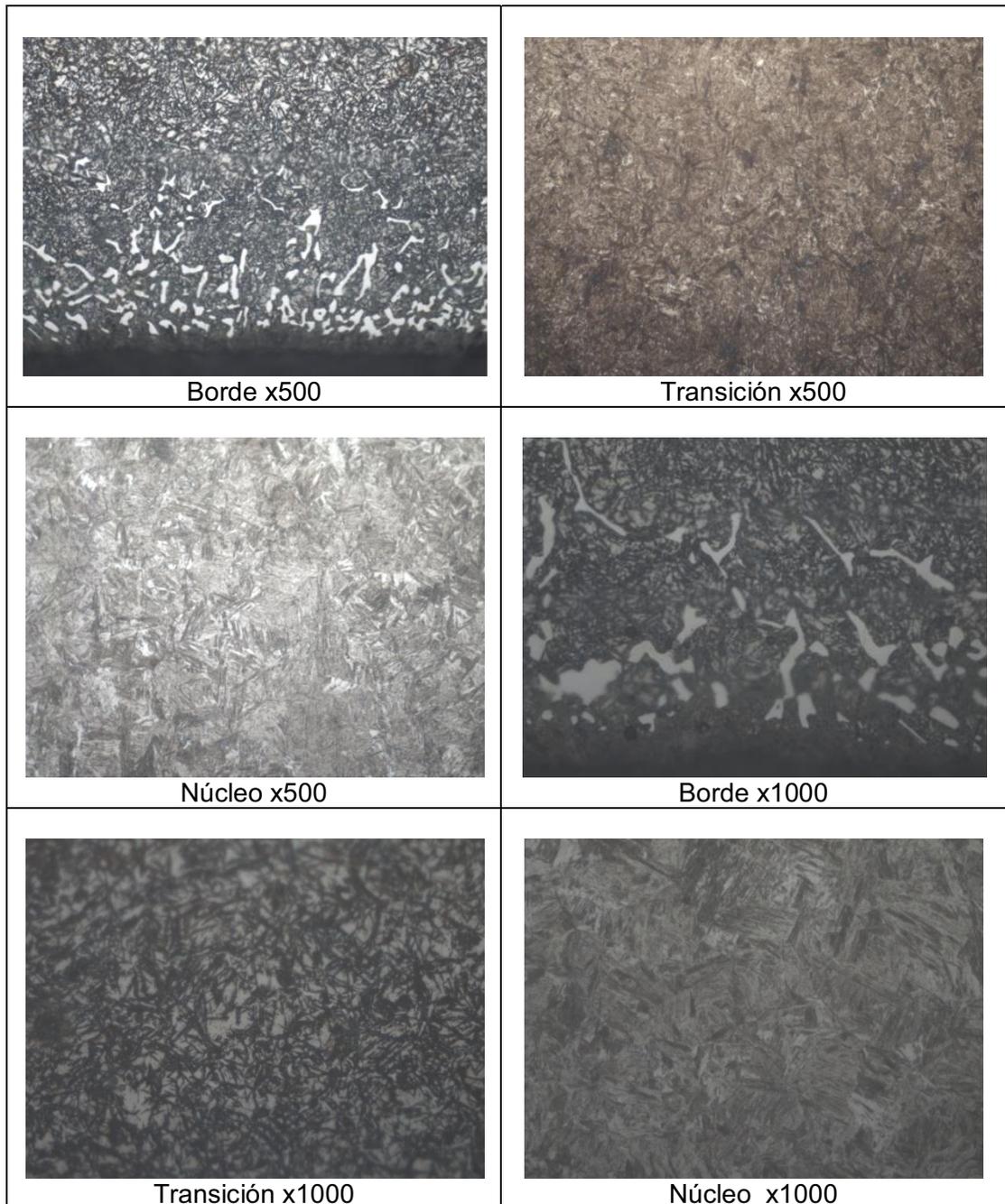
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, longitudinal. 9 horas de cementación



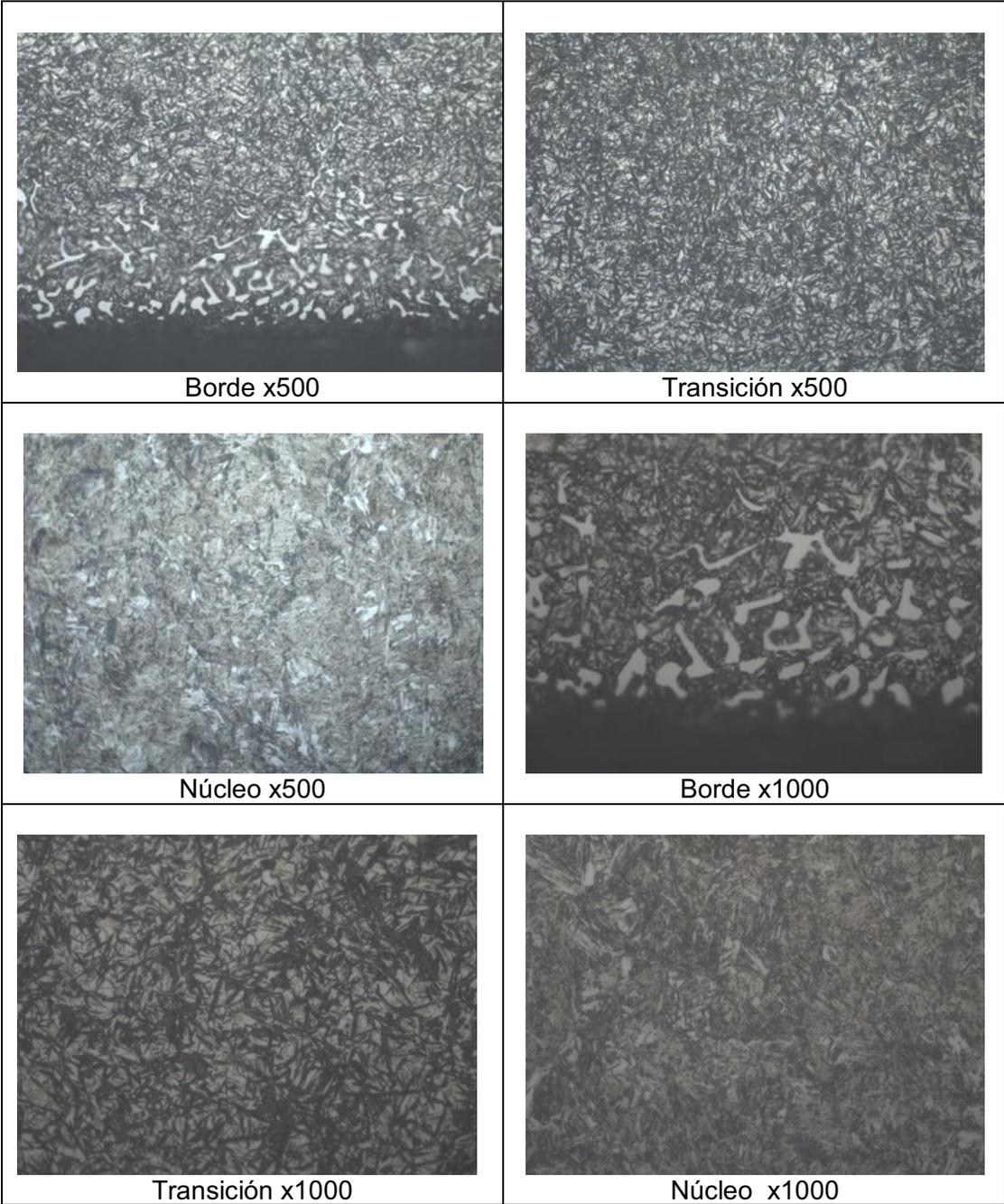
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, longitudinal. 6 horas de cementación y temple en aceite



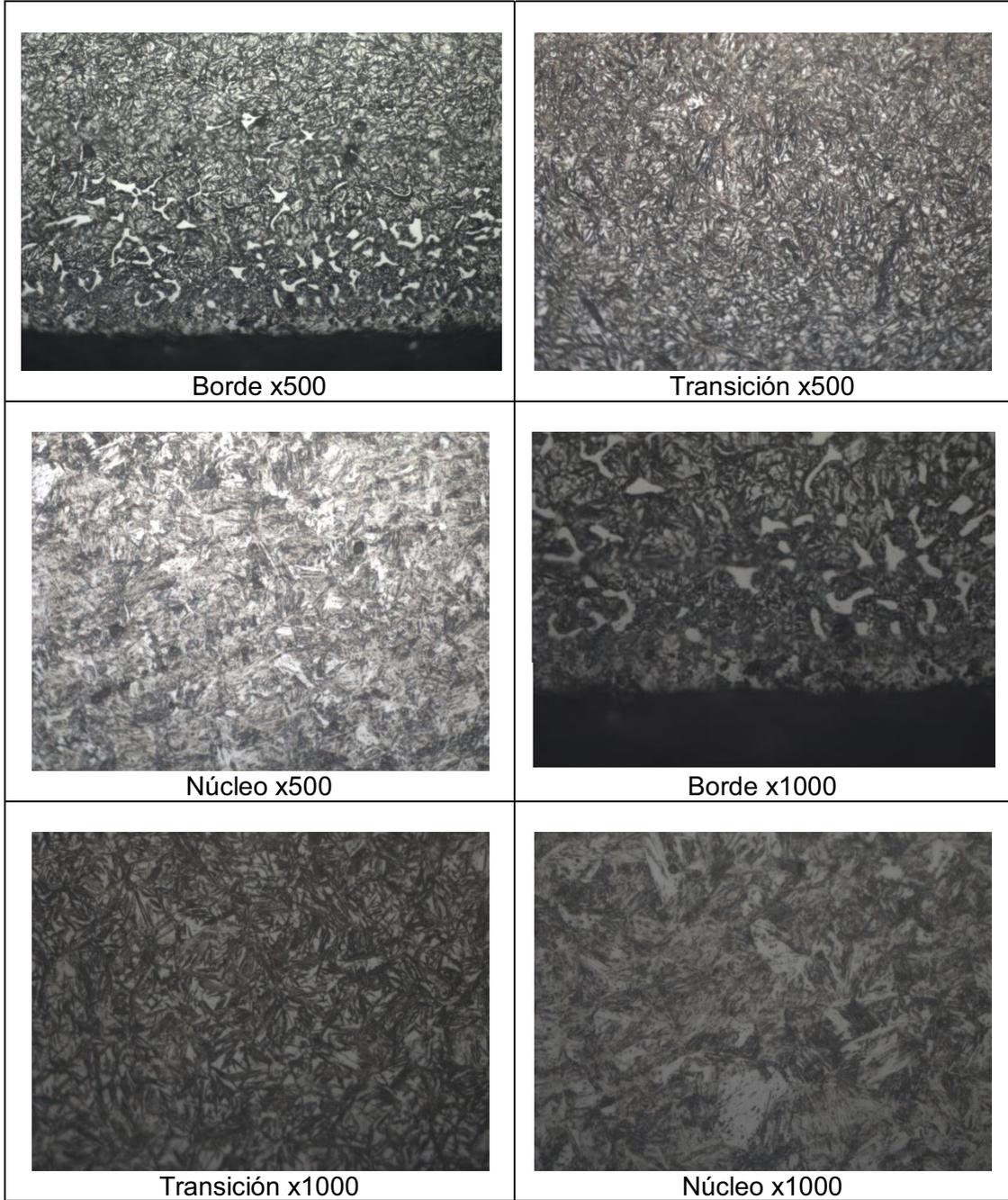
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, longitudinal. 3 horas de cementación y temple en aceite y revenido



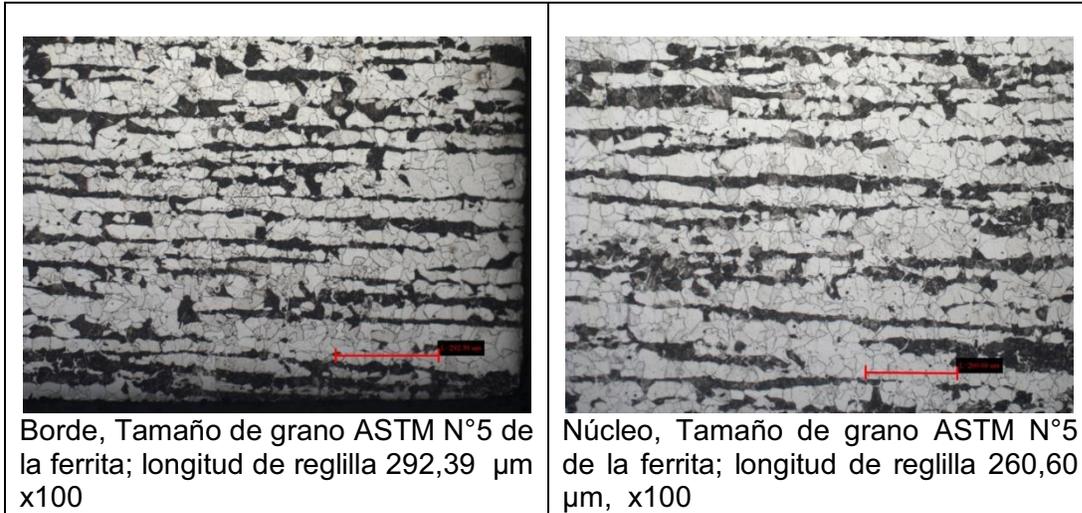
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, longitudinal. 6 horas de cementación; temple en aceite y revenido



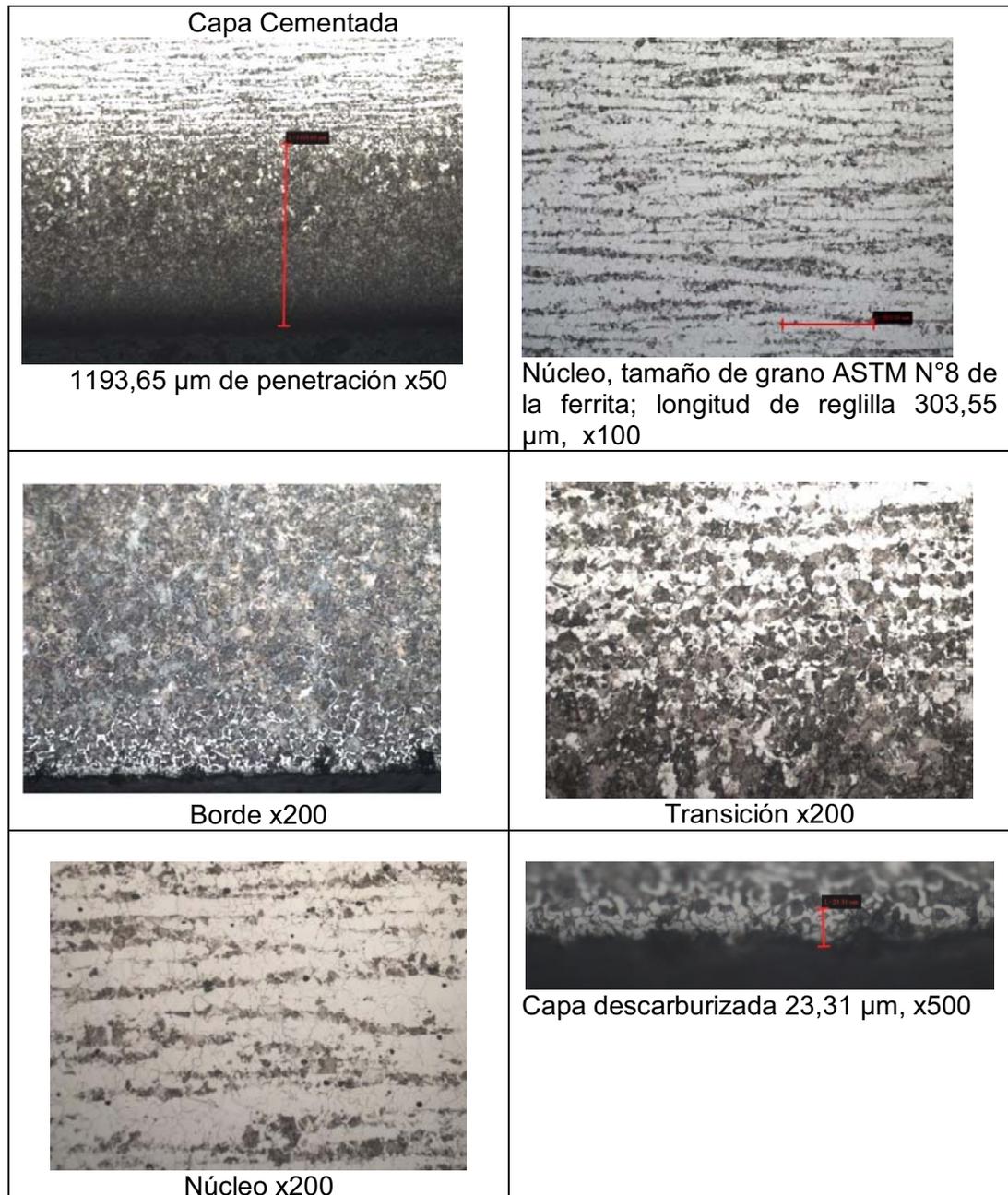
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, transversal. Estado de suministro



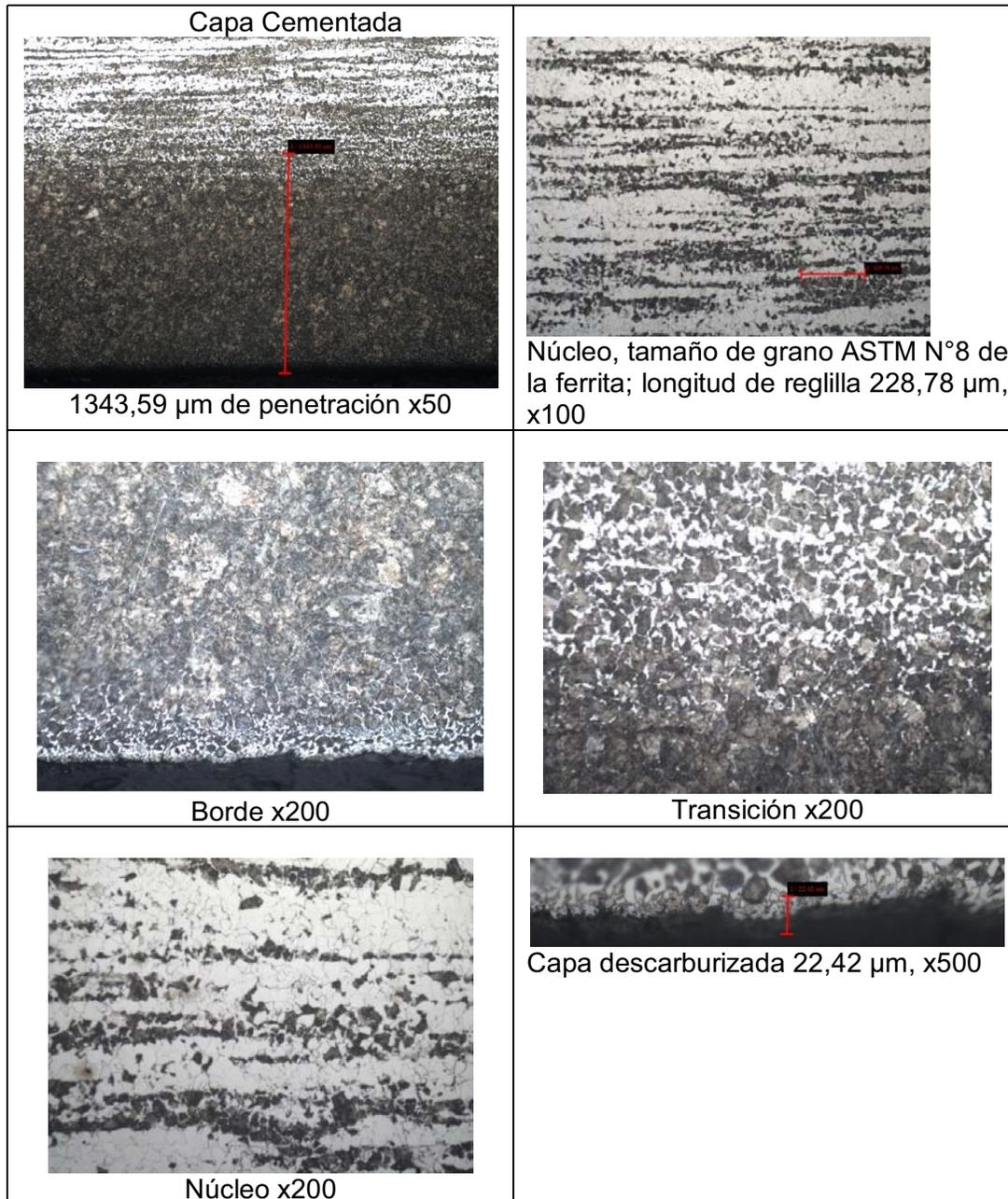
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4, transversal. 6 horas de Cementación



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16CrNi4. 9 horas de cementación

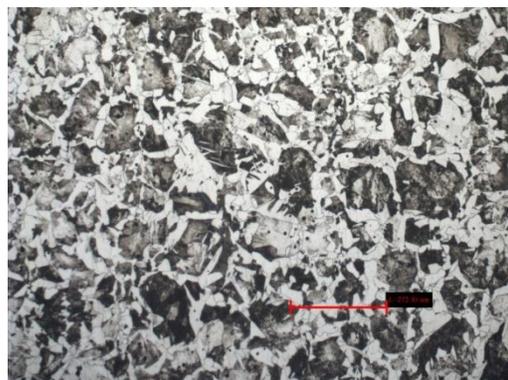


Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, transversal. Estado de suministro



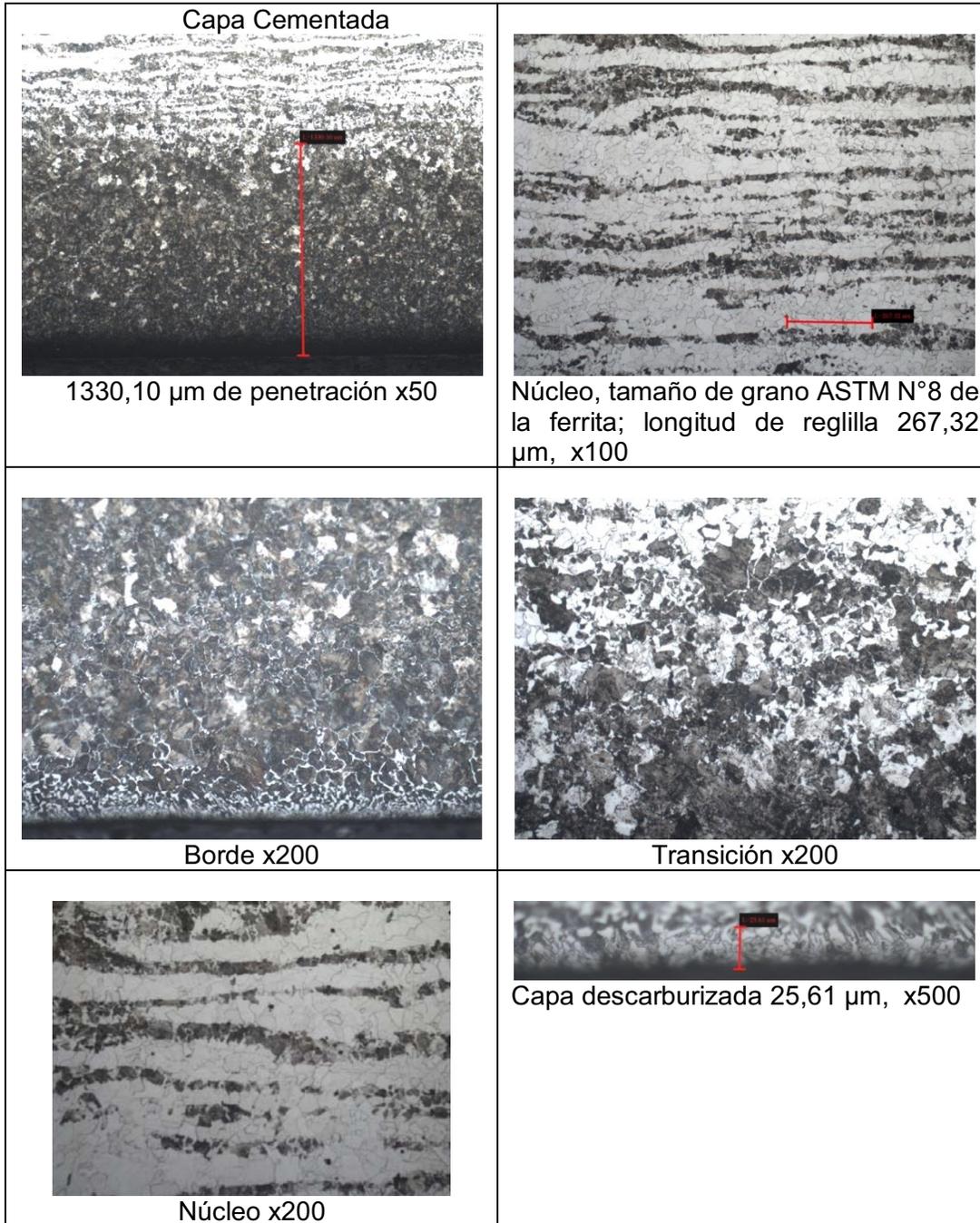
Borde, Tamaño de grano ASTM N°4 de la ferrita; x100



Núcleo, Tamaño de grano ASTM N°4 de la ferrita; longitud de reglilla 272,3 μm , x100

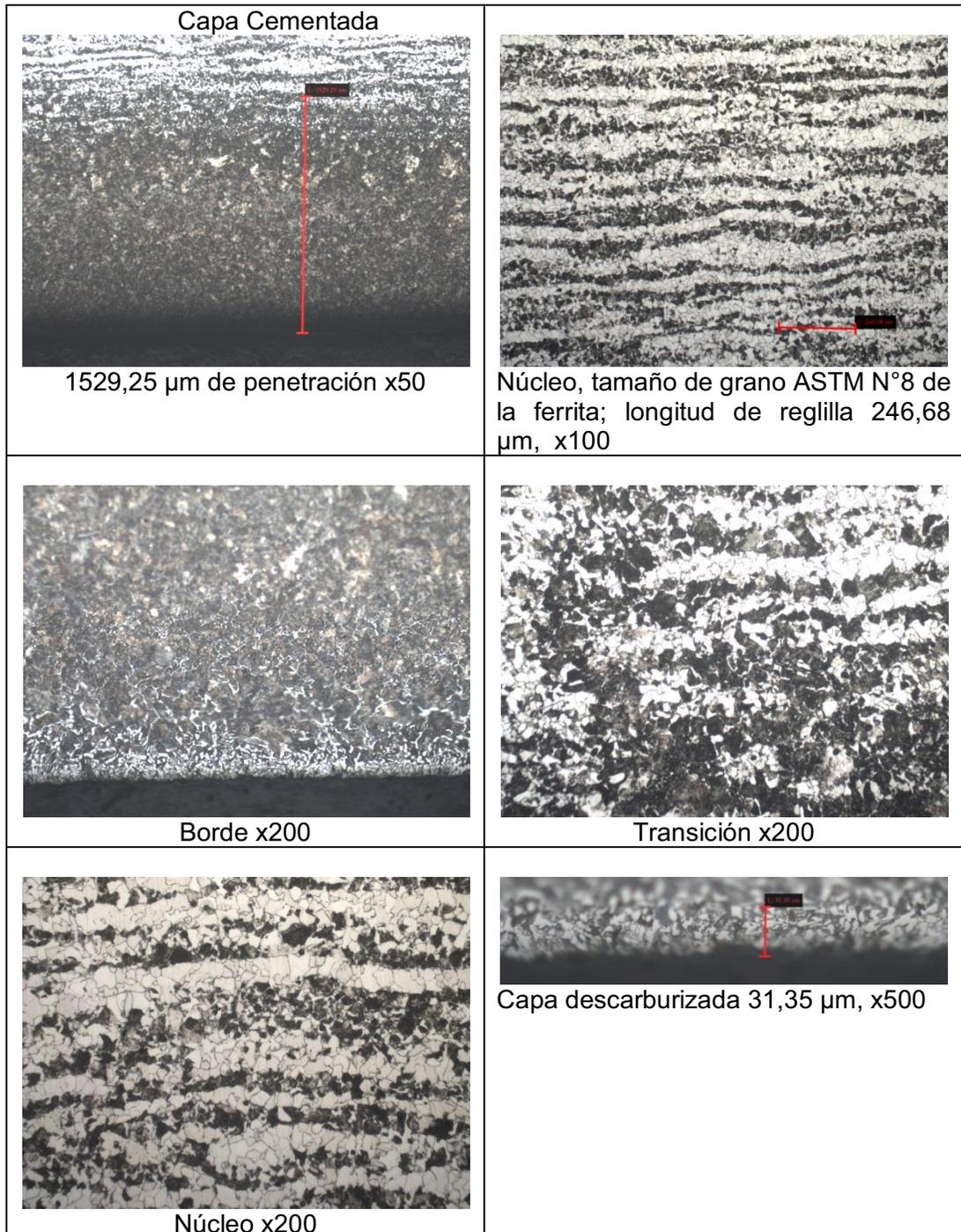
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, transversal. 6 horas de cementación



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Metalografía 16MnCr5, transversal. 9 horas de cementación

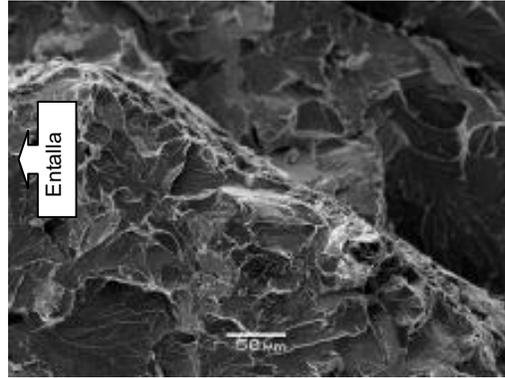


Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

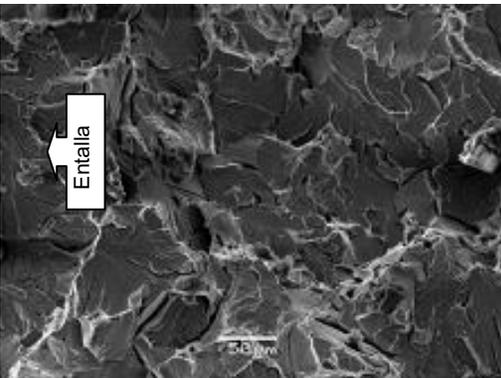
Fractografía, 16MnCr5. Estado en suministro. SEM y EDS



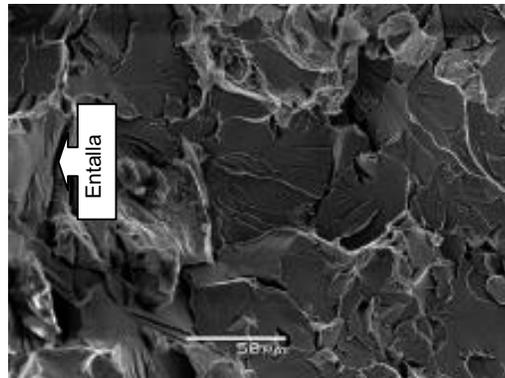
x0,67



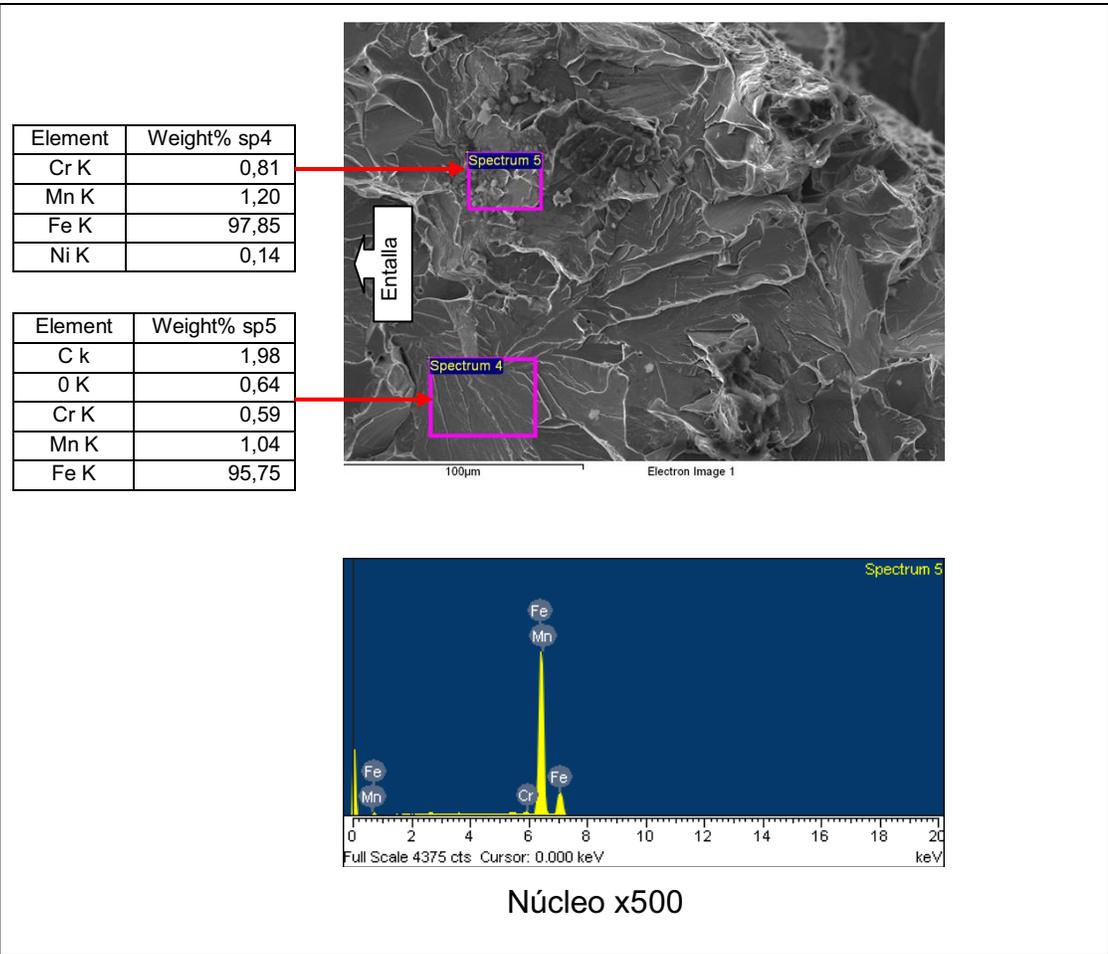
Reglilla 50 μm núcleo x300



Reglilla 50 μm borde x300

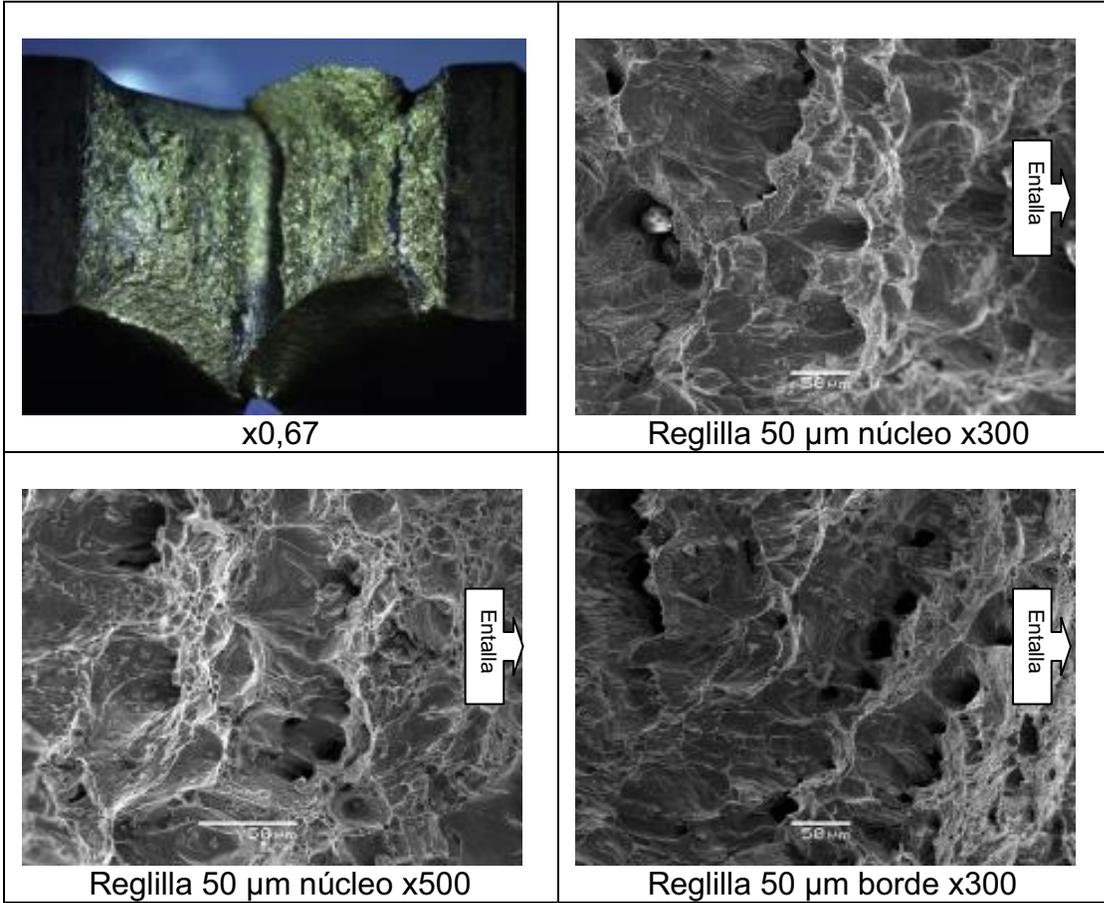


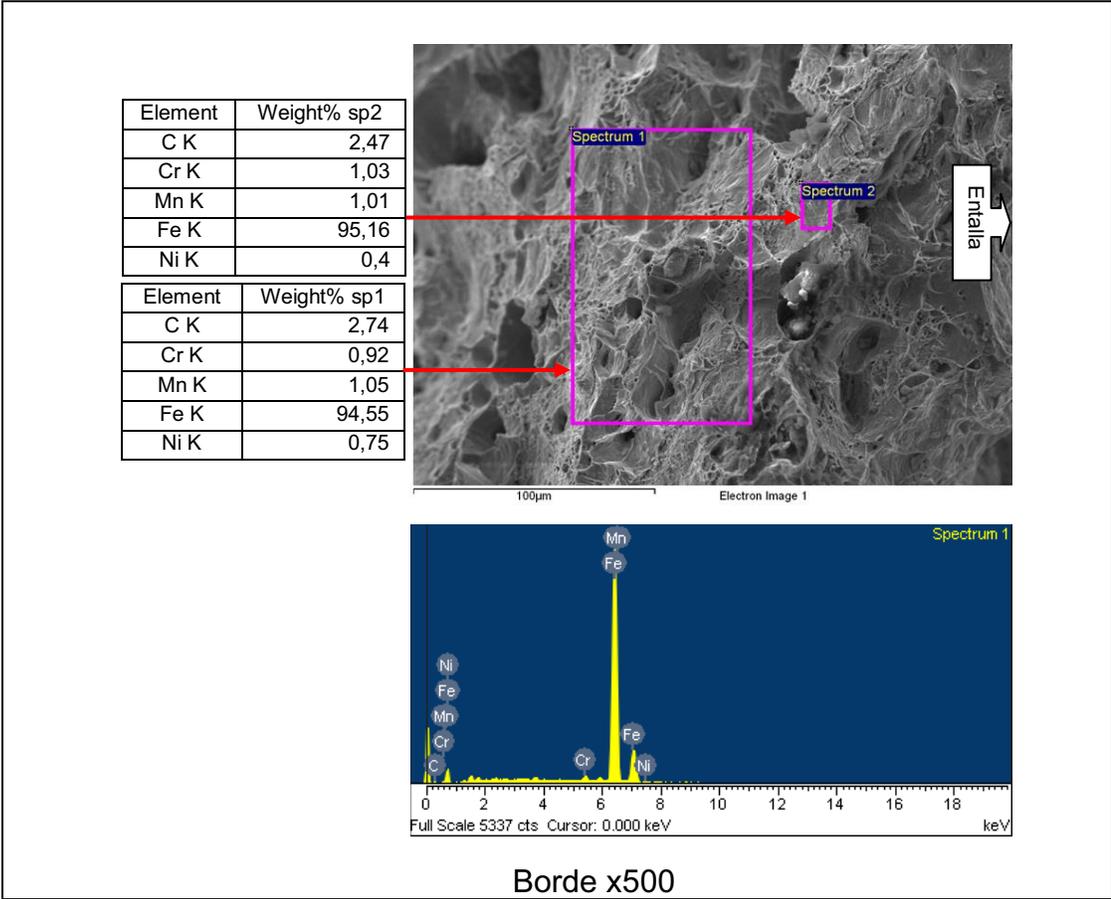
Reglilla 50 μm borde x500



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

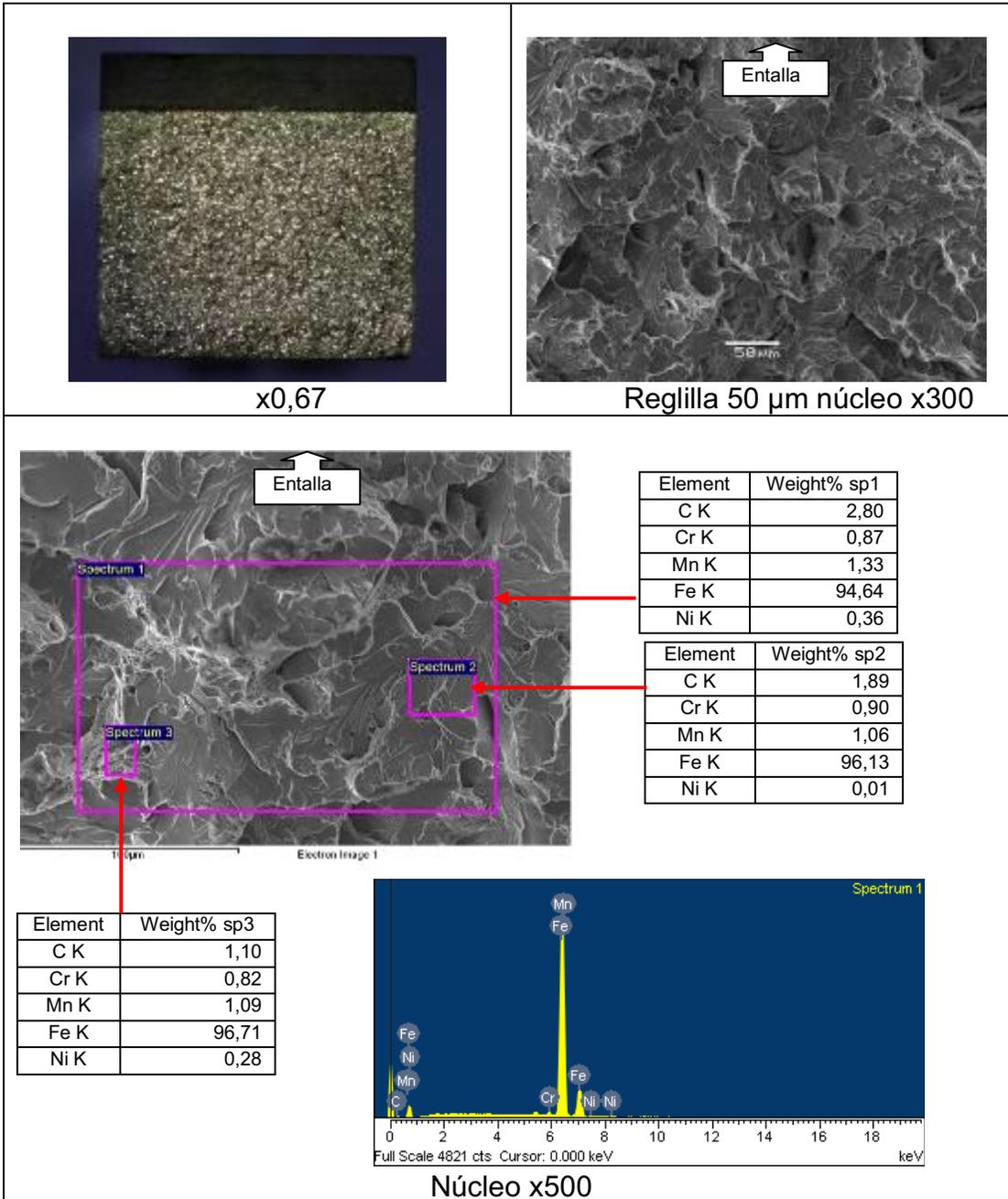
Fractografía, 16CrNi4. Estado en suministro. SEM y EDS

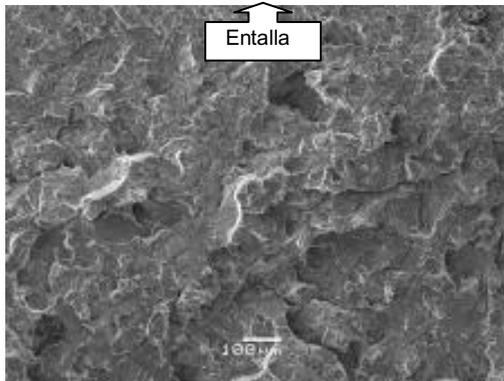




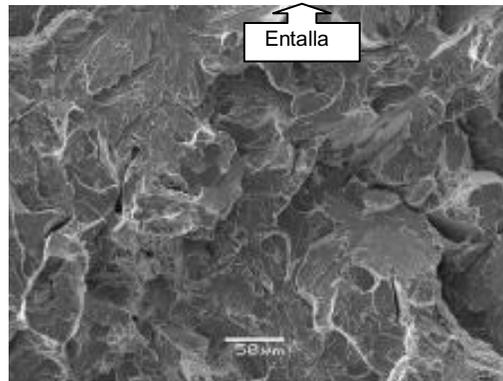
Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Fractografía, 16MnCr5. 6 horas de cementación. SEM y EDS





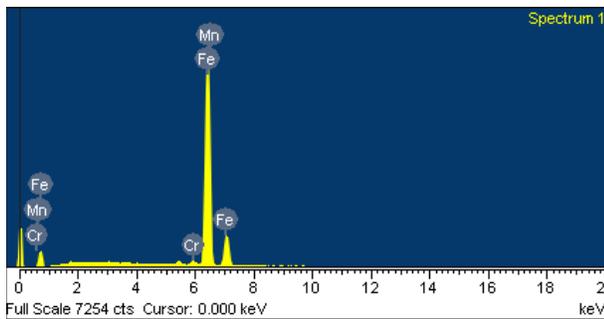
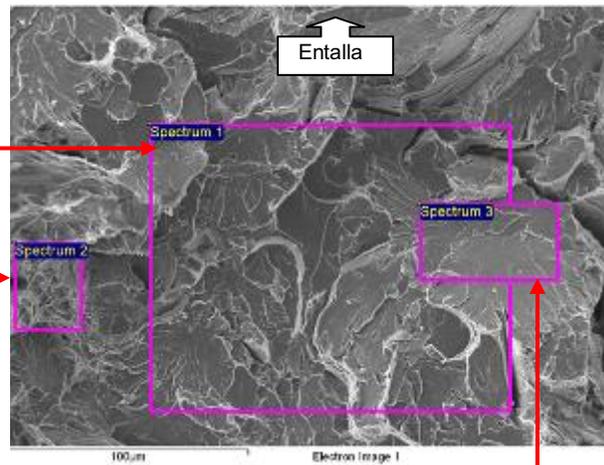
Reglilla 100 μm borde x100



Reglilla 50 μm borde x300

Element	Weight% sp1
C K	1,18
Cr K	0,99
Mn K	1,17
Fe K	96,66

Element	Weight% sp2
C K	2,02
Cr K	0,75
Mn K	1,57
Fe K	95,65

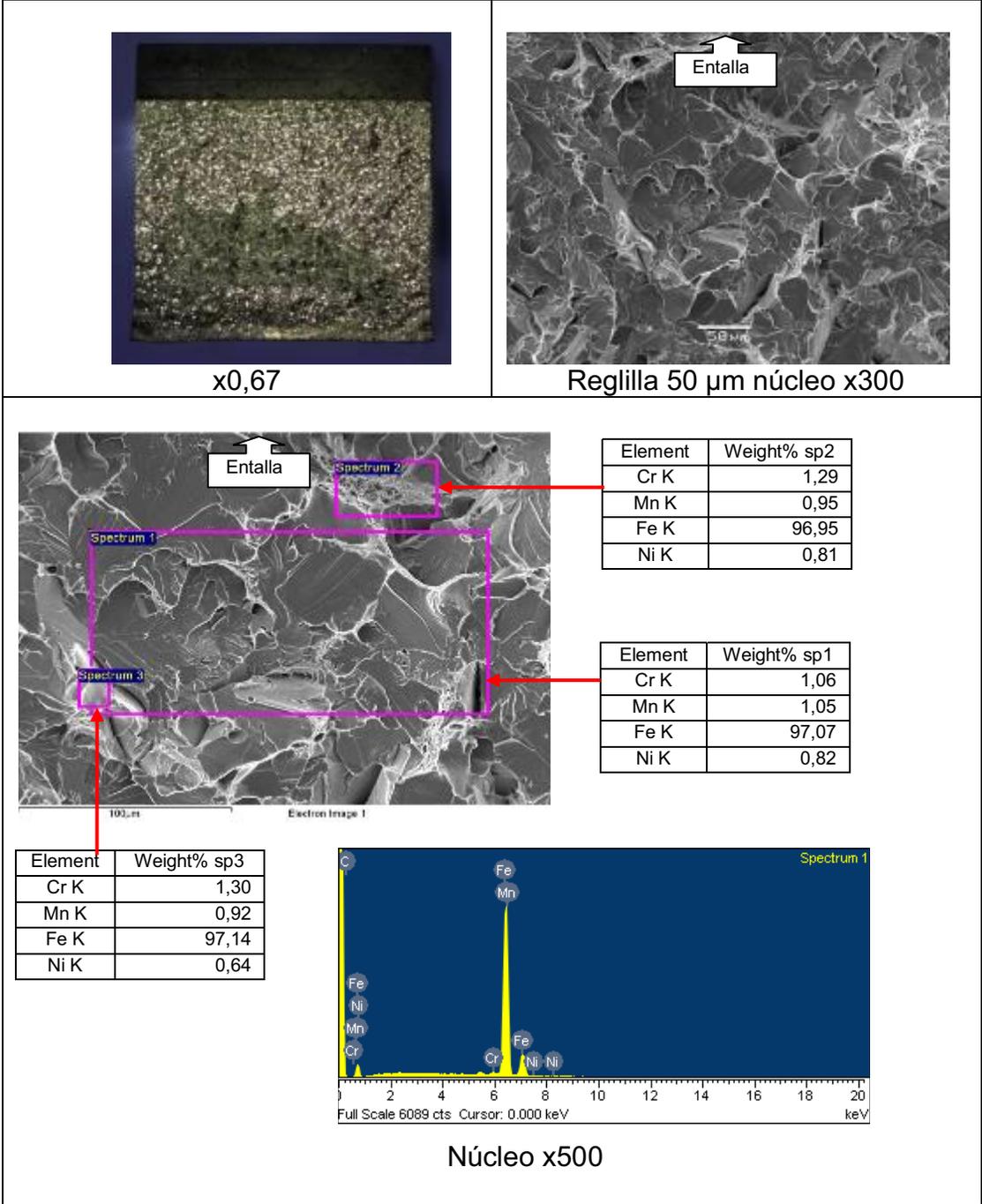


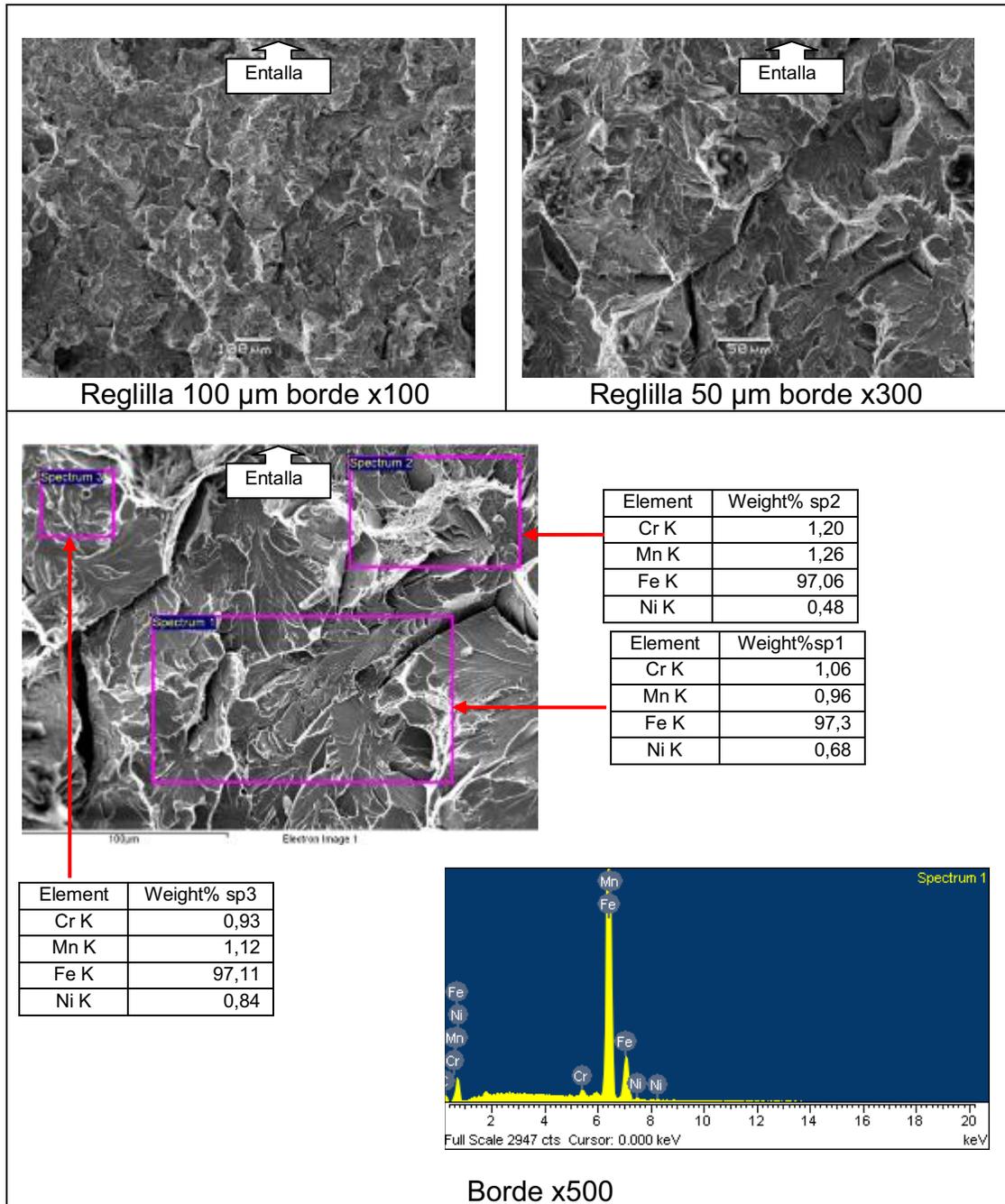
Element	Weight% sp3
C K	1,88
Si K	0,33
Cr K	0,96
Mn K	1,16
Fe K	95,67

Borde x500

Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

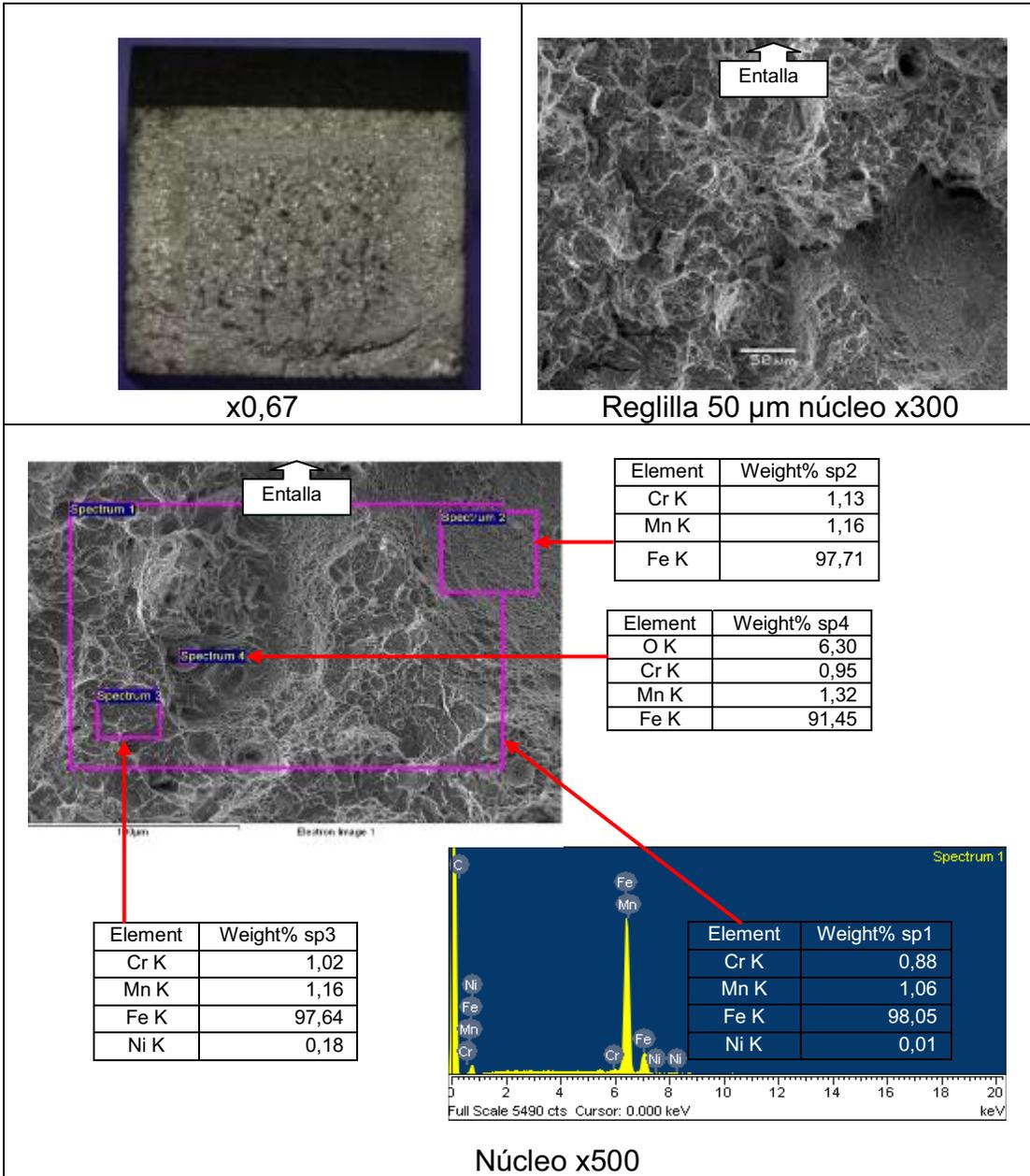
Fractografía, 16CrNi4. 6 horas de cementación. SEM y EDS

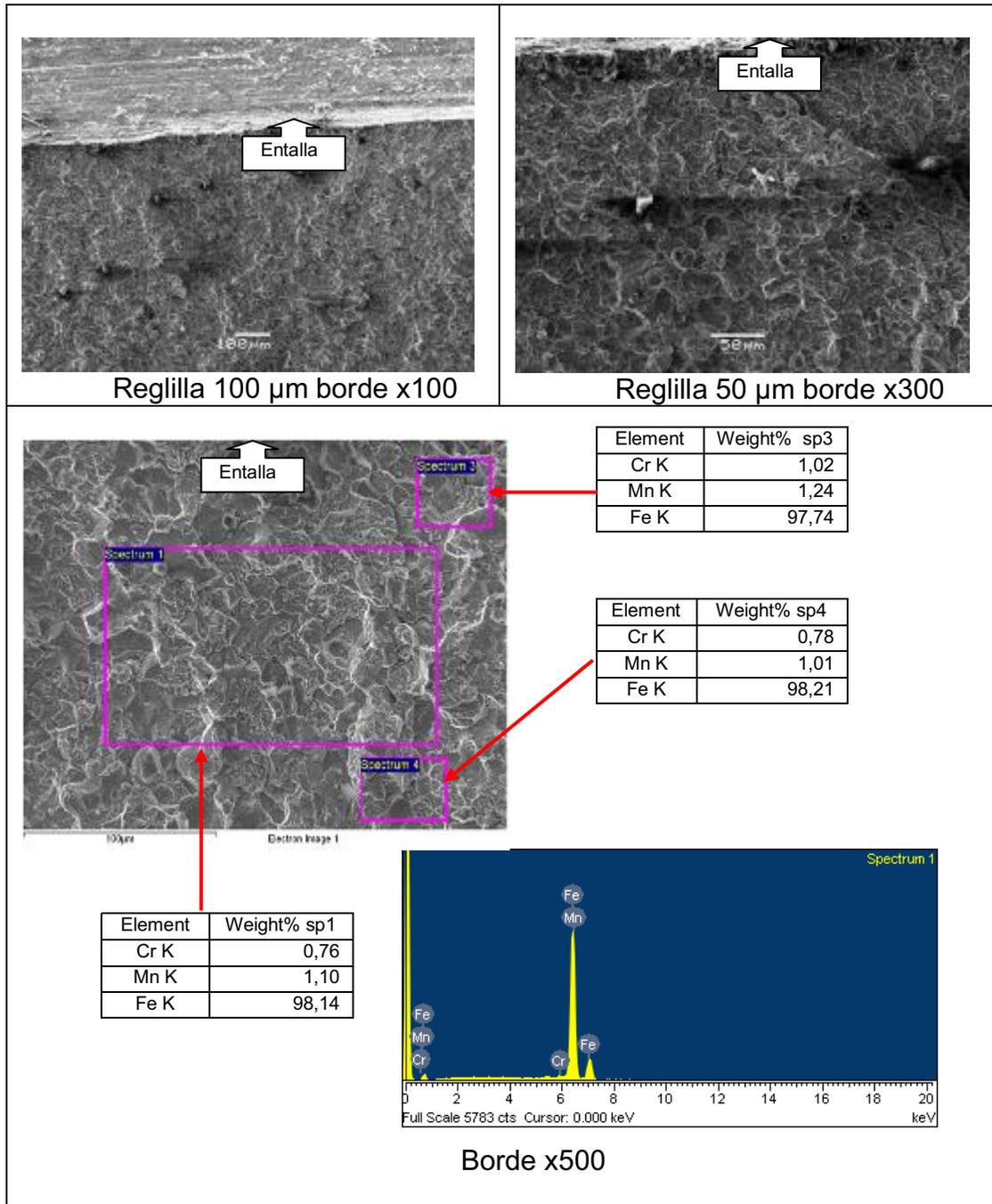




Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

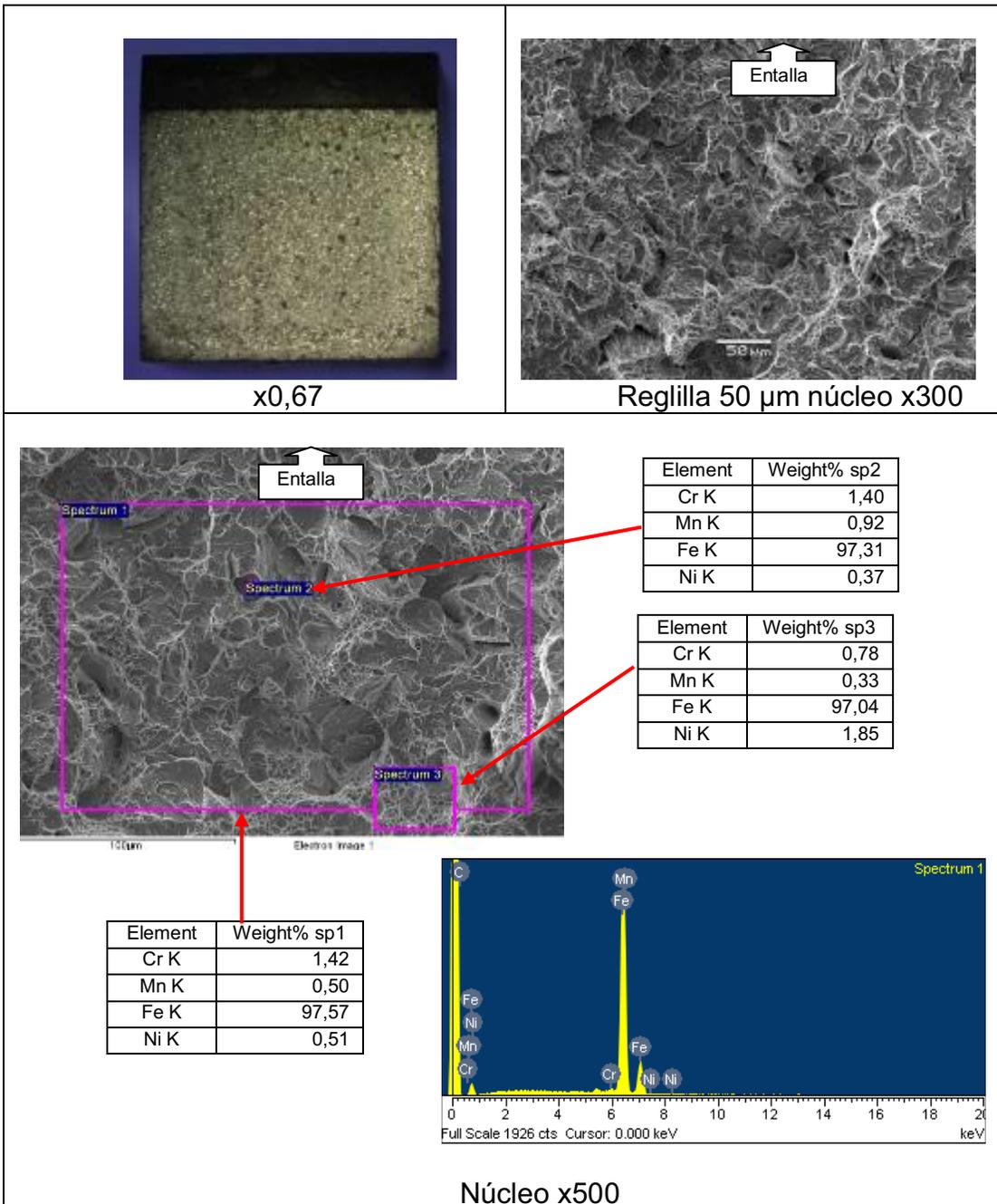
Fractografía, 16MnCr5. 6 horas de cementación y temple. SEM y EDS

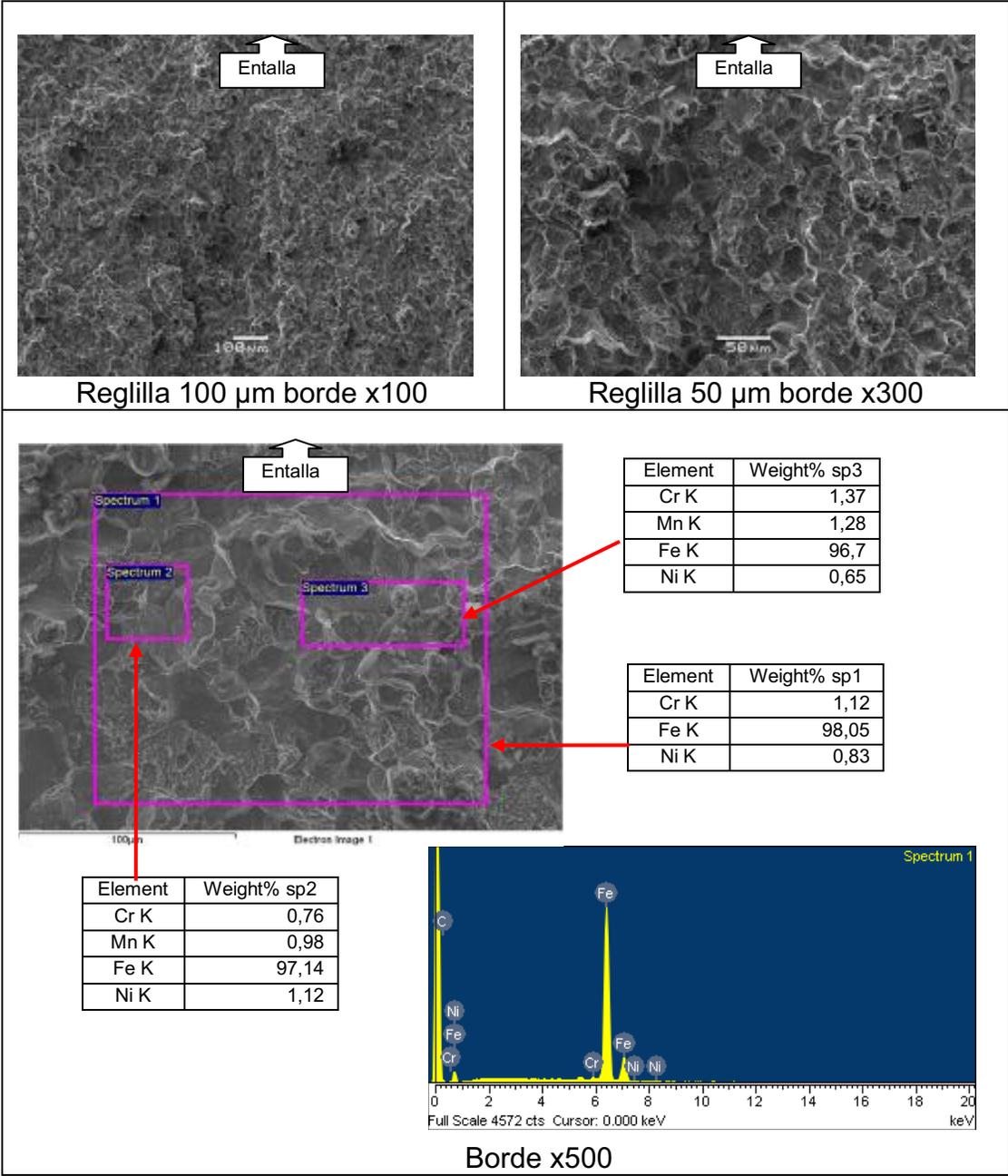




Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Fractografía, 16CrNi4 6 horas de cementación y temple. SEM y EDS





Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.