



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“EFECTO DE LA CARBURIZACIÓN SÓLIDA Y LÍQUIDA EN LA
DUREZA DEL ACERO AISI 1018”**

Trabajo de Titulación

Tipo: proyecto experimental

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTORES: RAMÓN ERNESTO OSTAIZA YANEZ

ALEXANDRA MARCELA PALACIOS JARA

DIRECTOR: Ing. NÉSTOR ALCÍVAR ULLOA AUQUÍ MSc.

Riobamba – Ecuador
2021

© 2021, Ramón Ernesto Ostaiza Yanez; & Alexandra Marcela Palacios Jara

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, RAMÓN ERNESTO OSTAIZA YANEZ Y ALEXANDRA MARCELA PALACIOS JARA declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 21 de diciembre 2021



Ramón Ernesto Ostaiza Yanez

C.I. 220021746-7



Alexandra Marcela Palacios Jara

C.I: 060353116-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Experimental, **“EFECTO DE LA CARBURIZACIÓN SÓLIDA Y LÍQUIDA EN LA DUREZA DEL ACERO AISI 1018”**, realizado por el señor y la señorita: **RAMÓN ERNESTO OSTAIZA YANEZ** y **ALEXANDRA MARCELA PALACIOS JARA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del tribunal del Trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Homero Almendariz Puente PRESIDENTE DE TRIBUNAL	_____	2021-12-21
Ing. Néstor Alcívar Ulloa Auqui M.Sc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2021-12-21
Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar. MSc. MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	2021-12-21

DEDICATORIA

Con cariño para mi amada familia Luis Palacios, Luz Jara, Cristian Palacios y Marieta Palacios pues sin ustedes no lo habría logrado, son quienes con amor y paciencia me motivaron a seguir y no permitieron que un tropiezo fuera el final de este gran sueño que hoy se convierte en realidad.

Alexandra

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestra familia por confiar en nosotros, tal vez no lo han dicho con palabras, pero sí con el apoyo incondicional el cual nos permitió llegar a esta meta.

También a nuestro tutor y amigo Ing. Néstor Ulloa quien con su conocimiento y apoyo camino conmigo en cada etapa de este proyecto llegando a la meta propuesta.

Por último y no menos importante a mi querida institución la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo quien un día nos recibió con los brazos abiertos y nos brindó las herramientas necesarias para ser unos profesionales de calidad y por qué no agradecer por permitirnos conocer a grandes amigos.

Ramón & Alexandra

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xxii
ÍNDICE DE ANEXOS	xxvi
RESUMEN.....	xxv
SUMMARY.....	xxvi
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
JUSTIFICACIÓN	4
Objetivos.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos	5

CAPÍTULO I

1.	MARCO TEÓRICO	6
1.1.	Aceros	6
1.1.1.	<i>Propiedades</i>	6
1.1.2.	<i>Clasificación de los aceros según aleaciones hierro- carbono atendiendo su porcentaje de carbono</i>	6
1.1.2.1.	<i>Aceros para carburizar</i>	7
1.2.	Imperfección cristalina.....	7
1.3.	Defectos de dimensión cero	8
1.3.1.	<i>Soluciones sólidas metálicas</i>	8
1.3.2.	<i>Solución sólida sustitucional</i>	8

1.3.3.	<i>Solución sólida intersticial</i>	9
1.4.	Difusión	9
1.4.1.	<i>Difusión atómica en sólidos</i>	9
1.4.1.1.	<i>Mecanismos de difusión</i>	10
1.4.2.	<i>Difusión en estado estacionario</i>	11
1.5.	Primera ley de Fick	12
1.6.	Ley de Arrhenius	12
1.6.1.	<i>Coefficiente de difusión</i>	14
1.8.	Segunda ley de Fick	16
1.9.	Difusión atómica en líquidos	17
1.10.	Tratamientos termoquímicos	18
1.10.1.	<i>Cementación o Carburización</i>	18
1.10.1.1.	<i>Carburización de empaquetamiento en cajas</i>	19
1.10.1.2.	<i>Carburización líquida o baño de sales</i>	20
1.11.	Precauciones de seguridad para el uso de cianuro de sodio	23
1.12.	Coque	23
1.13.	Dureza	23
1.13.1.	<i>Dureza Brinell</i>	23
1.13.2.	<i>Dureza Vickers</i>	24
1.13.3.	<i>Factores que influyen en la dureza de un material industrialmente</i>	24
1.13.3.1.	<i>Presencia de carbono</i>	24
1.13.3.2.	<i>Tamaño de grano</i>	25
1.13.3.3.	<i>Presencia o no de elementos aleados</i>	25
1.14.	Metalografía	25
1.14.1.	<i>Ataque metalográfico</i>	26
1.14.2.	<i>Pical</i>	26
1.14.3.	<i>Nital 2%</i>	26
1.15.	Tratamientos térmicos	26
1.15.1.	<i>Temple</i>	27

1.15.1.1.	<i>Fases del Temple</i>	27
1.15.2.	Recocido	30
1.15.2.1.	<i>Tipos de Recocido</i>	30
1.15.3.	Revenido	30
1.15.3.1.	<i>Fases del Revenido</i>	30
1.15.4.	Normalizado	31
1.15.4.1.	<i>Fases del Normalizado</i>	31

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	33
2.1.	Tipo de estudio	33
2.2.	Modalidad de investigación	33
2.2.1.	<i>Descriptiva</i>	33
2.2.2.	<i>Documental</i>	33
2.2.3.	<i>Experimental</i>	33
2.3.	Metodología	34
2.3.1.	<i>Métodos de experimentación</i>	34
2.4.	Materiales	35
2.4.1.	<i>Materiales para análisis metalográfico</i>	35
2.6.	Mecanizado de las probetas del Acero AISI 1018	39
2.6.1.	<i>Adquisición de un eje macizo de Acero AISI 1018 de 1-1/2'' pulgada de diámetro</i>	40
2.6.2.	<i>Corte del eje en probetas de 20 mm de altura cada una</i>	40
2.6.3.	<i>Desbaste grueso, medio y fino de cada una de las probetas</i>	41
2.6.4.	<i>Pulido de cada muestra</i>	42
2.6.5.	<i>Lavado de muestra con agua y alcohol y secado</i>	42
2.6.6.	<i>Ataque químico</i>	43
2.6.7.	<i>Pruebas de dureza y microestructura en el material base</i>	43

2.7.	Carburización sólida	47
2.7.1.	<i>Cálculo de la población de estudio</i>	48
2.7.2.	<i>Adquisición y ensambladura de contenedor cerrado para la carburización</i>	49
2.7.3.	<i>Preparación de la mezcla de carbonato de calcio (catalizador) y coque</i>	49
2.7.4.	<i>Introducción de las probetas de acero AISI 1018 dentro del contenedor</i>	50
2.7.5.	<i>Precalentar el horno de fundición a la temperatura de carburización correspondiente en cada tratamiento</i>	51
2.7.6.	<i>Montaje del contenedor con las probetas y mezcla en el horno de tratamientos de termoquímicos</i>	51
2.7.7.	<i>Permanencia del horno de tratamientos termoquímicos a la temperatura requerida durante los tiempos de carburización correspondientes</i>	52
2.8.	Carburización líquida	63
2.8.1.	<i>Elaboración del contenedor abierto para la carburización líquida</i>	64
2.8.2.	<i>Preparación de la proporción del baño de sales</i>	64
2.8.3.	<i>Precalentamiento del horno de tratamiento térmico a la temperatura de carburización correspondiente de cada tratamiento.</i>	64
2.8.4.	<i>Introducción del contenedor con la mezcla al horno de tratamiento térmico y sumersión de la probeta</i>	65
2.8.5.	<i>Permanencia del horno de tratamiento térmico a la temperatura y tiempo de carburización correspondientes</i>	65
2.8.8.	<i>Extraer la probeta del baño en sales de cianuro y enfriamiento al ambiente</i>	67
2.8.9.	<i>Tratamientos térmicos a las probetas carburizadas</i>	68
2.8.10.	<i>Bonificado</i>	68
2.8.10.1.	<i>Temple</i>	68
2.8.10.2.	<i>Revenido</i>	72
2.9.	Mecanizado de las probetas del Acero AISI 1018 posterior a tratamientos: termoquímico (carburización) y térmicos (temple y revenido)	74

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	75
3.1.	Microestructuras Finales	75
3.1.1.	<i>Microestructuras Finales del acero AISI 1018 sometidas a carburización sólida</i>	75
3.1.2.	<i>Microestructuras Finales del acero AISI 1018 sometidas a carburización líquida</i>	94
3.2.	Microensayo de dureza vickers	100
3.3.	Ensayo de micro dureza Vickers en una probeta AISI 1018 en condiciones normales	101
3.4.	Ensayo de micro dureza Vickers de la temperatura de carburización T=1883°K	101
3.5.	Ensayo de micro dureza Vickers de la temperatura de carburización T=1203°K.	107
3.6.	Ensayo de micro dureza Vickers de la temperatura de carburización T=1223°K.	113
3.7.	Diseño experimental	124
	CONCLUSIONES	136
	RECOMENDACIONES	139
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Clasificación de los aceros según aleaciones hierro- carbono.....	6
Tabla 2-1:	Composición del Acero AISI 1018	7
Tabla 3-1:	Coefficiente de difusión.....	14
Tabla 4-1:	Tabla de función del error	17
Tabla 5-1:	Composiciones de baños de carburización líquidos (en % en peso)	21
Tabla 6-1:	Contenido de cianuro de sodio en un baño de carburación líquido a diferente temperatura de funcionamiento	22
Tabla 7-1:	Relación entre el % C, dureza, fragilidad y resistencia mecánica	25
Tabla 8-1:	Relación entre el % C, dureza, fragilidad y resistencia mecánica	25
Tabla 1-2:	Materiales y equipos para el análisis metalográfico.....	35
Tabla 2-2:	Materiales y equipos para la carburización sólida.....	37
Tabla 3-2:	Materiales y equipos para la carburización líquida.....	38
Tabla 4-2:	Temperatura T (°C)	48
Tabla 5-2:	Concentración obtenida tras la carburización C _x (%)	48
Tabla 6-2:	Concentración obtenida tras la carburización C _x (%)	48
Tabla 7-2:	Parámetros para selección del neplo galvanizado	49
Tabla 8-2:	Temperatura de carburización	51
Tabla 9-2:	Concentración obtenida tras la carburización C _x (%)	53
Tabla 10-2:	Temperatura de Carburización	53
Tabla 11-2:	Parámetros iniciales para el cálculo del tiempo.....	53
Tabla 12-2:	Interpolación.....	55
Tabla 13-2:	Tiempos de carburización para la temperatura de 1183°K.....	55
Tabla 14-2:	Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x = 0,40$	56
Tabla 15-2:	Valor de $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x = 0,40$	56
Tabla 16-2:	Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x = 0,50$	56
Tabla 17-2:	Valor de $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x = 0,50$	56
Tabla 18-2:	Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x = 0,60$	56

Tabla 19-2: Valor de $Z_{T=1183^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$	57
Tabla 20-2: Tiempos de carburización para la temperatura de 1203°K	57
Tabla 21-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,40$	58
Tabla 22-2: Valor de $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,40$	58
Tabla 23-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,50$	58
Tabla 24-2: Valor de $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,50$	58
Tabla 25-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$	59
Tabla 26-2: Valor de $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$	59
Tabla 27-2: Tiempos de carburización para la temperatura de 1203°K	59
Tabla 28-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,40$	60
Tabla 29-2: Valor de $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,40$	60
Tabla 30-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,50$	60
Tabla 31-2: Valor de $Z_{T=1223^{\circ}\text{F}}$ cuando $C_x=0,50$	60
Tabla 32-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$	61
Tabla 33-2: Valor de $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$	61
Tabla 34-2: Porcentajes de los componentes para mezcla del baño de sal.	64
Tabla 35-2: Constante de penetración.....	65
Tabla 36-2: Conversión de la Tabla 32-2.....	65
Tabla 37-2: Interpolación de la constante de penetración de 910°C	66
Tabla 38-2: Interpolación de la constante de penetración de 930°C	66
Tabla 40-2: Cálculo del tiempo de carburización líquida para 910°C	66
Tabla 41-2: Tiempo de carburización líquida para 910°C	66
Tabla 42-2: Cálculo del tiempo de carburización líquida para 930°C	67
Tabla 43-2: Tiempo de carburización líquida para 930°C	67
Tabla 44-2: Cálculo del tiempo de carburización líquida para 950°C	67
Tabla 45-2: Tiempo de carburización líquida para 950°C	67
Tabla 46-2: Resumen de la temperatura crítica de temple para las temperaturas trabajadas... ..	69
Tabla 47-2: Resumen de la temperatura crítica de temple para las temperaturas trabajadas... ..	70
Tabla 1-3: Micro dureza Vickers en condiciones normales.....	101

Tabla 2-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,4% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,74 horas	101
Tabla 3-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,4% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,40 horas	102
Tabla 4-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,5% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,18 horas.	103
Tabla 5-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,22 horas	104
Tabla 6-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 10,77 horas	105
Tabla 7-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 16,82 horas.	106
Tabla 8-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,82 horas.	107
Tabla 9-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 5,97 horas.	108
Tabla 10-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 5,69 horas	109
Tabla 11-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 8,89 horas	110
Tabla 12-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 8,67 horas	111
Tabla 13-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 13,54 horas	112
Tabla 14-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,05 horas	113
Tabla 15-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 4,76 horas.	114
Tabla 16-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,64 horas	115
Tabla 17-3:	Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25milímetros y un tiempo de 7,24 horas	116

Tabla 18-3: Número de microdureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,14 horas.	117
Tabla 19-3: Número de microdureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,16 horas	118
Tabla 20-3: Micro dureza medida experimentalmente en las probetas sometidas a carburización sólida.....	119
Tabla 21-3: Micro dureza medida experimentalmente en las probetas sometidas a carburización líquida.	122
Tabla 22-3: Factores y niveles del diseño experimental de la carburización sólida.	124
Tabla 23-3: Diseño experimental mixto de carburización sólida.....	125
Tabla 24-3: Parámetros del diseño experimental.....	125
Tabla 26-3: Datos para la sumatoria de cuadrados del factor A.	125
Tabla 27-3: Datos de la interacción entre los factores A y B.....	125
Tabla 28-3: Datos de la interacción entre los factores A y C.....	126
Tabla 29-3: Datos de la interacción entre los factores B y C.....	127
Tabla 30-3: Factor de corrección y sumatoria de cuadrados.....	128
Tabla 31-3: Análisis ANOVA del diseño experimental de carburización sólida.	129
Tabla 32-3: Coeficiente de variabilidad.....	129
Tabla 33-3: Estadístico de prueba y LSD	130
Tabla 34-3: Límites inferior y superior y promedio de los factores A, B y C.	130
Tabla 35-3: Factores y niveles del diseño experimental de la carburización líquida.....	132
Tabla 36-3: Diseño experimental mixto de la carburización líquida.	132
Tabla 37-3: Datos para la sumatoria de cuadrados del factor A.	132
Tabla 38-3: Datos para la sumatoria de cuadrados del factor B.....	132
Tabla 39-3: Datos de la interacción entre los factores A y B.....	133
Tabla 40-3: Parámetros del diseño experimental de la carburización líquida.....	133
Tabla 41-3: Factor de corrección y sumatoria de cuadrados.....	133
Tabla 42-3: Análisis ANOVA del diseño experimental de carburización líquida.	134
Tabla 43-3: Coeficiente de variabilidad.....	134
Tabla 44-3: Estadístico de prueba y LSD.	134

Tabla 45-3: Límites inferior y superior y promedio de los factores A y B..... 134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Propiedades de los aceros	6
Figura 2-1:	a) Vacante. b) intersticial o autointersticial, defectos puntuales en una red metálica compacta.	8
Figura 3-1:	a) Vacante. b) intersticial o autointersticial, defectos puntuales en una red metálica compacta.	10
Figura 4-1:	Difusión intersticial.....	11
Figura 5-1:	Difusión en estado estacionario.	11
Figura 6-1:	Energía de activación.....	13
Figura 7-1:	Representación típica de Arrhenius de datos de velocidad experimentales.....	14
Figura 8-1:	Difusión en estado no estacionario.	16
Figura 9-1:	Proceso de carburización	19
Figura 10-1:	Principio de medición del número de dureza Rockwell (diamant).	24
Figura 11-1:	Intervalo de temperatura para el temple o endurecimiento de los aceros	28
Figura 1-2:	Diagrama de Flujo de la carburización sólida.....	39
Figura 2-2:	Eje de Acero AISI 1018.....	40
Figura 3-2:	Corte manual del eje AISI 1018.....	40
Figura 4-2:	Desbaste de las probetas.	41
Figura 5-2:	Muestra de una probeta tipo espejo.....	42
Figura 6-2:	Proceso de pulido.	42
Figura 7-2:	Proceso de lavado de la probeta AISI 1018.	43
Figura 8-2:	Proceso de secado de la muestra AISI 1018.	43
Figura 9-2:	Montaje de la muestra AISI 1018 en el micro durómetro Micromet II.	44
Figura 10-2:	Diagonales de la huella del identador de diamante.....	44
Figura 11-2:	Medición de la diagonal 1 a través de las líneas filiales.	45
Figura 12-2:	Medición de la diagonal 2 a través de las líneas filiales.	45
Figura 13-2:	Análisis de micro estructuras.....	46
Figura 14-2:	Diagrama de flujo de la carburización sólida.....	47
Figura 15-2:	Porcentaje de mezcla del coque.	50

Figura 16-2: Porcentaje de mezcla del carbonato de calcio.....	50
Figura 17-2: Montaje de la probeta AISI 1018 en el contenedor.....	51
Figura 18-2: Desmontaje de la probeta AISI 1018 en el contenedor.....	61
Figura 19-2: Probeta AISI 1018 carburizada.....	62
Figura 20-2: Diagrama de flujo del proceso de carburización líquida.....	63
Figura 21-2: Probeta AISI 1018 carburizada.....	64
Figura 22-2: Temperatura de austenización para las temperaturas de carburización sólida.....	69
Figura 23-2: Diagrama TTT de temple.....	71
Figura 24-2: Diagrama de Flujo del mecanizado de probetas tratadas.....	74
Figura 1-3: Muestra 1. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/4,74horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	75
Figura 2-3: Muestra 1. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/4,74horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	76
Figura 3-3: Muestra 2. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/7,40horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	76
Figura 4-3: Muestra 2. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/7,40horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	77
Figura 5-3: Muestra 3. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/7,18horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	77
Figura 6-3: Muestra 3. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/7,18horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	78
Figura 7-3: Muestra 4. (Núcleo). Ferrita y perlita. Prueba a 1183°K/11,22horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	78
Figura 8-3: Muestra 4. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/11,22horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	79
Figura 9-3: Muestra 5. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/10,77horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	79
Figura 10-3: Muestra 5. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/10,77horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	80
Figura 11-3: Muestra 6. (Núcleo). Ferrita y perlita. Prueba a 1183°K/16,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	80

Figura 12-3: Muestra 6. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/16,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	81
Figura 13-3: Muestra 7. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/3,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	82
Figura 14-3: Muestra 7. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/3,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	82
Figura 15-3: Muestra 8. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/5,97horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	83
Figura 16-3: Muestra 8. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/5,97horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	83
Figura 17-3: Muestra 9. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/5,69horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	84
Figura 18-3: Muestra 9. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/5,69horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	84
Figura 19-3: Muestra 10. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/8,89horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	85
Figura 20-3: Muestra 10. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/8,89horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	85
Figura 21-3: Muestra 11. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/8,67horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	86
Figura 22-3: Muestra 11. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/8,67horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	86
Figura 23-3: Muestra 12. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/13,54horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	87
Figura 24-3: Muestra 12. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/13,54horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	87
Figura 25-3: Muestra 13. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/3,05horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	88
Figura 26-3: Muestra 13. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°C/3,05 horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	88
Figura 27-3: Muestra 14. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/4,76horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	89

Figura 28-3: Muestra 14. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/4,76horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	89
Figura 29-3: Muestra 15. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/4,64horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	90
Figura 30-3: Muestra 15. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/4,64horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	90
Figura 31-3: Muestra 16. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/7,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	91
Figura 32-3: Muestra 16. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/7,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	91
Figura 33-3: Muestra 17. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/7,14horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	92
Figura 34-3: Muestra 17. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/7,14horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	92
Figura 35-3: Muestra 18. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/11,16horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	93
Figura 36-3: Muestra 18. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/11,16horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.....	93
Figura 37-3: Muestra 19. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1883°K/3,02horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	94
Figura 38-3: Muestra 19. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1883°K/3,02horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	94
Figura 39-3: Muestra 20. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1883°K/4,71horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	95
Figura 40-3: Muestra 20. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1883°K/4,71horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	95
Figura 41-3: Muestra 21. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/2,48horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	96
Figura 42-3: Muestra 21. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/2,48horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	96
Figura 43-3: Muestra 22. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/3,88horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	97

Figura 44-3: Muestra 22. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/3,88horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	97
Figura 45-3: Muestra 23. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/2,07horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	98
Figura 46-3: Muestra 23. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/2,07horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	98
Figura 47-3: Muestra 24. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/3,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	99
Figura 48-3: Muestra 24. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/3,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.....	99
Figura 49-3: Probeta AISI 1018 carburizada.....	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Micro dureza de probeta AISI 1018 en condiciones normales.....	101
Gráfico 2-3: Micro dureza en la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,4%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,74 horas	102
Gráfico 3-3: Micro dureza en la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,4%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,40 horas	103
Gráfico 4-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,5% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,18 horas	102
Gráfico 5-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,50%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,22 horas	10303
Gráfico 6-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 10,77 horas	106
Gráfico 7-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 16,82 horas	107
Gráfico 8-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con: %C=0,40%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,82 horas	108
Gráfico 9-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,40%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 5,97 horas	109
Gráfico 10-3: Micro dureza de la Probeta AISI 1018 carburizada con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 5,69 horas	10308
Gráfico 11-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 8,89 horas	111
Gráfico 12-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 8,67 horas ...	10310
Gráfico 13-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 13,54 horas	113
Gráfico 14-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,05 horas	1032
Gráfico 15-3: Micro dureza en la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,4%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,40 horas	1033

Gráfico 16-3: Micro durezas de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,50%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,64 horas	116
Gráfico 17-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,24 horas	117
Gráfico 18-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,14 horas.	118
Gráfico 19-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,16 horas.	119
Gráfico 20-3: Micro dureza superficial HV 1 de las probetas posterior a una carburización sólida.	120
Gráfico 21-3: Micro dureza superficial HV 2 de las probetas posterior a una carburización sólida.	121
Gráfico 22-3: Relación de micro dureza superficial HV 1 y HV 2 de las probetas posterior a una carburización sólida	121
Gráfica 23-3: Micro dureza superficial HV 1 de las probetas posterior a una carburización líquida	123
Gráfico 24-3: Micro dureza superficial HV 2 de las probetas posterior a una carburización líquida	123
Gráfico 25-3: Relación de Micro dureza superficial HV 1 Y HV 2 de las probetas posterior a una carburización líquida.	124
Gráfica 26-3: Diagrama LSD de la carburización sólida	131
Gráfico 27-3: Diagrama LSD de la carburización líquida.	135

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

ANEXO B: FICHA TECNICA DEL ACERO AISI 1018

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto fue analizar el efecto de la carburización sólida y líquida en la dureza del acero al carbono AISI 1018 pretendiendo mejorar las propiedades individuales del acero para incrementar la vida útil y el rendimiento de las piezas. El estudio inició con el análisis de la situación actual y revisión de hojas técnicas del Acero AISI 1018 para conocer sus propiedades y estructura, seguido del estudio y entendimiento de la aplicación del tratamiento termoquímico de carburización: sólida y líquida mediante la literatura científica existente. Los especímenes se obtuvieron por mecanizado con un área suficiente para visualizar su microestructura. La caracterización micro estructural después de los ensayos de carburización se realizaron mediante técnicas analíticas instrumentales, tales como: dureza vickers (micro dureza) y microscopía óptica. Los resultados obtenidos demostraron que el tratamiento más efectivo de la carburización sólida fue el aplicado a la probeta 18 con un promedio de micro dureza de 852,40 HV. Este tratamiento se llevó a cabo a 1223 °K durante 10,60 horas, se obtuvo una concentración superficial de 0,60% de carbono y una capa carburizada de 1,25 mm y de la carburización líquida fue el correspondiente a la probeta 24, con un promedio de micro dureza de 778 HV y un tiempo de 3,24 horas; se descartó la probeta 22 puesto que existió un tiempo mayor en 0,64 horas y con un menor promedio de micro dureza (767 HV). Se concluyó que la concentración de carbono final, la temperatura de carburización y la profundidad de la capa carburizada son directamente proporcionales a la micro dureza Vickers, siendo la última la más influyente. Se recomendó plantear un diseño experimental que considere el método de carburización como factor cuyos niveles sean sólida y líquida.

<CARBURIZACIÓN>, <BONIFICADO>, <MICRO DUREZA VICKERS>, < DIFUSIÓN>, <CAPA SUPERFICIAL>.



Elaborado y Contribuido por:
**HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA**

0465-DBRA-UPT-2022

2022-03-14

SUMMARY

The objective of the present project was to analyze the effect of solid and liquid carburization on the hardness of AISI 1018 carbon steel aiming to improve the individual properties of the steel to increase the service life and performance of the parts. The study started with the analysis of the current situation and review of technical sheets of AISI 1018 steel to know its properties and structure, followed by the study and understanding of the application of the thermochemical treatment of solid and liquid carburization through the existing scientific literature. The specimens were obtained by machining with a sufficient area to visualize their microstructure. The microstructural characterization after carburization tests were performed by instrumental analytical techniques, such as Vickers hardness (microhardness) and optical microscopy. The results obtained showed that the most effective solid carburization treatment was the one applied to specimen 18 with an average microhardness of 852.40 HV. This treatment was carried out at 1223 °K for 10.60 hours, a surface concentration of 0.60% of carbon and a carburized layer of 1.25 mm was obtained and the liquid carburization was the one corresponding to specimen 24, with an average microhardness of 778 HV and a time of 3.24 hours; specimen 22 was discarded since there was a long time in 0.64 hours and with a lower average microhardness (767 HV). It was concluded that the final carbon concentration, the carburization temperature, and the depth of the carburized layer are directly proportional to the Vickers microhardness, the latter being the most influential. It is recommended to propose an experimental design that considers the carburization method as a factor whose levels are solid and liquid.

Keywords: <SOLID CARBURIZATION> <LIQUID CARBURIZATION>
<THERMOCHEMICAL TREATMENT> <VICKERS MICROHARDNESS> <SURFACE LAYER>.

ALEXANDRA
ELIZABETH
OROZCO
HERNANDEZ

Firmado digitalmente por
ALEXANDRA
ELIZABETH OROZCO
HERNANDEZ
Fecha: 2022.03.15
08:05:34 -05'00'

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

A continuación, se presenta resultados de investigaciones relacionados directamente con el objetivo de estudio:

En el trabajo de investigación realizado por (Ayala et al., 2007) denominado ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO AL DESGASTE DE ACEROS 1018 Y 8620 RECUBIERTOS MEDIANTE UN PROCESO DE CEMENTACIÓN SÓLIDA expone la investigación sobre el proceso de cementación sólida, en los aceros SAE1018 y SAE8620, los cuales fueron sometidos al horno de cementado durante 2, 4, y 6 horas dando como resultado que al templearlos en agua los aceros AISI 1018 bajos en carbono, se consigue la máxima dureza en la capa cementada, cuando los tiempos de austenización son prolongados a temperatura máxima hay crecimiento de grano, lo que no es recomendable porque se fragiliza el material, el alto contenido de carbono en la superficie provoca, después del temple, una fase de austenita retenida, la cual debe eliminarse para evitar durezas heterogéneas superficiales. La austenita residual se logra eliminar con el posterior revenido formando una martensita dura. Para fines prácticos y experimentales se recomienda que se realice un segundo revenido para de esta manera homogenizar la martensita. Tras el análisis se pudo determinar que el uso del acero 1018 cementado se recomienda donde no se requiera altas propiedades de resistencia al impacto o desgaste. Por otra parte, el acero 8620 cementado, desarrolla mejores propiedades, por la presencia de elementos de aleación como son: el cromo, níquel y molibdeno, ya que el cromo y molibdeno aumentan la templeabilidad del acero, regulan el tamaño de grano y son formadores de carburos muy estables, mientras que el níquel se disuelve en la ferrita aumentando la tenacidad del núcleo. Concluyendo que estos aceros después del temple se pueden utilizar en trabajos más específicos, como la fabricación de cigüeñales, bielas, pernos, en donde puedan soportar trabajos de fatiga, abrasión, impacto, etc.

Del proyecto denominado ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTADO EN LA DUREZA SUPERFICIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018 realizado por (Mendez, 2021), menciona que: El tratamiento termoquímico “cementado” en el acero AISI 1018 es conocido como carburización y esto consiste en aumentar el contenido de carbono de un acero bajo en el mismo, para lo cual sometieron a las probeta a diferentes tiempos y temperaturas obteniendo las mediciones experimentales de dureza superficial con lo que se pudo afirmar que la variable más influyente es el tiempo de cementado seguido por la temperatura lo que dice que los dos factores influyen. De toda esta información se pudo concluir que a medida que se sigue sobrepasando la

temperatura de austenización, el carbono penetra más profundamente en el acero. Mientras que, con un mayor tiempo de exposición a una misma temperatura, el carbono empieza a crear una capa superficial que no se adhiere completamente al acero y puede ser removida con facilidad.

En el trabajo titulado CEMENTACIÓN SÓLIDA DE UN ACERO DE BAJO CARBONO EMPLEANDO CARBÓN VEGETAL Y COQUE COMO ACTIVADOR ECOLÓGICO realizado por (Uxua & Cristobal, 2016) trata de: desarrollo de un compuesto de carbonatación sólido, que se recicla como parte de las materias primas, reduce el costo de producción y reemplaza el activador de carbonatación tradicional de bario (metal pesado), considerado tóxico por las coque que es completamente natural y no tiene restricciones con respecto a las cuestiones del medio ambiente. Las diferentes formulaciones se prepararon variando la masa de carbón vegetal y de coque, obteniéndose así una gama diferente de mezclas, que permiten controlar constantemente el efecto de estas variables sobre el efecto de los nuevos materiales de cementación. Usando una mezcla adecuada de carbón vegetal y coque como material cementante, se consigue la difusión de átomos de carbono hacia el núcleo del acero de bajo carbono SAE: 1020 cuando este se carburiza a 960°C por 6 horas. Concluyendo que el correcto control de la temperatura y tiempo durante el proceso; logrará un incremento de átomos de carbono en la superficie, la cual después de un temple en agua; mejora la dureza superficial manteniendo el núcleo tenaz.

En el proyecto de investigación TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO EN UN ACERO AISI 820 MEDIANTE CEMENTACIÓN SOLIDA UTILIZANDO REBABA DE HIERRO GRIS llevado a cabo por (Luna et al., 2014) expone el desarrollo de un tratamiento termoquímico del acero AISI 8620, para mejorar las propiedades mecánicas y obtener una profundidad de carbono significativa por difusión de carbono dentro del acero, seguido de temple y revenido. La temperatura que se escogió fue de 930°C, con una duración de 12 horas. Después del tratamiento, las probetas fueron sometidas a un estudio mediante análisis químico, metalográfico, ensayo de dureza Vickers y ensayo de tensión. Los resultados que se lograron después del proceso de cementación de este tipo de acero fueron favorables. En términos de dureza, el valor máximo obtenido en la superficie es de 614 HV, lo que indica la estructura martensítica típica de los aceros templados, mientras que la profundidad del cemento es de 1200 μm ; Estos valores son aceptados por la norma ASME 384. Al final, la resistencia a la tracción se ha incrementado al 83% de su valor original.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La globalización ha permitido que la automatización dentro de las industrias se desarrolle, por lo que la implementación de máquinas es primordial. En base a ello, sus componentes deben poseer propiedades mecánicas requeridos por los procesos productivos actuales, uno de los principales es el funcionamiento durante tiempos prolongados expuestos a desgaste y esfuerzos, este último no es necesariamente de gran proporción.

Los tratamientos de ingeniería de superficies térmicos/termoquímicos adecuados producirá un reordenamiento atómico en metales y aleaciones mejorando las propiedades físicas, químicas y mecánicas. Entre los más importantes se encuentran los procesos de tratamientos térmico como el endurecimiento por inmersión, el endurecimiento por inducción y la cementación de la superficie. Los componentes de automóviles como el piñón y cremallera, engranajes, ejes de balancines de válvulas de árbol de levas y ejes, que requieren una alta resistencia a la fatiga, normalmente se endurecen por carburización, sabiendo es una de las técnicas de tratamiento térmico superficial del acero que causa que las capas superficiales produzcan alta dureza y buena resistencia en ambientes corrosivos.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente la competitividad es vital para el éxito de una empresa en el sector industrial, donde se asegura la calidad mediante procesos de producción eficientes lo que implica una importancia de sus componentes metálicos los cuales estarán sometidos a desgaste, corrosión y cargas. A su vez, se busca la obtención de materiales cuyas propiedades mecánicas cumplan con los requerimientos del proceso.

El presente estudio se enfoca en determinar cómo varían las propiedades mecánicas que conlleva la aplicación del tratamiento termoquímico de carburización en el acero AISI 1018 con el fin de otorgar dureza superficial manteniendo un núcleo dúctil del material base, específicamente los procesos de carburización sólida y líquida en sales cumplen con este objetivo. La carburización sólida es un proceso eficiente y económico para pequeños lotes de probetas, además que incluye técnicas simples de enfriamiento lento y la carburización líquida se aplica debido a que posee una capa con mayor profundidad, mayor porcentaje de carbono y menos nitrógeno en su estructura, y una alta velocidad de penetración. También permite la distribución uniforme del contenido de carbono.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el efecto de la carburización sólida y líquida en la dureza del acero AISI 1018.

Objetivos Específicos

- Desarrollar una fundamentación teórica de los tratamientos termoquímicos del acero AISI 1018.
- Definir el procedimiento de carburización sólida y líquida en sales y mecanización de probetas.
- Someter a las probetas a un proceso de carburización variando los parámetros de temperatura y tiempo.
- Caracterizar mediante un análisis metalográfico la superficie carbonada de las probetas.
- Evaluar la dureza superficial en cada una de las probetas.
- Establecer la influencia de la carburización sólida y carburización líquida en sales en la dureza superficial de acero AISI 1018 mediante un análisis estadístico de los resultados.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceros

Se denomina acero a toda aleación hierro-carbono forjable cuyo contenido de carbono esta generalmente comprendido entre 0,008 a 2,1 % de carbono y posee mejores propiedades mecánicas y tecnológicas con respecto a los hierros fundidos.

1.1.1. Propiedades



Figura 1-1: Propiedades de los aceros

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

1.1.2. Clasificación de los aceros según aleaciones hierro- carbono atendiendo su porcentaje de carbono.

Tabla 1-1: Clasificación de los aceros según aleaciones hierro- carbono

Nombre del Acero	%C
Aceros Hipoeutectoides	0,08% HASTA 0,79%

Aceros Eutectoides	0,8
Aceros Hipereutectoides	0,81% HASTA 2,1 %

Fuente: Méndez, 2021

1.1.2.1. Aceros para carburizar

La carburización consigue solucionar el problema de la obtención de gran dureza superficial y buen tenacidad en el núcleo. La carburización consiste en aumentar el porcentaje de carbono de la capa superficial de aceros de bajo contenido de carbono para que una vez templados queden piezas con gran dureza superficial y buena tenacidad (Schey & León Cárdenas, 2002, p.25).

- *Acero AISI/SAE 1018*

Según el trabajo de titulación denominado “Análisis de la influencia del tiempo de aplicación del tratamiento termoquímico de cementado en la dureza superficial del acero AISI/SAE 1018” realizado por (Méndez Curisaca, 2021, p.46): El acero AISI 1018 es un acero para cementar que se utiliza en mayor parte para fabricar elementos de dimensiones no considerables, expuestas al desgaste, resultando sin importancia la dureza en la parte central. Este acero contiene 20% de carbono, y se emplea en aplicaciones sin demasiado esfuerzo, requiriendo algo de tenacidad. Es muy utilizado para cementar y la profundidad de adherencia es superior por el efecto que tiene el manganeso (Mn).

Para una interpretación más accesible de la composición del Acero AISI 1018 se puede verificar en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Composición del Acero AISI 1018

Análisis %	C	Mn	P	S
AISI/SAE 1018	0.15-0.20	0.60	0.04	0.05

Fuente: Méndez, 2021

1.2. Imperfección cristalina

La estructura de los cristales no es perfecta porque poseen imperfecciones que alteran las propiedades mecánicas del material. La clasificación de los defectos en la red cristalina de la matriz es: defectos de dimensión cero, una dimensión y dos dimensiones.

1.3. Defectos de dimensión cero

También llamados defectos puntuales, básicamente son las vacantes e intersticios. Las vacantes se originan debido al reordenamiento atómico de la red cristalina por la movilidad atómica, o también, por una perturbación en el crecimiento del cristal; y pueden intercambiar sitio con otras cercanas al elevar la temperatura, es decir, al aumentar la movilidad atómica. Por otro lado, los intersticios son “huecos” en la estructura cristalina mientras los átomos están situados normalmente.

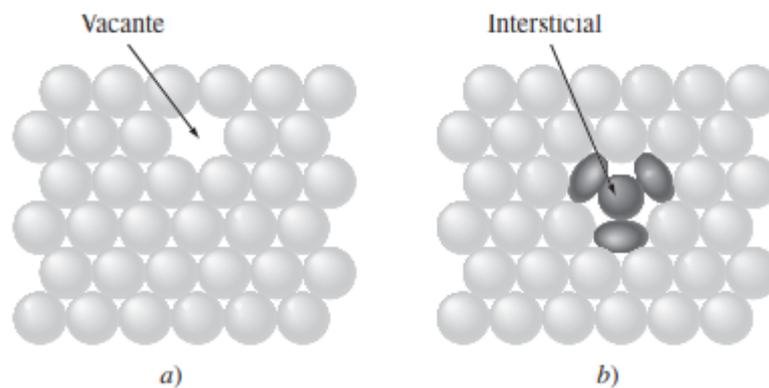


Figura 2-1: a) Vacante. b) intersticial o autointersticial, defectos puntuales en una red metálica compacta.

Fuente: Méndez, 2021.

1.3.1. Soluciones sólidas metálicas

Una aleación metálica es una mezcla de uno o más metales y un no metal; su estructura puede ser relativamente simple o enormemente compleja (superaleación). Así la solución sólida, la aleación más elemental.

Una solución sólida es una aleación elemental compuesta por dos o más elementos disipados de forma atómica, pero en una misma fase. La solución sólida se clasifica, generalmente en sustitucionales e intersticiales.

1.3.2. Solución sólida sustitucional

La solución sólida sustitucional está conformada por dos elementos, un solvente y un disolvente; los átomos del primero sustituyen a los del segundo en las posiciones de la red cristalina de la matriz. La diferencia de diámetros atómicos influye en la distorsión de la estructura cristalina del elemento principal.

La solubilidad de un material sobre otro depende de los siguientes casos:

- La diferencia entre los diámetros atómicos debe ser inferior o igual a 15%.
- El soluto y el disolvente deben tener la misma estructura cristalina y valencia.
- La diferencia de electronegatividades no debe ser significativa, para impedir la formación de compuestos.

1.3.3. Solución sólida intersticial

Al igual que la solución sólida sustitucional, la solución intersticial está formada por un soluto y disolvente. Los átomos del soluto se ubican en los intersticios de los átomos del disolvente.

1.4. Difusión

La difusión es el flujo molecular desde una zona de mayor concentración hacia una de menor concentración, siendo esta diferencia el gradiente de concentración. Dicho flujo responde a un comportamiento al azar en línea recta (movimiento browniano) de las partículas gracias a la energía cinética y que culmina en la colisión entre partículas.

Los átomos en cualquier estado de la materia se encuentran en movimiento constante y su desplazamiento es periódico. La velocidad del movimiento atómico en los gases es relativamente lenta, mientras que en líquidos es aún más lenta debido a los enlaces atómicos, al ser estos mayores en líquidos.

1.4.1. Difusión atómica en sólidos

Generalmente, en los materiales sólidos el movimiento atómico está condicionado por su enlace en posición de equilibrio. Sin embargo, al aplicar calor se generan vibraciones sobre el material que permite el movimiento de ciertos átomos. Los metales y aleaciones en estado sólido poseen reacciones que implican movimientos atómicos.

1.4.1.1. Mecanismos de difusión

Existen dos principales mecanismos de difusión:

- 1) Mecanismo sustitucional o por vacantes
- 2) Mecanismo intersticial

- *Mecanismo de difusión sustitucional*

También denominado autodifusión o mecanismo por vacantes. Las vacantes son imperfecciones cristalinas en equilibrio de la red cristalina de metales y aleaciones, las cuales permiten el desplazamiento de los átomos del material al elevar su temperatura proporcionando la energía de activación necesaria, originada de vibraciones térmicas (Fig. 3-1), así como energía térmica, incluso se incrementa el número de vacantes, y finalmente se obtiene una mayor velocidad de difusión, al ser proporcional a la temperatura.

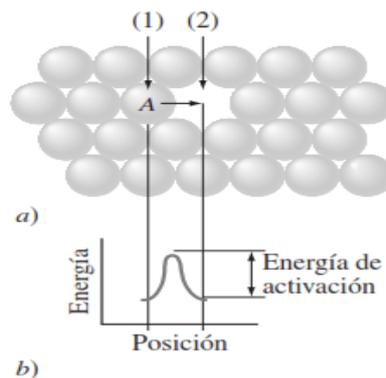


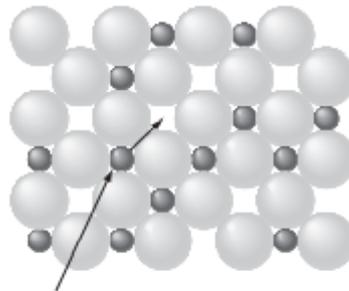
Figura 3-1: a) Vacante. b) intersticial o autointersticial, defectos puntuales en una red metálica compacta.

Fuente: Méndez, 2021.

Los enlaces atómicos iniciales deben romperse y ser reemplazados durante la autodifusión, esto tiene lugar gracias a la presencia de vacantes y la solubilidad de uno de los tipos de átomo. Entonces en los sólidos, las reglas de solubilidad rigen la autodifusión. Debido a los factores expuestos, la información del mecanismo por vacantes se obtiene experimentalmente.

- *Mecanismo intersticial*

La difusión intersticial sucede cuando los átomos nacientes de un material se desplazan de una vacante intersticial a un intersticio adyacente de otro material, es decir, no se desplaza permanentemente ningún átomo dentro de la red cristalina. Así, el tamaño del átomo difundido es relativamente pequeño que el átomo de la matriz.



Átomos intersticiales
difundiéndose en
vacantes intersticiales

Figura 4-1: Difusión intersticial.

Fuente: Méndez Curisaca, 2021

1.4.2. Difusión en estado estacionario

La difusión en estado estacionario sucede cuando se mantiene la concentración atómica entre dos planos, separados por una determinada distancia, durante cierto tiempo. Sin embargo, entre estos planos existe un gradiente de concentración, cuya dirección de flujo es de la concentración mayor a la menor.

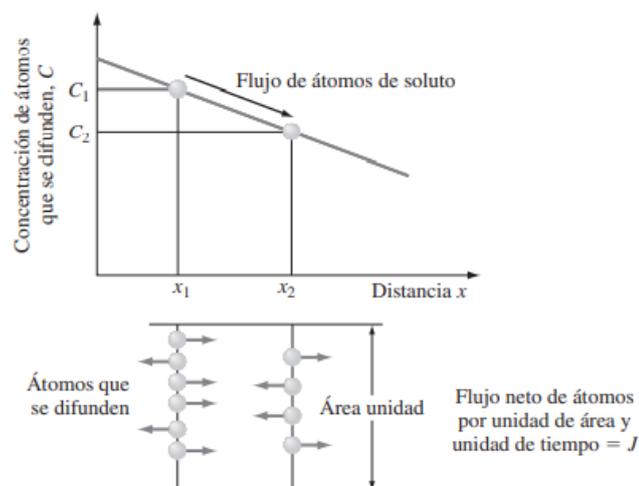


Figura 5-1: Difusión en estado estacionario.

Fuente: Méndez, 2021.

1.5. Primera ley de Fick

La primera ley de Fick establece que el flujo atómico es proporcional al producto del coeficiente de difusión y el gradiente de difusión. Como se expresa en la siguiente ecuación:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

J = flujo neto atómico $\left(\frac{\text{átomos}}{m^2 \cdot s}\right)$

D = coeficiente de difusión $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$\frac{dC}{dx}$ = gradiente de concentración $\left(\frac{\text{átomos}}{m^3} \times \frac{1}{m}\right)$

El signo negativo en la ecuación 1 indica que la difusión sucede de la concentración superior a la inferior.

1.6. Ley de Arrhenius

La ecuación de Arrhenius explica el comportamiento exponencial de la velocidad de reacción química en función de la temperatura.

$$\text{Velocidad de reacción} = C * e^{-Q/RT} \quad (2)$$

Donde,

C : constante de velocidad
 Q : energía de activación $\left(\frac{J}{mol}\right)$
 R : constante molar de los gases $\left(8,314 \frac{J}{mol \cdot ^\circ K}\right)$
 T : temperatura absoluta ($^\circ K$)

Los valores de C y Q ya han sido definidos experimentalmente. La energía de activación es aquella que se necesita para que un átomo se traslade dentro de la red cristalina que se activa térmicamente, es decir, es una energía adicional a la media atómica.

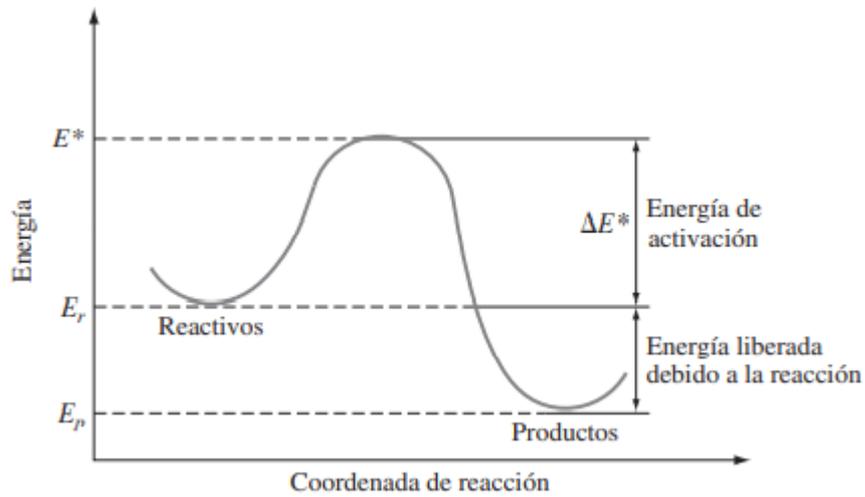


Figura 6-1: Energía de activación.

Fuente: Méndez, 2021.

Si expresamos la ecuación 2 en términos de logaritmo, se obtiene una función lineal de la forma $y = b + mx$, es decir:

$$\ln \text{ velocidad} = \ln C - \frac{Q}{RT} \quad (3)$$

Gráficamente, se representa como:

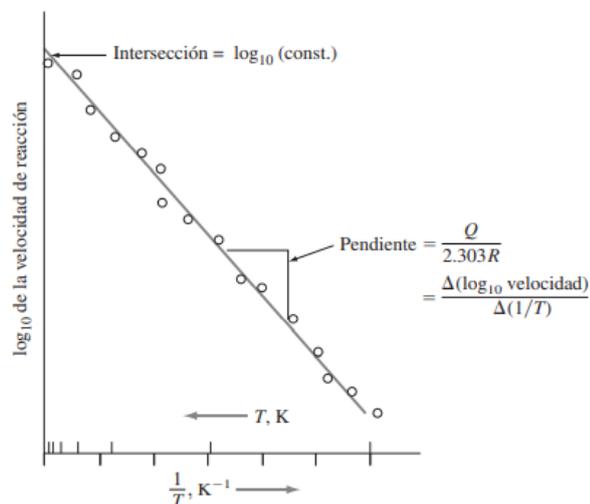


Figura 7-1: Representación típica de Arrhenius de datos de velocidad experimentales.

Fuente: Wulff et al, 1966.

1.6.1. Coeficiente de difusión

El coeficiente de difusión es la cantidad de soluto que atraviesa cierta superficie en un tiempo determinado.

La magnitud del coeficiente de difusión depende de los siguientes factores:

- Tipo de mecanismo de difusión.
- La temperatura a la que sucede la difusión.
- Tipo de estructura cristalina de la matriz.
- Tipo de imperfecciones cristalinas.
- Concentración de los materiales involucrados en la difusión

El coeficiente de difusión es directamente proporcional a la temperatura. Por otro lado, el factor de empaquetamiento de las estructuras cristalinas FCC y BCC influyen significativamente, siendo sus valores 0.74 y 0.68, respectivamente. Entonces, la estructura BCC presenta mayores facilidades en la difusión al poseer espacios interatómicos más amplios.

El cálculo del coeficiente de difusión es fundamental para un proceso de difusión y su valor puede ser determinado mediante una analogía de la ecuación Arrhenius o tablas que contienen valores resultantes de experimentos como en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Coeficiente de difusión

Coeficiente de difusión		Capacidad de difusión (m ² /s)	
Soluto	Disolvente (estructura de la matriz)	500°C (930°F)	1000°C (1830°F)
1. Carbono	Hierro FCC	(5×10^{-15})	3×10^{-11}
2. Carbono	Hierro BCC	10^{-12}	(2×10^{-9})
3. Hierro	Hierro FCC	(2×10^{-23})	2×10^{-16}
4. Hierro	Hierro BCC	10^{-20}	(3×10^{-14})
5. Níquel	Hierro FCC	10^{-23}	2×10^{-16}
6. Manganeso	Hierro FCC	(3×10^{-24})	10^{-16}
7. Zinc	Cobre	4×10^{-18}	5×10^{-13}
8. Cobre	Aluminio	4×10^{-14}	10^{-10}
9. Cobre	Cobre	10^{-18}	2×10^{-13}
10. Plata	Plata (cristalina)	10^{-17}	10^{-12}
10. Plata	Plata (límite de grano)	10^{-11}	
11. Carbono	Titanio HCP	3×10^{-16}	(2×10^{-11})

Fuente: Méndez, 2021.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Analógicamente, la ecuación 1 se puede expresar en términos del coeficiente de difusión. Entonces, se obtiene:

$$D = D_0 * e^{-Q/RT} \quad (4)$$

Donde,

D = coeficiente de difusión

D_0 = constante inicial de coeficiente de difusión

1.7. Difusión en estado no estacionario

En la difusión en estado no estacionario existe variación de la concentración del soluto respecto al tiempo en dos puntos diferentes del material.

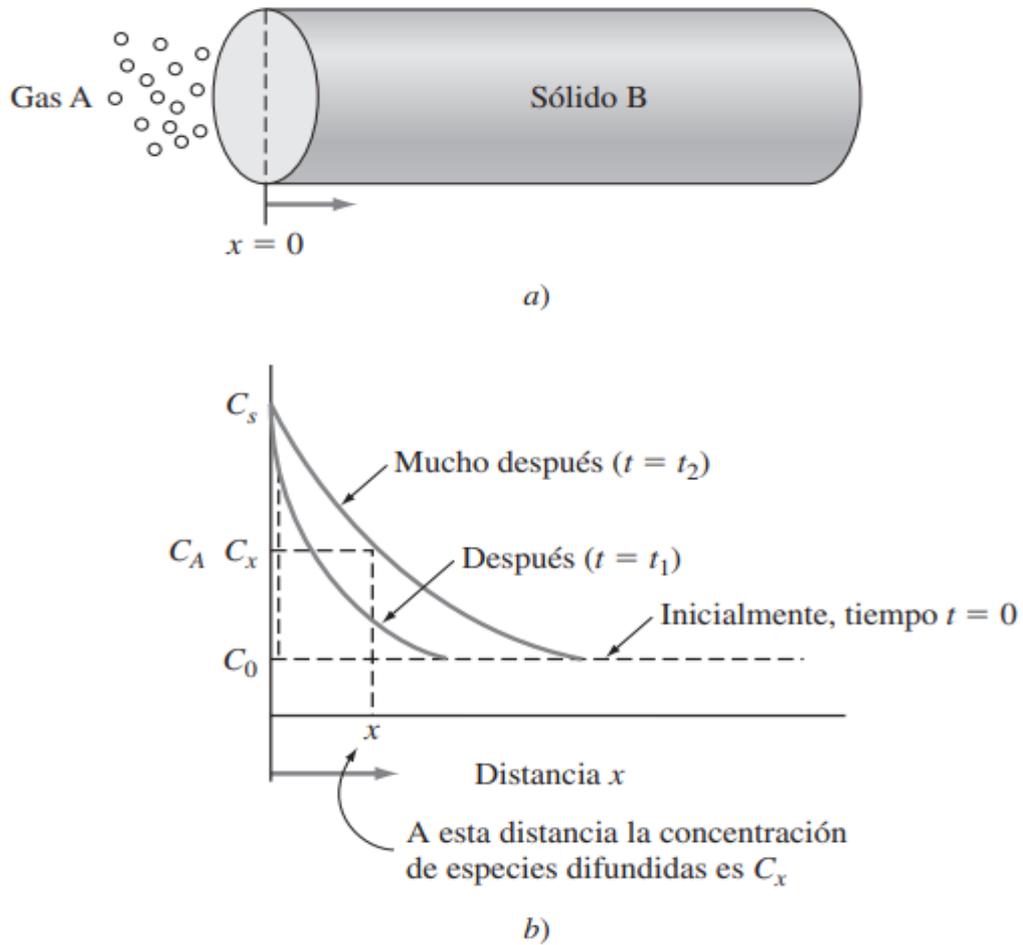


Figura 8-1: Difusión en estado no estacionario.

Fuente: Méndez, 2021.

1.8. Segunda ley de Fick

La segunda ley de Fick establece la igualdad entre la velocidad de cambio de composición y el producto de la velocidad de cambio del gradiente de concentración y el coeficiente de difusión, el cual es independiente del tiempo en este tipo de difusión. Así, la aplicación de la segunda ley de Fick está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dC_x}{dx} \right) \quad (5)$$

Considerando una relación directamente proporcional entre el tiempo de difusión y la concentración del soluto en dirección al núcleo del material, la solución a la ecuación 5 es:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt_c}}\right) \quad (6)$$

donde,

- C_s concentración superficial del elemento del gas que difunde en la superficie
- C_x concentración del elemento a la distancia x de la superficie en el tiempo t
- C_0 concentración inicial uniforme del elemento en el sólido
- x distancia desde la superficie
- D coeficiente de difusión del soluto que se difunde
- t_c tiempo
- erf función del error

En la siguiente tabla se aprecia de forma resumida los valores de la función del error:

Tabla 4-1: Tabla de función del error

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Fuente: Méndez Curisaca, 2021

1.9. Difusión atómica en líquidos

El proceso de difusión es efectivo para las tres fases (sólida, líquida o gaseosa) cuando las partículas no circulan por convección, es decir, únicamente de manera aleatoria. Sin embargo, la diferencia entre las fases radica en la magnitud del coeficiente de difusión. La difusión en los líquidos presenta una circulación libre en un medio con alta densidad, por lo que los impactos tienen periodicidad corta.

Durante este tipo de difusión, la composición química no es influenciada significativamente. La profundidad de la capa de difusión se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$x = K * \sqrt{t} \quad (7)$$

donde,

x profundidad de la capa difundida

K constante de penetración durante la primera hora de permanencia

t tiempo de calentamiento (h)

1.10. Tratamientos termoquímicos

Según manifiesta que los tratamientos térmicos son conjuntos de procedimientos de calor, permite enfriamiento de metal en etapa macizo del acero, con el resultado de cambiar su distribución y lograr ciertas propiedades mecánicas. (Bessemer, 1856)

Tratamientos termoquímicos { *Cementación o Carburización*
Nitruración
Cianuración
Carbonitruración
Sulfinización

1.10.1. Cementación o Carburización

La cementación es un proceso de saturación de la capa superficial del acero con carbono. Encontramos dos tipos fundamentales de cementación:

- ✓ Cementación o carburización sólida.
- ✓ Cementación o carburización líquida.

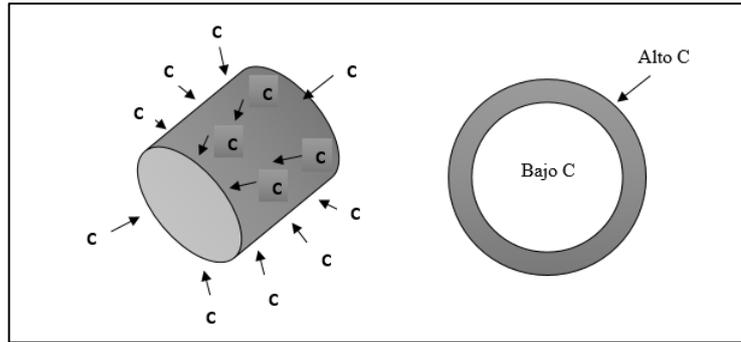


Figura 9-1: Proceso de carburización

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

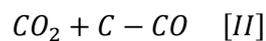
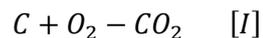
1.10.1.1. Carburización de empaquetamiento en cajas

Es el proceso de carburación más antiguo y en este método de carburización, las piezas se envasan en un recipiente herméticamente cerrado con una mezcla de coque y carbón vegetal con activadores, luego se calientan en un recipiente cerrado. Aunque se trata de un proceso intensivo en mano de obra, la carburación de empaquetamiento en cajas se sigue practicando en algunas salas de herramientas, porque los requisitos de las instalaciones son mínimos (Ortiz et al., 2020, p.18).

En proceso de carburización sólida o en paquete, piezas a carburar se cargan en una caja metálica resistente al calor con un carburador mezcla (Hasan et al., 2020, p.512). La mezcla sólida de carburización es de las siguientes proporciones:

Carbonato de bario	10-12 piezas
Carbonato de calcio	3-5 piezas
Carbonato de sodio	2-3 piezas

Siempre hay aire presente en la caja de carburación, incluso cuando está lleno de carburador. A la temperatura de carburación, el oxígeno del aire reacciona con el carbono del carburador para producir gas de dióxido de carbono. Este dióxido de carbono reacciona más con carbono en el carburador para producir monóxido de carbono (Hasan et al., 2020, p.514).

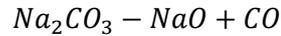
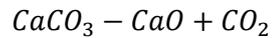
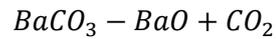


Este monóxido de carbono es el portador de carbono y cuando llega en contacto con el hierro austenítico, se forma carburo de hierro, que es disuelto en austenita.



Energizantes (como $BaCO_3$, $CaCO_3$ y $NaCO_3$)

La mezcla de carburación se descompone a la temperatura de carburación para producir óxidos y CO_2 de la siguiente manera:



- Ventajas
 - La carburización del paquete es económico y ventajoso para piezas pequeñas de máquinas.
 - No se requieren hornos especiales para calentar la carburización.
 - No requiere horno de atmósfera controlada.
- Desventajas
 - La caja que contiene la carga cuando se calienta se oxida.
 - La preparación de la mezcla juiciosa es un trabajo calificado y es pérdida de tiempo

1.10.1.2. Carburización líquida o baño de sales

La carburización líquida es un método basado en baños de sal fundida que contiene los productos químicos necesarios para producir una capa comparable con una resultante de la carburización en gas o de empaquetamiento en cajas. La carburización en baños de sal líquida es una técnica con baja distorsión, considerable flexibilidad y uniformidad de control de la capa cementada. Sin embargo, hay desventajas como, por ejemplo: el gasto y los problemas ambientales asociados con la eliminación de los baños de sal (Ortiz et al., 2020, p.28).

Los baños se dividen en baños de baja temperatura y baños de alta temperatura; los cuales no solo difieren con respecto a las temperaturas de carburización sino también en las composiciones de estos baños y los mecanismos de carburización. La Tabla 1-2 da las composiciones de estos baños (Hasan et al., 2020, p. 516).

- *Baños de baja temperatura*

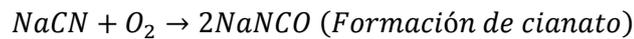
Estos normalmente se operan a 850–900 °C y son los más adecuados para producir cajas de poca profundidad (0.075–0.75 mm).

Se da la composición de los baños de carburación a baja temperatura. en la **Tabla 1-2**.

La química de la carburación en baños de baja temperatura es bastante compleja. Las principales reacciones involucradas son las siguientes:



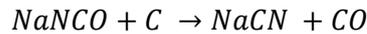
y también



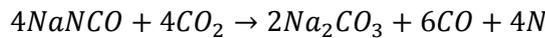
o



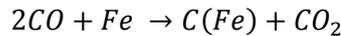
El cianato ($NaNCO$) así producido, reacciona además para dar:



y



CO y C producidos por reacciones anteriores reaccionan con Fe en la superficie de acero para enriquecerla con carbono como,



y

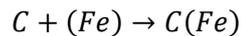


Tabla 5-1: Composiciones de baños de carburación líquidos (en % en peso)

Constitución	Baja temperatura Balneario	Alta temperatura Balneario
Cianuro de sodio	10-23	6-16
Cloruro de bario	-	30-55
Sales de alcalinas	0-10	0-10
Tierras		
Cloruro de potasio	0-25	0-20
Cloruro de sodio	20-40	0-20
Carbonato de sodio	40 max	30 max
Otros aceleradores	0-5	0-2
Cianuro de sodio	1.0 max	0.5 max
Densidad	1760 kg m ⁻³ (at 1173K)	2000 kg m ⁻³ (at 1198 K)

Fuente: Hasan et al., 2020.

- *Baños de alta temperatura*

Los baños de alta temperatura normalmente operan de 900–950 °C y son los más adecuados para producir capas de poca profundidad (0.5–3 mm) y el contenido de carbono de la caja se puede controlar mediante el cianuro del baño.

Tabla 6-1: Contenido de cianuro de sodio en un baño de carburación líquido a diferente temperatura de funcionamiento

Temperatura (°C)	Cianuro de Sodio (%)		
	Máximo	Recomendable	Mínimo
815	23	18	14
840	20	16	12
870	18	14	11
900	16	12	10
925	14	10	8
955	12	8	6

Fuente: Hasan et al., 2020.

- *Ventajas*
 - Las partes complicadas de una máquina se pueden carburar.
 - Se puede obtener una profundidad de capa uniforme.
 - Menor distorsión y agrietamiento durante el endurecimiento.
 - Alto rendimiento incluso en un horno relativamente pequeño debido a rápida tasa de transferencia de calor.
 - Se reducen los costos laborales, ya que la operación del proceso es simple.
 - Se elimina la descarburación de la superficie.
 - El tiempo de carburación se reduce en comparación con el empaque carburación.

- *Desventajas*
 - Materiales solución de cianuro y humos que salen de ambos son venenosos.
 - Se requiere gran cuidado al desechar las sales que contienen cianuro.

- Necesario de retirar la sal de la obra mediante medios especiales, como lavado con agua caliente, inmersión en ácido, etc.
- Existe peligro de explosión si se introduce humedad en la sal.
- Se requiere un almacenamiento separado para mantener las sales bajo llave y clave.
- Se requiere sistema de escape.
- Alto costo de la sal carburante

1.11. Precauciones de seguridad para el uso de cianuro de sodio

El cianuro de sodio es una sustancia muy venenosa por lo que requiere gran cuidado en su manipulación y almacenamiento mismas que son reguladas en la Hoja de Datos de Seguridad de Materiales.

1.12. Coque

Es el carbono de piedra, tiene un poder calorífico de 7 500 Kcal/h es difícil de encender y difícil de apagar. (Newell, 2010)

1.13. Dureza

Es la propiedad mecánica de un material en la cual opone resistencia a ser penetrada por un indentador. (Avner et al., 1979)

1.13.1. Dureza Brinell

Mide la resistencia a la penetración de una fuerza aplicada (Kp) sobre el cuerpo a medir por unidad de área dejada por el cuerpo penetrante. (Smith et al., 2006)

$$HB = \frac{2P}{D(D - \sqrt{D^2 - d^4})} \quad (8)$$

HB= Para materiales de máximo 700 HB (9)

1.13.2. Dureza Vickers

La dureza Vickers se define como la relación entre la carga de prueba y el área de la muesca, que se supone que es una pirámide recta con una base cuadrada y el mismo ángulo que el pico de la muesca. El tipo de probador de dureza Vickers es muy similar al tipo Brinell, aunque la prueba Vickers usa una punta cóncava en forma de diamante con un ángulo de 130 grados entre sus caras y la cara de una base cuadrada. El número de rigidez de Vickers HV se obtiene mediante la relación entre la fuerza aplicada y el área de la superficie del neumático de acuerdo con la siguiente ecuación:(Esparza, 1998)

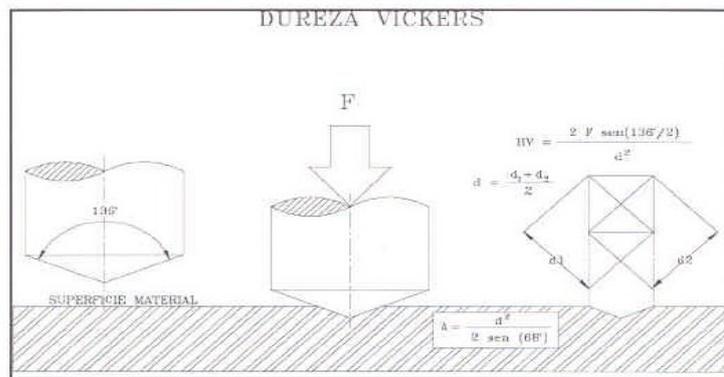


Figura 10-1: Principio de medición del número de dureza Rockwell (diamant).

Fuente: Esparza, A, 1999

$$HV = \frac{1,8544 * P}{D_m^2} \quad (10)$$

1.13.3. Factores que influyen en la dureza de un material industrialmente

1.13.3.1. Presencia de carbono

Si el material contiene más carbonato, cuanto más duro es, más frágil, menor es la resistencia mecánica, ni dúctil ni dúctil, no maleable, difícil de procesar, no duradero. (Newell, 2010)

En resumen, a medida que el porcentaje de carbono sube y baja, ocurre lo siguiente en el material:

Tabla 7-1: Relación entre el % C, dureza, fragilidad y resistencia mecánica

>%C	> Dureza	> Fragilidad	< Resistencia Mecánica
<%C	< Dureza	< Fragilidad	>Resistencia Mecánica

Fuente: Newell, 2010.

1.13.3.2. *Tamaño de grano*

Según la norma ASTM E-112 existen granos desde #00 hasta #14 siendo el #00 el grano más grande hasta #14 que es el grano más fino. En cuestión con la dureza el grano más duro, por ende, es más frágil y el grano más grande es menos duro. En la práctica diaria se utiliza hasta el grano #8.(Newell, 2010)

Tabla 8-1: Relación entre el % C, dureza, fragilidad y resistencia mecánica

> #Grano	> Dureza	> Fragilidad	< Resistencia Mecánica	< Tenacidad
< #Grano	< Dureza	< Fragilidad	>Resistencia Mecánica	>Tenacidad

Fuente: Newell, 2010.

1.13.3.3. *Presencia o no de elementos aleados*

Industrialmente se necesita que los materiales tengan menor grado de carbono y mayor presencia de elementos aleantes (cromo, níquel, molibdeno, wolframio, tungsteno y vanadio) entre ellos el cromo es más utilizado ya que provee de tres propiedades mecánicas importante al material.(Newell, 2010)

1.14. Metalografía

La metalografía es la disciplina científica de observar y determinar la estructura química y atómica y la distribución espacial de los constituyentes, inclusiones o fases en aleaciones metálicas. Por extensión, estos mismos principios pueden aplicarse a la caracterización de cualquier material.(Newell, 2010)

Para obtener una adecuada preparación metalográfica se debe seguir los siguientes pasos:

1.14.1. Ataque metalográfico

Después de realizar el pulido fino a la superficie de la probeta se trata químicamente a lo que se denomina ataque químico que es un proceso de corrosión donde el investigador lo puede controlar este químico provoca una reacción sobre la ferrita y perlita haciendo que se pueda diferenciar los bordes de grano presentes en la muestra.(Lulluna, 2014, p.119)

Para las aleaciones ferrosas se usan dos químicos comunes para el acabado final:

1.14.2. Pical

Composición: ácido pícrico 4 g y alcohol etílico 100 ml.

Efecto: Revela límites de grano de austenita en estructuras martensíticas, ferrita y perlita.

1.14.3. Nital 2%

Composición: ácido nítrico 2 ml y alcohol etílico 110 ml.

Efecto: Realza la interfase entre carburos y en la matriz de ferrita-perlita.

1.15. Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico hace que un material modifique o cambie sus propiedades mediante calentamiento y enfriamiento controlados

Clasificación de los tratamientos térmicos

- ✓ Temple
- ✓ Recocidos
- ✓ Revenidos
- ✓ Normalizados

1.15.1. Temple

El temple es un proceso de calentamiento y enfriamiento, realizado este último con una velocidad mínima, determinada, generalmente muy rápida, que se denomina crítica. En el calentamiento se consigue austenita y en el enfriamiento la austenita se transforma en martensita.

1.15.1.1. Fases del Temple

- *Calentamiento*

En esta fase la masa del acero debe transformarse en austenita y su desarrollo depende de las siguientes variables: velocidad de elevación de temperatura, permanencia en la temperatura límite y temperatura límite.

La temperatura que se debe alcanzar se establece en: catálogos, diagrama Hierro-Carbono, tablas o datos del docente, sin embargo, las experiencias demuestran que la temperatura para conseguir el máximo de endurecimiento es afectada, de manera regular por el porcentaje de carbono que contiene el acero, no se debe sobrepasar la temperatura indicada debido a que se aumenta innecesariamente el tamaño de grano lo que ocasiona fragilidad en el material.

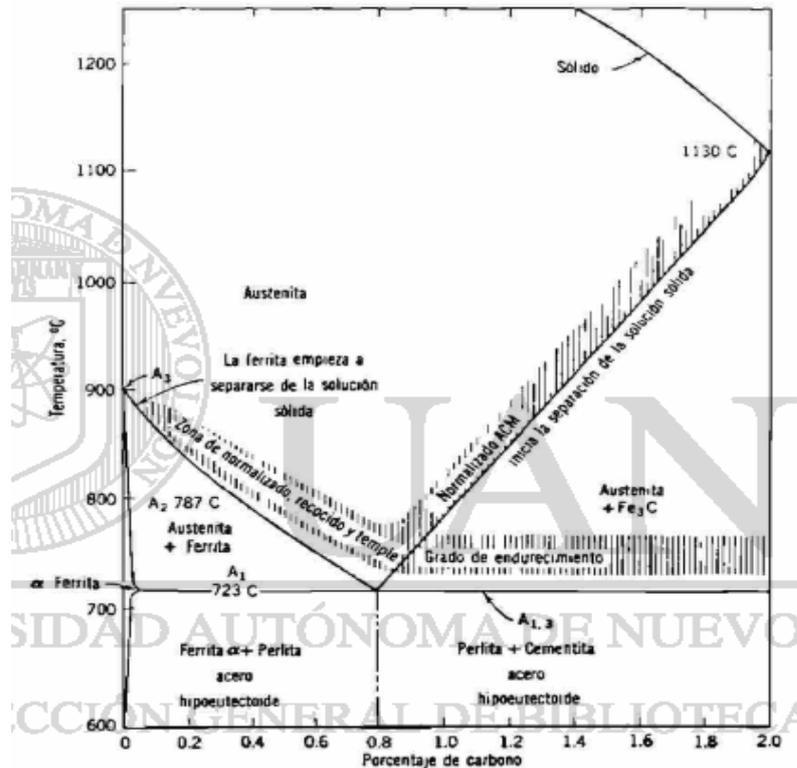


Figura 11-1: Intervalo de temperatura para el temple o endurecimiento de los aceros

Fuente: Pérez, J, 1996. p 50

- *Enfriamiento*

El enfriamiento tiene como objetivo transformar la austenita en martensita, el factor que caracteriza a la fase de enfriamiento mínimo es la velocidad de enfriamiento mínimo que se denomina velocidad crítica.

- *Medios de enfriamiento más empleado en el temple de aceros*

- ✓ *Agua*

Cuando el agua es usada como medio de enfriamiento debe controlarse la temperatura la cual debe oscilar entre 15° y 20° C, debido a que si es mayor a este rango se prolonga exageradamente la primera etapa del enfriamiento se tiene un problema porque con ello disminuye

la velocidad de enfriamiento en la zona 750°-600° y se favorece en los aceros de poco poder templante la formación de estructuras blandas.

✓ Aceite

Los aceites que se suelen emplear son aceites animales, vegetales y minerales. En la antigüedad los aceites que se usaban eran solo los dos primeros. Pero los aceites mejores para el temple son los aceites minerales.

- *Propiedades de un buen aceite para un temple*

✓ Viscosidad

La viscosidad debe estar comprendida entre los siguientes límites: a temperatura ambiente deben estar de 5° a 9° Engler y a una temperatura de 50° deben estar de 2° a 4° grados Engler.

Si el aceite es muy viscoso la superficie del metal tiende a carbonizarse, debido a que las corrientes de convección son demasiado lentas y si el aceite tiene una viscosidad baja se volatiliza rápidamente.

- *Viscosímetro Engler*

La viscosidad Engler se obtiene del cociente entre el tiempo que tarda en derramarse 200 cm³ del líquido cuya viscosidad se desea conocer, y el tiempo en que tarda en derramarse 200 cm³ de agua, todo, por lo general, a 20 °C de temperatura. En los casos de líquidos muy viscosos utilizar temperaturas de 50 °C y hasta 100 °C.

- *Velocidad Crítica de Temple*

Es la velocidad de enfriamiento mínima para que la totalidad del acero se transforme en martensita y la velocidad varia para aceros al carbono de 200 °C a 600 °C por segundo, esto depende del porcentaje de carbono.

1.15.2. Recocido

El recocido consiste en calentamientos a temperaturas adecuadas, seguidos de enfriamientos lentos con lo que se consigue ablandar los aceros y las fundiciones esto con el objetivo de que el material pueda ser maquinado de manera sencilla, para regenerar la estructura y eliminar las tensiones internas de la pieza.

1.15.2.1. Tipos de Recocido

Los recocidos más utilizados son: recocido de regeneración, recocido globular y recocido subcrítico.

1.15.3. Revenido

El revenido o regulación del temple sirve para: reducir grado de dureza, reducir la fragilidad del acero y consiste en el recalentamiento del acero endurecido hasta una temperatura que está por debajo de la región crítica, seguido de un enfriamiento lento.

1.15.3.1. Fases del Revenido

- Calentamiento

Generalmente el revenido se realiza en hornos de baño o de circulación forzada a temperaturas comprendidas entre 150 °C y 650 °C. Estas temperaturas varían de acuerdo con: las características finales deseadas y al tipo de material, mientras más alta sea la temperatura de calentamiento más bajas serán las durezas obtenidas.

- Permanencia y enfriamiento

La permanencia a la temperatura de revenido debe ser lo más prolongada posible y el tiempo suele calcularse de 30 minutos a 2 horas por cada 10 mm de espesor o diámetro de las piezas, luego del tiempo de permanencia se deja enfriar a temperatura ambiente.

1.15.4. Normalizado

El normalizado es un tratamiento que consiste en calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento a temperatura ambiente de esta manera se logra un acero con estructura y propiedades que convencionalmente se consideran como normales y característicos de su composición y es usado en:

- ✓ Piezas sometidas a trabajos en caliente
- ✓ Trabajos en frío
- ✓ Enfriamientos irregulares
- ✓ Sobrecalentamientos

Aplicaciones

Se normalizan generalmente:

- ✓ Aceros con contenido de carbono hasta 0,5% que han sufrido trabajos en frío calientes tales como: laminación o forja.
- ✓ Aceros que han sido sobrecalentados en un tratamiento anterior
- ✓ Piezas de fundición para obtener mejores cualidades mecánicas del material.
- ✓ Aceros que no requieran adquirir dureza al enfriarse al aire tranquilo.

1.15.4.1. Fases del Normalizado

- Calentamiento

El o los materiales que van a ser normalizados se deben calentar a una temperatura de 20 a 40°C por encima de la temperatura superior.

- Permanencia

La permanencia consiste en mantener al material a la temperatura escogida para el tratamiento, el tiempo en este tratamiento es relativamente corto el cual es dado por el fabricante del material, pero caso contrario se calienta alrededor de 20 min por cada 20 mm de espesor o diámetro del material.

- *Enfriamiento*

El enfriamiento del material en el normalizado se realiza en el aire tranquilo debido a que su objetivo es obtener una estructura fina y uniforme en el material tratado.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo de estudio

El tema “Efecto de la carburización sólida y líquida en la dureza del acero AISI 1018” también es de modalidad experimental debido a que presenta la manipulación de una variable que es la dureza en condiciones rigurosamente controladas cuyo fin es describir de qué forma, por qué se produce y que factores influyen en el endurecimiento superficial del material utilizado.

2.2. Modalidad de investigación

2.2.1. *Descriptiva*

El tema “Efecto de la carburización sólida y líquida en la dureza del acero AISI 1018” es de modalidad descriptiva una vez identificado el problema se describe los procesos que se sigue para el análisis metalográfico, carburización sólida, carburización líquida, toma de resultados utilizando herramientas como la observación, estudios correlacionados y el desarrollo en sí.

2.2.2. *Documental*

Además, de ser descriptiva el tema “Efecto de la carburización sólida y líquida es de modalidad documental debido a que se han obtenido, seleccionado, compilado, organizado, interpretado y analizado información sobre el tema de estudio a partir de fuentes documentales tales como: libros, revistas, artículos científicos, hojas técnicas, hoja de seguridad (MSDS) registros, etc.

2.2.3. *Experimental*

Es experimental por que se llevó a cabo dos tipos de carburización sólida y líquida para aumentar la dureza (variable dependiente) del acero AISI 1018 en función del tiempo y temperatura de carburización (variables independientes). Además, este tipo de experimentación se complementa con análisis metalográfico y ensayos de dureza.

2.3. Metodología

2.3.1. Métodos de experimentación

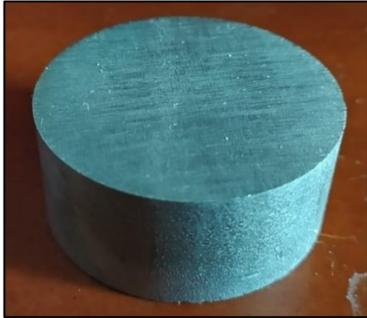
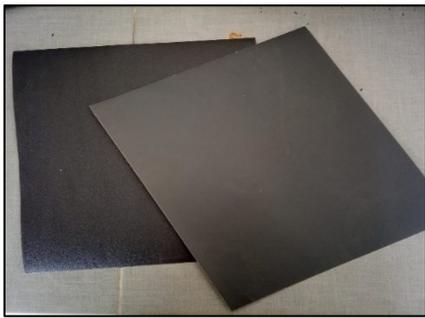
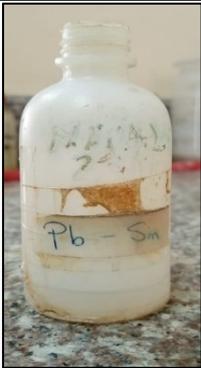
En la presente sección se detalla el proceso de mecanizado, obtención de probetas según la norma ASTM E384-84 para la medición de dureza superficial. Además, se especifica equipos, insumos e instrumentos para realizar los tratamientos y posterior análisis de datos obtenidos.

2.4. Materiales

2.4.1. Materiales para análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico se usaron los materiales y equipos de laboratorio detallados en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Materiales y equipos para el análisis metalográfico.

	
Muestra de acero AISI 1018 1-1/2''x20mm.	Papel abrasivo de carburo de silicio.
	
Grifo de agua del laboratorio de metalurgia de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.	Alcohol antiséptico.
	
Alúmina AlO_3	Nital 2%



Pulidora del laboratorio de metalurgia de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.



Máquina desbastadora



Micro durómetro modelo Micromet II marca Buehler.



Microscopio óptico vertical.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.4.2. *Materiales para la carburización sólida*

Tabla 2-2: Materiales y equipos para la carburización sólida.

	
<p>Neplo galvanizado 2''x15cm</p>	<p>Tapón hembra galvanizado 2''</p>
	
<p>Coque</p>	<p>Carbonato de calcio</p>
	
<p>Horno de tratamientos termoquímicos</p>	<p>Balanza</p>

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.4.3. Carburización líquida

Tabla 3-2: Materiales y equipos para la carburización líquida.

	
Cianuro de sodio	Recipiente de acero inoxidable 304
	
Cloruro de bario	Cloruro de sodio
	
Carbonato de sodio	

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.5. Herramienta para tabulación y análisis de datos

- Excel

2.6. Mecanizado de las probetas del Acero AISI 1018

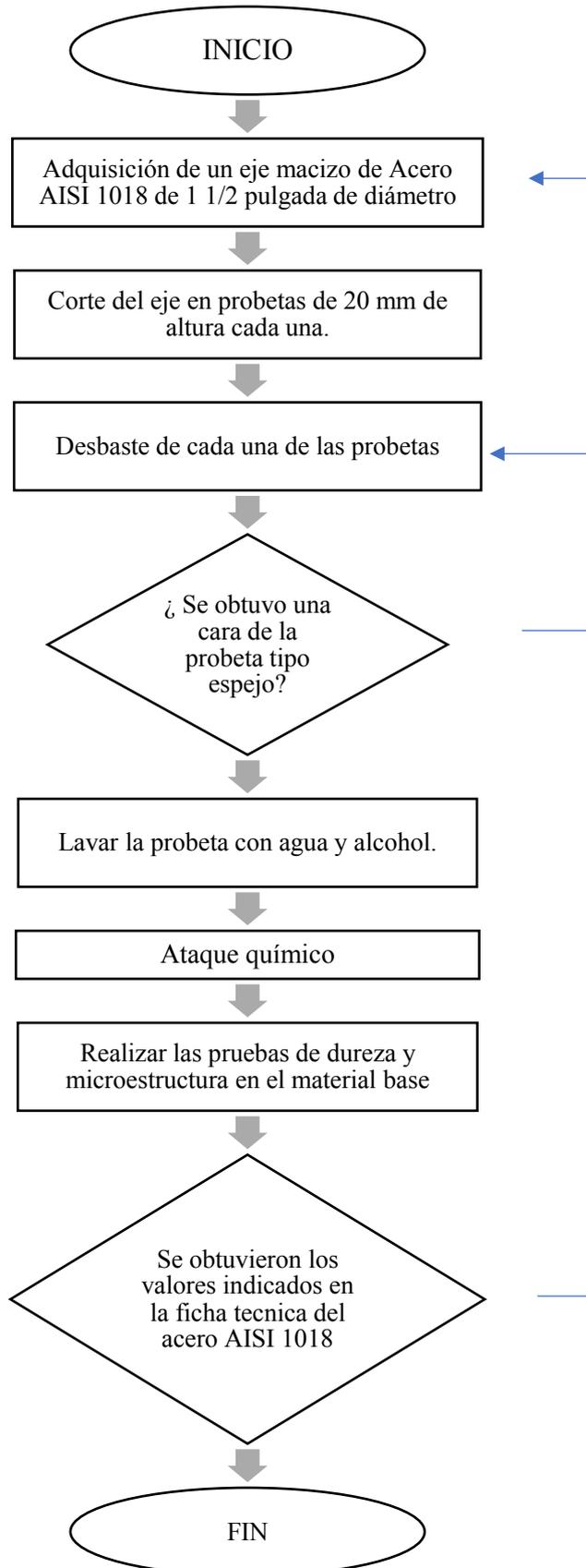


Figura 1-2: Diagrama de Flujo de la carburización sólida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.6.1. Adquisición de un eje macizo de Acero AISI 1018 de 1-1/2'' pulgada de diámetro

La investigación se realizó con muestras de acero con bajo contenido de carbono. (AISI 1018), por lo cual es necesario adquirir un eje de 1 ½ pulgada de diámetro.



Figura 2-2: Eje de Acero AISI 1018.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.6.2. Corte del eje en probetas de 20 mm de altura cada una

El proceso de corte se llevó a cabo en la tronzadora vertical con una lubricación de agua obteniendo probetas de 20 mm de altura basándose en que el diámetro y la altura permiten una manipulación adecuada del investigador durante el desbaste y pulido de acuerdo con la norma ASTM E3-95. Se consideró una velocidad de corte normal (ni lenta ni rápida) para evitar deformaciones mecánicas significativas y quemaduras que alteran metalográficamente la estructura del material, esto facilita el proceso de desbaste al reducir los defectos propios del corte.



Figura 3-2: Corte manual del eje AISI 1018.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.6.3. Desbaste grueso, medio y fino de cada una de las probetas

Luego de obtener cada una de las probetas se realizó tres tipos de desbaste se comenzó con el desbaste grueso usando papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) #80 para eliminar las rayaduras más profundas y rebabas de corte. Seguido por el desbaste medio usando lo papeles abrasivo de SiC #100, #180 y #240 y finalmente el desbaste fino usando papel abrasivo de SiC #360, #400, #500, #600, #800, #1000, #1200, #1500 y #2000 para obtener una superficie espejo. Para realizar un buen desbaste se presiona la probeta contra la carta abrasiva al carburo deslizando desde arriba hacia abajo y con las repeticiones necesarias hasta la eliminación de desperfectos en la superficie de la muestra, posteriormente se gira la muestra 90° y se cambia la carta abrasiva por el número superior.



Figura 4-2: Desbaste de las probetas.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Cabe recalcar que la probeta deberá poseer una cara mecanizada (tipo espejo) y la otra con un desbaste grueso, esto con el fin de mantener una relación de paralelismo entre ambas; puesto que es un requerimiento para obtener datos fiables en el ensayo de dureza.



Figura 5-2: Muestra de una probeta tipo espejo.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.6.4. Pulido de cada muestra

Cuando se observa que la probeta está casi espejo, es decir, sin presentar rayas pronunciadas, se continúa con el pulido en una máquina pulidora de paño y se añadió micropartículas de alúmina Al_2O_3 hasta obtener la superficie de la probeta totalmente espejo. Cuyo proceso se observa en la Figura 22-2.



Figura 6-2: Proceso de pulido.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.6.5. Lavado de muestra con agua y alcohol y secado

En este estudio se usó agua y alcohol para realizar la preparación de la superficie, se sabe que previo a un tratamiento es necesario una buena preparación de la superficie, es decir, eliminar toda presencia física (grasas, aceites, arena, escoria) o química (óxidos de aleaciones ferrosas, óxidos de aluminio, óxido verde de aleaciones cuprosas) de la superficie a ser tratada.



Figura 7-2: Proceso de lavado de la probeta AISI 1018.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Finalmente, se somete a la muestra a la secadora el tiempo necesario para eliminar el agua y alcohol presentes en la superficie de esta, como se evidencia en la Figura 26-2.



Figura 8-2: Proceso de secado de la muestra AISI 1018.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.6.6. Ataque químico

Con una pipeta se colocó nital al 2% sobre la superficie de la muestra metalográfica preparada para revelar las fases de la micro estructura de la muestra metalográfica preparada.

2.6.7. Pruebas de dureza y microestructura en el material base

Para el ensayo de micro dureza, la muestra metalográfica debe estar preparada correctamente y sus caras deben ser paralelas. El ensayo inició girando la torreta de indentador

objetivo al indentador de diamante para el montaje de la muestra sobre el torno de trabajo del mismo, asegurando la perpendicularidad entre la superficie de la muestra y el indentador de diamante y se encendió el micro durómetro Micromet II marca Buehler.

Se rotó la torreta de indentador objetivo al de escaneo 40X hasta conseguir la parada por clic. Se enfocó la muestra mediante las asas de elevación de la platina. Se seleccionó el área de la muestra a medir. Posteriormente, se estableció una carga de 200 gramos durante un tiempo de 10 segundos.



Figura 9-2: Montaje de la muestra AISI 1018 en el micro durómetro Micromet II.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

El ensayo de micro dureza se basa en la presión generada por un indentador con una carga (200 gramos) sobre la muestra durante el tiempo de permanencia (10 segundos), lo cual resulta en una huella cuyas dimensiones (diagonal 1 y diagonal 2) permiten el cálculo de la dureza del acero AISI 1018.

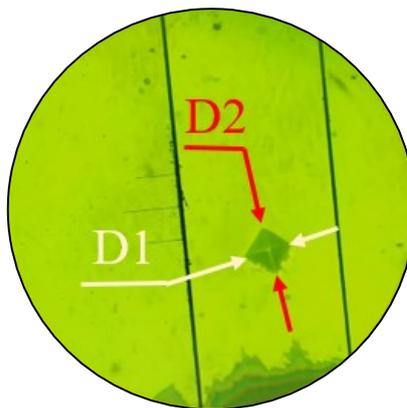


Figura 10-2: Diagonales de la huella del indentador de diamante.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Para ello se midieron la diagonal 1 y la diagonal 2 de la huella por medio del micrómetro filar, seguido de su transformación a milímetros y se reemplazó en la ecuación (10) y se obtuvo el valor de la dureza Vickers. Para la medición de la diagonal 2 se giró el ocular 90°.

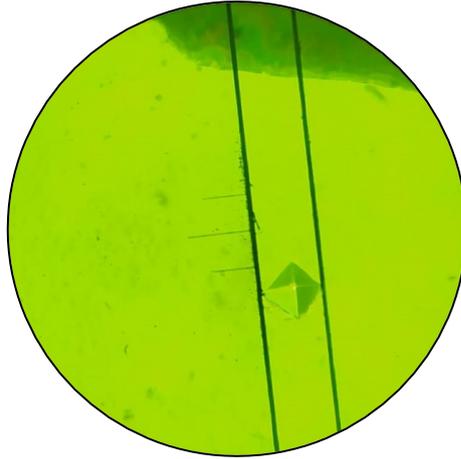


Figura 11-2: Medición de la diagonal 1 a través de las líneas filiales.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

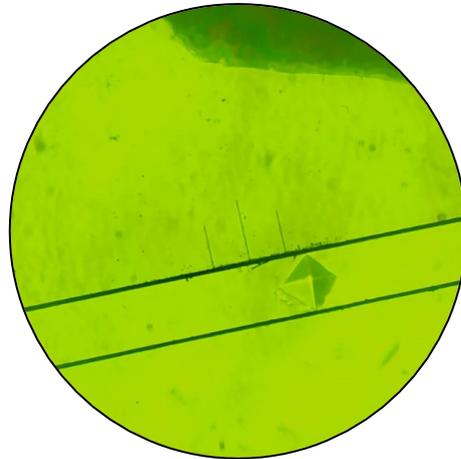


Figura 12-2: Medición de la diagonal 2 a través de las líneas filiales.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

El análisis de microestructura continúa inmediatamente tras el ataque químico.

Se encendió el microscopio vertical y se preparó la platina y el montaje respectivo de la muestra metalográfica preparada.

Se enfoca la zona atacada químicamente mediante el asa de elevación.

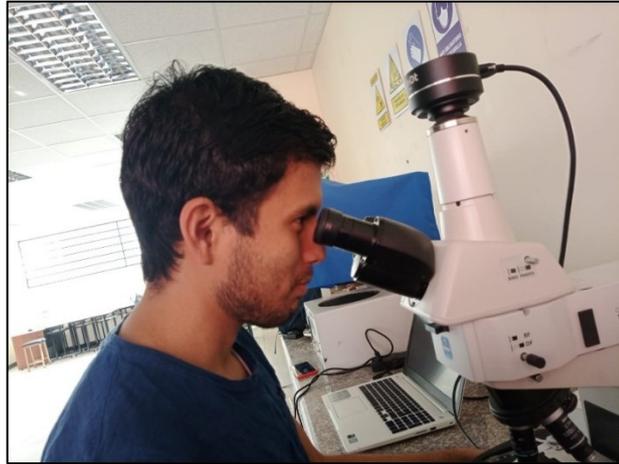


Figura 13-2: Análisis de micro estructuras.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.7. Carburización sólida

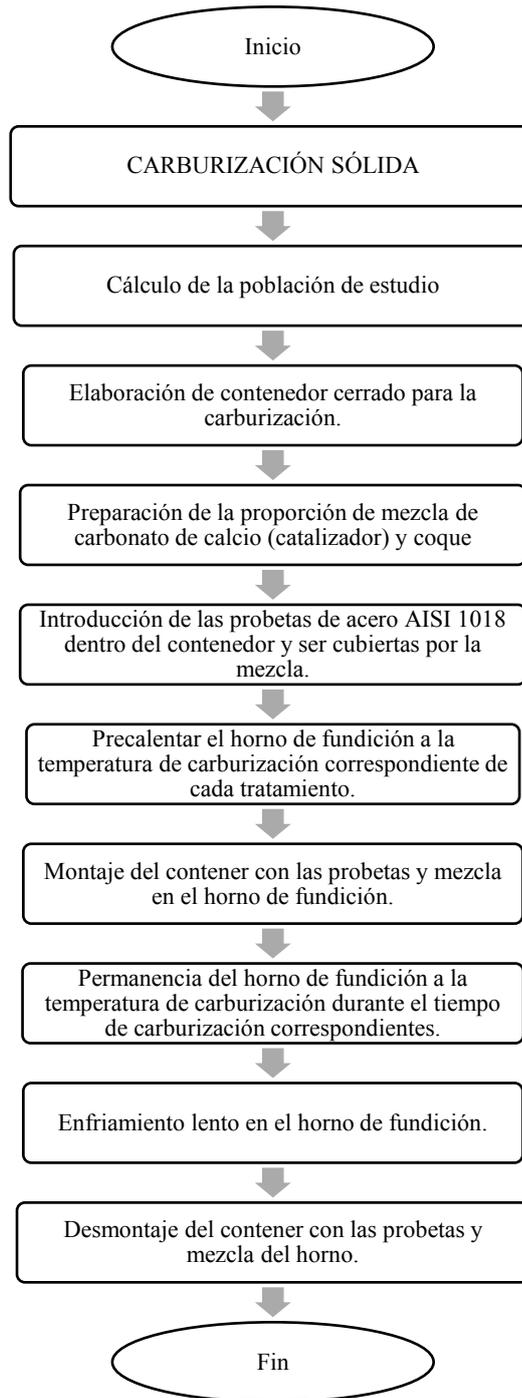


Figura 14-2: Diagrama de flujo de la carburización sólida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.7.1. Cálculo de la población de estudio

El número total de probetas fue determinado en base al modelo matemático planteado con los siguientes parámetros:

- ✓ Temperatura,

Tabla 4-2: Temperatura T (°C)

Temperatura T (°C)	
T ₁	910
T ₂	930
T ₃	950

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

- ✓ concentración de cementación y

Tabla 5-2: Concentración obtenida tras la carburización C_x (%)

Concentración obtenida tras la carburización C _x (%)
0,4
0,5
0,6

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

- ✓ distancia desde la superficie.

Tabla 6-2: Concentración obtenida tras la carburización C_x (%)

Distancia de cementación desde la superficie x (mm)
1,00
1,25

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Las dos primeras con tres niveles y la última con dos.

Se estableció una repetición por tratamiento,

$$N = N_{temperaturas} * N_{concentraciones\ de\ cementación} * N_{distancias\ desde\ la\ superficie} * n \quad (11)$$

donde,

N Número total de probetas

$N_{temperaturas}$ Niveles de temperatura

$N_{concentraciones\ de\ cementación}$	Niveles de concentraciones de cementación
$N_{distancias\ desde\ la\ superficie}$	Niveles de distancia desde la superficie
n	Número de repeticiones

Obteniendo,

$$N = N_{temperaturas} * N_{concentraciones\ de\ cementación} * N_{distancias\ desde\ la\ superficie} * n$$

$$N = 3 * 3 * 2 * 1$$

$$N = 18\ probetas$$

Entonces, se trabaja con 18 probetas para la carburización sólida.

2.7.2. *Adquisición y ensambladura de contenedor cerrado para la carburización*

El contenedor cerrado consistió en un neplo galvanizado sellado en sus extremos por tapones hembra galvanizados respectivos.

Las dimensiones del neplo están basadas en parámetros de espesor del carburador (mezcla), diámetro y alto de la probeta cuyas especificaciones están en la siguiente tabla:

Tabla 7-2: Parámetros para selección del neplo galvanizado

Parámetros para selección del neplo galvanizado	
Diámetro de la probeta	1 ½
Alto de la probeta	20mm
Espesor del carburador de la base	40mm
Espesor del carburador con la que se cubre a la probeta	40m

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

El neplo galvanizado con sus respectivos tapones es de 2 pulgadas de diámetro con una longitud de 10 cm el cual satisface las necesidades especificadas en la tabla 4-2.

2.7.3. *Preparación de la mezcla de carbonato de calcio (catalizador) y coque*

Al usar únicamente el coque como compuesto carburante se logra una capa carburada menor a 0,65% de contenido de carbono, mientras que, al mezclar coque y un carbonato alcalino se alcanza el 1,20% de solubilidad en la superficie. Por lo que para la mezcla se ocupa coque más carbonato de calcio cuyo activador se escoge según el número de piezas a carburar. La proporción

de mezcla debe contener 20% del activador (carbonato de calcio) y 80% de coque (Bernal, 1994, p.2005).

$$C_s = 1,20\% \quad (12)$$



Figura 15-2. Porcentaje de mezcla del coque.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Figura 16-2. Porcentaje de mezcla del carbonato de calcio.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.7.4. Introducción de las probetas de acero AISI 1018 dentro del contenedor

El contenedor fue el neple galvanizado de 10 cm de alto en el cual se introdujo 4 cm de mezcla desde la base del neple, a continuación, se introdujo la probeta posteriormente se cubre la probeta con una capa de 4cm de mezcla. Ver Figura 28-2.



Figura 17-2. Montaje de la probeta AISI 1018 en el contenedor.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.7.5. Precalear el horno de fundición a la temperatura de carburización correspondiente en cada tratamiento

Se encendió el horno ubicando el goniómetro en la temperatura requerida, las cuales se determinaron mediante el diagrama hierro-carbono.

Las temperaturas determinadas son:

- 910 ° C
- 930 ° C
- 950 ° C

Conversión de temperatura en grados Celsius a Kelvin

$$T_{\circ K} = T_{\circ C} + 273^{\circ} \quad (13)$$

donde,

$T_{\circ K}$: Temperatura en grados Kelvin,

$T_{\circ C}$: Temperatura en grados Celsius.

Tabla 8-2: Temperatura de carburización

TEMPERATURA DE CARBURIZACIÓN	
GRADOS CELSIUS (°C)	GRADOS KELVIN (°K)
910	1183
930	1203
950	1223

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.7.6. Montaje del contener con las probetas y mezcla en el horno de tratamientos de termoquímicos

Con ayuda de una pinza metálica y equipo de protección personal se ingresó el neple en el horno.

2.7.7. Permanencia del horno de tratamientos termoquímicos a la temperatura requerida durante los tiempos de carburización correspondientes

Para la permanencia en el horno se calculó los tiempos mediante la Ley de Fick lo que se observa a continuación.

Cálculo de tiempo de carburización (t_C)

Para el cálculo de la permanencia en el horno se determina el tiempo se basa en la Ley de Fick y el proceso se muestra a continuación:

Segunda ley de Fick

La segunda ley de Fick se define como:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt_C}}\right) \quad (14)$$

donde,

C_s concentración superficial del elemento del gas que difunde en la superficie

C_x concentración del elemento a la distancia x de la superficie en el tiempo t

C_0 concentración inicial uniforme del elemento en el sólido

x distancia desde la superficie

D coeficiente de difusión del soluto que se difunde

t_C tiempo

erf función del error

Determinación de capacidad de difusión (D)

Para calcular la capacidad de difusión (D) se considera la ecuación de Arrhenius:

$$D = D_0 * e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (15)$$

donde,

- D_0 : Constante de proporcionalidad (m^2/s),
 Q : Energía de activación (J/mol),
 R : Constante universal de los gases (J/mol. $^{\circ}K$),
 T : Temperatura ($^{\circ}K$).

Considerando que:

$$R = 1,987 \frac{cal}{mol. ^{\circ}K} = 8,314 \frac{J}{mol. ^{\circ}K}$$

Y el coeficiente de difusión es escogido de la siguiente tabla:

Tabla 9-2: Concentración obtenida tras la carburización C_x (%)

Par de difusión	Q (J/mol)	D_0 (coeficiente de difusión) (m^2/s)
Carbono en hierro FCC	137653,3	$2,3 \times 10^{-5}$
Carbono en hierro BCC	87445,6	$1,1 \times 10^{-6}$
Nitrógeno en hierro FCC	144766,4	$3,4 \times 10^{-7}$
Nitrógeno en hierro BCC	76567,2	$4,7 \times 10^{-7}$
Hidrógeno en hierro FCC	43095,2	$6,3 \times 10^{-7}$
Hidrógeno en hierro BCC	15062,4	$1,2 \times 10^{-7}$

Fuente: Méndez Curisaca, 2021

Cálculo de la capacidad de difusión con la Ecuación 15, temperaturas de la Tabla 5-2 y con el coeficiente de difusión del carbono en hierro FCC.

Tabla 10-2: Temperatura de Carburización

TEMPERATURA DE CARBURIZACIÓN		
Temperatura de carburización ($^{\circ}K$)	Capacidad de difusión	(D)
		$D = D_0 * e^{\frac{-Q}{RT}}$
1183		$1,92087 \times 10^{-11}$
1203		$2,42409 \times 10^{-11}$
1223		$3,03596 \times 10^{-11}$

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Parámetros iniciales para el cálculo del tiempo en relación con la temperatura:

Tabla 11-2: Parámetros iniciales para el cálculo del tiempo

Parámetros iniciales		
Solubilidad en la superficie del Acero AISI 1018	C_s (%)	1,2
Concentración de carbono inicial	C_0 (%)	0,18 0,40
Concentración de carbono al que se requiere llegar	C_x (%)	0,50 0,60
Profundidad de penetración del carbono	x (mm)	1,00 1,25

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Para hallar z trabajamos con la fórmula de la segunda ley de Fick:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt_c}}\right) \quad (16)$$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}(z) \quad (17)$$

La función error se resume en la Tabla 4-1 la cual se especificó en el marco teórico, pero a fin de cálculos se vuelve a detallar a continuación, para una mejor comprensión.

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

De tal forma que el cálculo de z en términos intermedios de la tabla, se aplica interpolación.

Tabla 12-2: Interpolación

Límite superior	x_0	y_0
Valor	x	y
Límite inferior	x_1	y_1

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (18)$$

Tiempos de carburización para la temperatura de 1183°K

Tabla 13-2: Tiempos de carburización para la temperatura de 1183°K

$C_{\text{superficie}}$	C_{inicial}	$C_{\text{cementación}}$	Profundidad	Difusividad	$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0}$	z	Tiempo	
C_s (%)	C_0 (%)	C_x (%)	x (mm)	D (m ² /s)			t (s)	t (h)
		0,40	1,00	1,92087E-11	0,7843	0,9018	16005,05	4,45
			1,25				25007,89	6,95
1,2	0,18	0,50	1,00	1,92087E-11	0,6863	0,7127	25623,89	7,12
			1,25				40037,33	11,12
		0,60	1,00	1,92087E-11	0,5882	0,5807	38594,52	10,72
			1,25				60303,94	16,75

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Cálculo de z

Interpolación de $Z_{T=1183^{\circ}K}$

Tabla 14-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,40$

z	erf z	Z	erf z	z	erf z	Z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tabla 15-2: Valor de $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,40$

Para erf(z)=0,7843

x_0	0,7707	y_0	0,8500
x	0,7843	y	0,8735
x_1	0,7970	y_1	0,9000

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tabla 16-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,50$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tabla 17-2: Valor de $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,50$

Para erf(z)=0,6863

x_0	0,6778	y_0	0,7000
X	0,6863	y	0,7097
x_1	0,7112	y_1	0,7500

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tabla 18-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1183^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,60$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763

0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tabla 19-2: Valor de $Z_{T=1183^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$

Para $\text{erf}(z)=0,5882$

x_0	0,5633	y_0	0,5500
X	0,5882	y	0,5794
x_1	0,6039	y_1	0,6000

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tiempos de carburización para la temperatura de 1203°K

Tabla 20-2: Tiempos de carburización para la temperatura de 1203°K

$C_{\text{superficie}}$	C_{inicial}	$C_{\text{cementación}}$	Profundidad	Difusividad	$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0}$	z	Tiempo	
C_s (%)	C_0 (%)	C_x (%)	x (mm)	D (m ² /s)			t (s)	t (h)
		0,40	1,00	2,42409E-11	0,7843	0,8759	13443,12	3,73
			1,25				21004,87	5,83
1,2	0,18	0,50	1,00	2,42409E-11	0,6863	0,7127	20304,58	5,64
			1,25				31725,90	8,81
		0,60	1,00	2,42409E-11	0,5882	0,5807	30582,61	8,50
			1,25				47785,32	13,27

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Cálculo de z

Interpolación de $Z_{T=1203^{\circ}K}$

Tabla 21-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1203^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,40$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 22-2: Valor de $Z_{T=1203^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,40$

Para erf(z)=0,7843

x_0	0,7707	y_0	0,8500
x	0,7843	y	0,9018
x_1	0,7970	y_1	0,9000

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 23-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1203^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,50$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 24-2: Valor de $Z_{T=1203^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,50$

Para erf(z)=0,6863

x_0	0,6778	y_0	0,7000
x	0,6863	y	0,7127
x_1	0,7112	y_1	0,7500

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 25-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 26-2: Valor de $Z_{T=1203^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$

Para erf(z)=0,5882			
x_0	0,5633	y_0	0,5500
x	0,5882	y	0,5807
x_1	0,6039	y_1	0,6000

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tiempos de carburización para la temperatura de 1223°K

Tabla 27-2: Tiempos de carburización para la temperatura de 1203°K

$C_{\text{superficie}}$	Cinicial	Ccementación	Profundidad	Difusividad	$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0}$	z	Tiempo	
C_s (%)	C_0 (%)	C_x (%)	x (mm)	D (m ² /s)			t (s)	t (h)
1,20	0,18	0,40	1,00	3,03596E-11	0,7843	0,8759	10733,81	2,98
			1,25				16771,58	4,66
1,20	0,18	0,50	1,00	3,03596E-11	0,6863	0,7127	12468,05	4,50
			1,25				19481,33	7,04
1,20	0,18	0,60	1,00	3,03596E-11	0,5882	0,5807	24419,02	6,78
			1,25				38154,73	10,60

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Cálculo de z

Interpolación de $Z_{T=1223^{\circ}K}$

Tabla 28-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1223^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,40$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 29-2: Valor de $Z_{T=1223^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,40$

Para erf(z)=0,7843

x_0	0,7707	y_0	0,8500
x	0,7843	y	0,8759
x_1	0,7970	y_1	0,9000

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 30-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1223^{\circ}K}$ cuando $C_x=0,50$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 31-2: Valor de $Z_{T=1223^{\circ}F}$ cuando $C_x=0,50$

Para erf(z)=0,6863

x_0	0,6778	y_0	0,7000
x	0,6863	y	0,7127
x_1	0,7112	y_1	0,7500

Realizado por: Palacios Alexandra, 2021.

Tabla 32-2: Elección de límites para la interpolación $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$

Z	erf z	Z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,7427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

Tabla 33-2: Valor de $Z_{T=1223^{\circ}\text{K}}$ cuando $C_x=0,60$

Para erf(z)=0.6818			
x0	0,5633	y0	0,5500
x	0,5882	y	0,5659
x1	0,6039	y1	0,6000

Realizado por: Ostaiza Ramón, 2021.

2.7.8. Enfriamiento lento en el horno de fundición

2.7.9. Desmontaje del contenedor con las probetas y mezcla del horno de fundición

Luego de pasar por el proceso de enfriamiento procedemos al desmontaje y visualización de la probeta carburizada.



Figura 18-2. Desmontaje de la probeta AISI 1018 en el contenedor.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

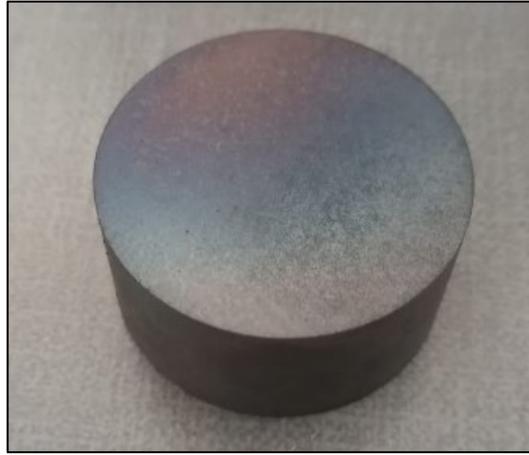


Figura 19-2. Probeta AISI 1018 carburizada.

Fuente: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.8. Carburización líquida

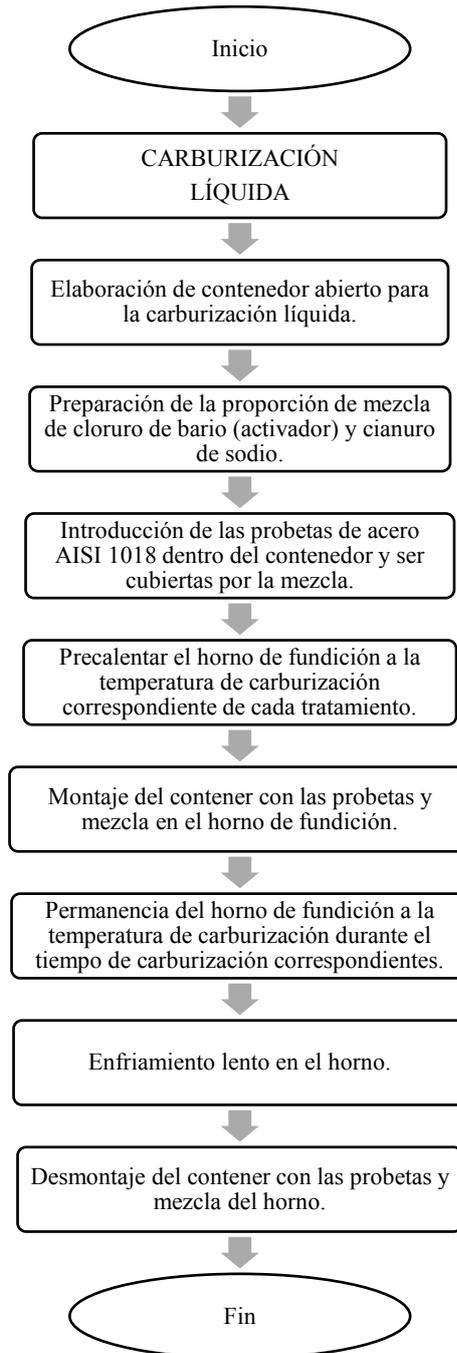


Figura 20-2. Diagrama de flujo del proceso de carburización líquida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.8.1. *Elaboración del contenedor abierto para la carburización líquida*

El contenedor abierto se diseñó a partir de acero inoxidable 304, cuyas dimensiones son de 10 cm de largo (l), 10 cm de ancho (a) y 4 cm de alto (h), como se indica en la Figura 31-2.

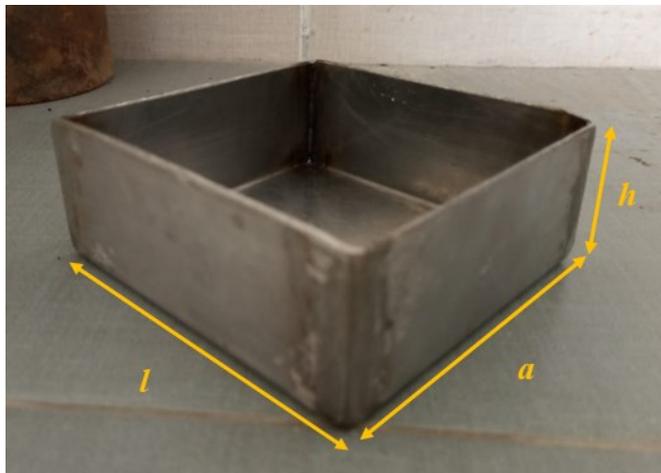


Figura 21-2. Probeta AISI 1018 carburizada.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

2.8.2. *Preparación de la proporción del baño de sales*

La proporción de cada uno de los componentes químicos del baño del cianuro se determinó en base a la profundidad de la capa carburada. Para la carburización líquida, se trabajó con los mismos parámetros iniciales de profundidad de la carburización sólida, es decir, de 1,00 mm y 1,25 mm. Por lo que, las profundidades de carburización comprendidas entre 0,20 mm y 1,50 mm debe poseer un baño de sales compuesto por cianuro de sodio, carbonato de sodio, cloruro de bario y cloruro de sodio en los porcentajes mostrados por la Tabla 31-2.

Tabla 34-2: Porcentajes de los componentes para mezcla del baño de sal.

Componente	Porcentaje de composición (%)
Cianuro de sodio	20
Cloruro de bario	30
Cloruro de sodio	25
Carbonato de sodio	25

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.8.3. *Pre calentamiento del horno de tratamiento térmico a la temperatura de carburización correspondiente de cada tratamiento.*

Las temperaturas de carburización líquida son las mismas de la carburización sólida, las cuales se determinaron en el diagrama hierro-carbono. Es decir, las temperaturas fueron de 1183°K, 1203°K y 1223°K.

2.8.4. Introducción del contenedor con la mezcla al horno de tratamiento térmico y sumersión de la probeta

Una vez que el horno de tratamiento térmico ha llegado a la temperatura de carburización del tratamiento, se introdujo el contenedor con la mezcla y, una vez que las sales estuvieron fundidas, se sumergió totalmente la probeta. Esto se realizó con ayuda de la pinza metálica y los equipos de protección personal.

2.8.5. Permanencia del horno de tratamiento térmico a la temperatura y tiempo de carburización correspondientes

Los parámetros de permanencia son la temperatura y el tiempo de carburización.

2.8.6. Cálculo de la constante de penetración durante la primera hora de difusión

Tabla 35-2: Constante de penetración

Temperatura (°F)	K (in)
1500	0,012
1600	0,018
1700	0,025

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Como primer paso, se transformó la temperatura de grados Fahrenheit a grados Celsius y las pulgadas a milímetros de la Tabla 33-2.

Tabla 36-2: Conversión de la Tabla 32-2

Temperatura (°C)	K (mm)
815	0,305
870	0,457
930	0,635

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Se procedió a aplicar la interpolación (ecuación 18) para calcular la constante de penetración durante la primera hora de difusión para cada temperatura de carburización. Entonces,

Tabla 37-2: Interpolación de la constante de penetración de 910 °C.

x_0	870	y_0	0,457
x	910	y	0,576
x_1	930	y_1	0,635

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 38-2: Interpolación de la constante de penetración de 930 °C.

x_0	870	y_0	0,457
x	930	y	0,635
x_1	950	y_1	0,694

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Finalmente, los coeficientes de penetración para las temperaturas de carburización líquida son los siguientes:

Tabla 39-2: Coeficientes de penetración para las temperaturas 910, 930 y 950 ° C

Temperatura (°C)	K (in)
910	0,576
930	0,635
950	0,694

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.8.7. Cálculo del tiempo de carburización líquida en sales

Los tiempos de carburización líquida se calcularon mediante el despeje del término t de la Ecuación 7. Obteniendo la siguiente ecuación:

$$t = \left(\frac{x}{K}\right)^2 \quad (19)$$

Tiempo de carburización líquida para una temperatura de 910 °C

Tabla 40-2: Cálculo del tiempo de carburización líquida para 910 °C.

Profundidad x (mm)	Constante de penetración K (mm)	de Tiempo t (h)
1	0.576	3.02
1.25		4.71

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 41-2: Tiempo de carburización líquida para 910 °C.

TIEMPO	
HORA	MINUTOS
3	1

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tiempo de carburización líquida para una temperatura de 930 °C

Tabla 42-2: Cálculo del tiempo de carburización líquida para 930 °C.

Profundidad x (mm)	Constante penetración K (mm)	de Tiempo t (h)
1	0.635	2.48
1.25		3.88

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 43-2: Tiempo de carburización líquida para 930 °C.

TIEMPO	
HORA	MINUTOS
2	29
3	53

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tiempo de carburización líquida para una temperatura de 950 °C

Tabla 44-2: Cálculo del tiempo de carburización líquida para 950 °C.

Profundidad x (mm)	Constante penetración K (mm)	de Tiempo t (h)
1	0.694	2.07
1.25		3.24

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 45-2: Tiempo de carburización líquida para 950 °C.

TIEMPO	
HORA	MINUTOS
2	4
3	14

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

2.8.8. Extraer la probeta del baño en sales de cianuro y enfriamiento al ambiente

Se retira las probetas carburizadas de las sales fundidas con ayuda de la pinza metálica para su posterior enfriamiento al ambiente. También se usan los equipos de protección personal.

2.8.9. Tratamientos térmicos a las probetas carburizadas

Luego de realizar la carburización se realizó dos tratamientos térmicos con el fin de eliminar tensiones generadas en dicho proceso los cuales son detallados a continuación:

- Temple
- Revenido
-

2.8.10. Bonificado

2.8.10.1. Temple

Para endurecer y fortalecer el material (probetas de acero AISI 1018 carburizadas) a través del temple se realizan los siguientes pasos:

- Introducción de las probetas carburadas dentro del horno de tratamiento térmico

Una vez que las probetas fueron sometidas a los procesos de carburización sólida y líquida en sales, se procede con el tratamiento térmico del temple para aumentar la dureza del acero AISI 1018.

Para ello, se inició con el ingreso de probetas dentro del horno de tratamiento térmico.

- *Calentamiento del horno de tratamiento térmico*

La temperatura límite (máxima) del temple transforma la estructura del acero en austenita. Para el acero AISI 1018, al ser un acero hipoeutectoide, se debe cumplir estrictamente la temperatura de austenización para obtener un temple perfecto. Aunque con un temple imperfecto (austenización incompleta) se logran buenas, e incluso mejores, propiedades en el acero templado.

La temperatura máxima de temple para aceros hipoeutectoides se calcula al exceder 50 °C por encima de la temperatura crítica de transformación de ferrita en austenita (A_3) con el fin de asegurar la transformación total de la masa. En términos matemáticos es:

$$\text{Temperatura de temple} = A_3 + 50^\circ\text{C} \quad (20)$$

Cálculo de la temperatura crítica de temple

Las probetas carburadas poseen una temperatura crítica A_3 de acuerdo con su temperatura de carburización, entonces las A_3 para cada proceso de carburización se determina mediante el diagrama hierro-carbono.

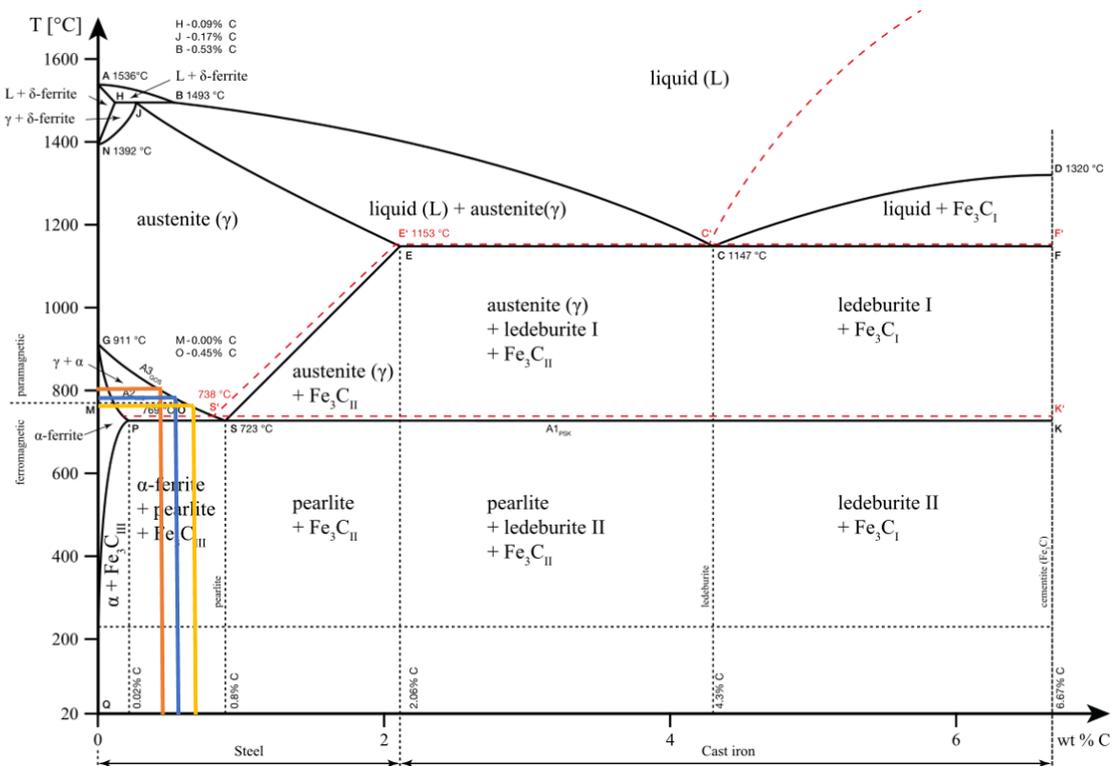


Figura 22-2. Temperatura de austenización para las temperaturas de carburización sólida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

Para resumir la Figura 35-2,

Tabla 46-2: Resumen de la temperatura crítica de temple para las temperaturas trabajadas.

Línea	Concentración de carbono (%)	Temperatura crítica A_3 ($^\circ\text{C}$)
	0,4	800
	0,5	780
	0,6	760

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Entonces, por medio de la ecuación 20 se calculó la temperatura crítica de temple.

Tabla 47-2: Resumen de la temperatura crítica de temple para las temperaturas trabajadas.

Temperatura crítica A_3 (°C)	Temperatura crítica de temple (°C)
800	850
780	830
760	810

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Permanencia del horno de tratamiento térmico

La permanencia a la temperatura crítica del temple inicia cuando la probeta y el horno se encuentran en equilibrio térmico, es decir, ambos se encuentran a la misma temperatura. En este estado y a lo largo del tiempo de permanencia del temple se logra la difusión de carbono y uniformidad de tamaños de grano.

El acero AISI 1018 es un acero de bajo contenido de carbono, por lo que el tiempo de permanencia del temple depende del dimensionamiento de la probeta.

El tiempo de permanencia para probetas con un espesor menor a 25 mm es:

$$t(D) = 15 + \frac{D}{2} \quad (21)$$

Donde,

t = tiempo (min)

D = diámetro de la probeta (mm)

Si $D = 38,1 \text{ mm}$, entonces:

$$t = 34,05 \text{ min}$$

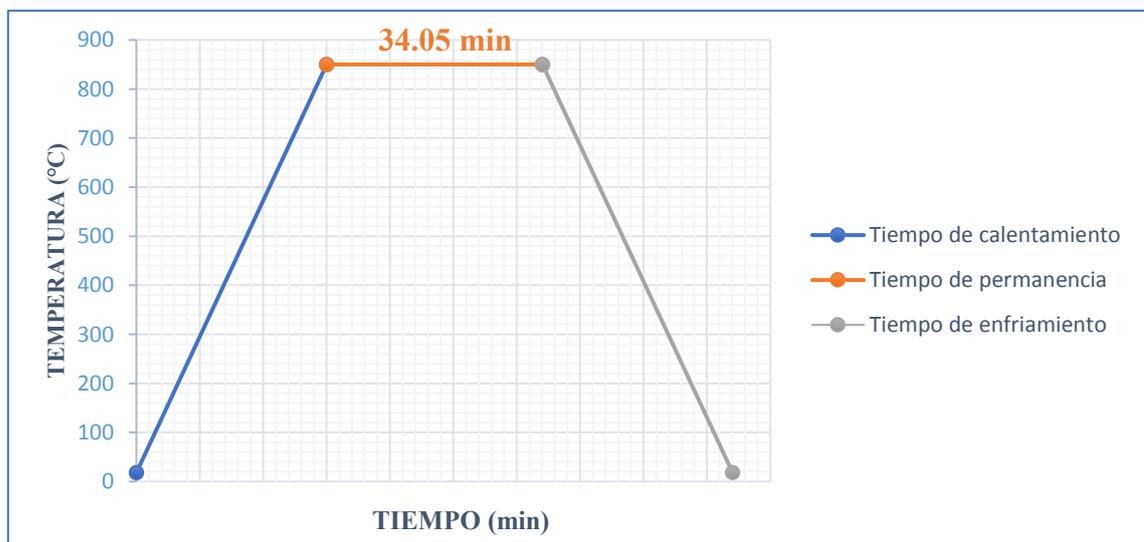


Figura 23-2. Diagrama TTT de temple.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Enfriamiento rápido en aceite

Para el enfriamiento se ocupó un aceite mineral con una viscosidad de 6 °Engler.

2.8.10.2. Revenido

Para liberar tensiones el material (probetas de acero AISI 1018 carburizadas) provocadas por el temple a través del revenido se realizan los siguientes pasos:

- Introducción de las probetas templadas dentro del horno de tratamiento térmico

Luego de que las probetas fueron sometidas al proceso de temple, se procedió con el tratamiento térmico de revenido para disminuir las tensiones acero AISI 1018 se ingresó las probetas dentro del horno de tratamiento térmico.

- *Calentamiento del horno de tratamiento térmico*

Se encendió el horno a 220 °C por debajo de la temperatura mínima seleccionada de revenido.

$$T = 20 + \frac{D}{2} \quad (22)$$

$$T = 20 + \frac{3,82}{2}$$

$$T = 21,91 \text{ min}$$

- *Permanencia del horno de tratamiento térmico*

La permanencia a la temperatura crítica del temple inicia cuando la probeta y el horno se encuentran en equilibrio térmico, es decir, ambos se encuentran a la misma temperatura. En este estado y a lo largo del tiempo de permanencia del temple se logra la difusión de carbono y

uniformidad de tamaños de grano. Una vez que el horno alcanza la temperatura seleccionada, se dejaron las piezas por dos horas.

- *Enfriamiento*

Se sacaron las piezas y se dejaron enfriando al aire calmo, esto se repite para cada una de las probetas de acero AISI 1018 carburizadas y templadas. Una vez enfriadas las piezas se clasificaron y guardaron en bolsas etiquetadas para evitar una futura confusión.

2.9. Mecanizado de las probetas del Acero AISI 1018 posterior a tratamientos: termoquímico (carburización) y térmicos (temple y revenido)

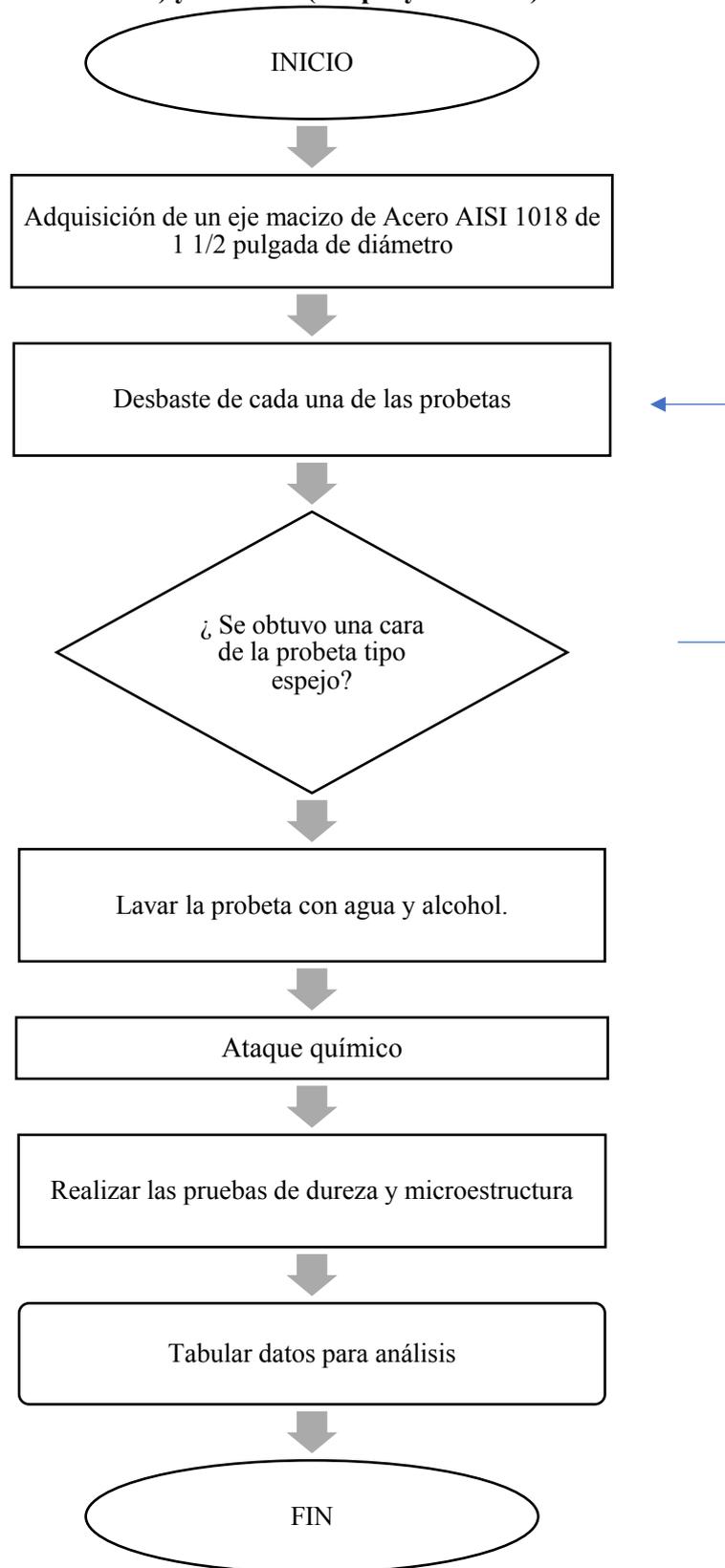


Figura 24-2: Diagrama de Flujo del mecanizado de probetas tratadas.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Microestructuras Finales

Se empleó el reactivo nital para revelar las fases micro estructurales formadas después del proceso de carburización, posterior temple y revenido.

3.1.1. Microestructuras Finales del acero AISI 1018 sometidas a carburización sólida Temperatura: 1183 °K

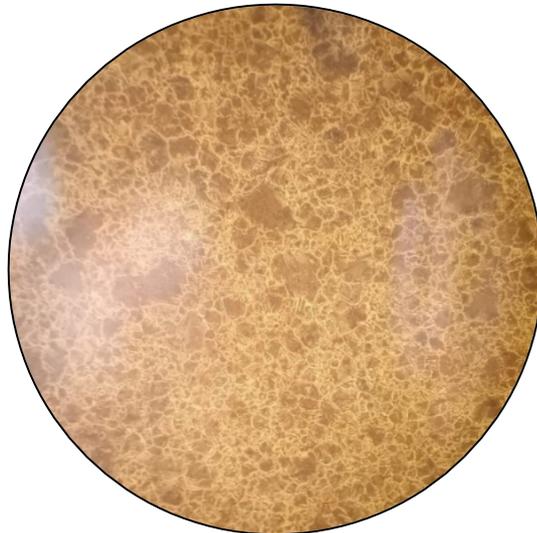


Figura 1-3: Muestra 1. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/4,74horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

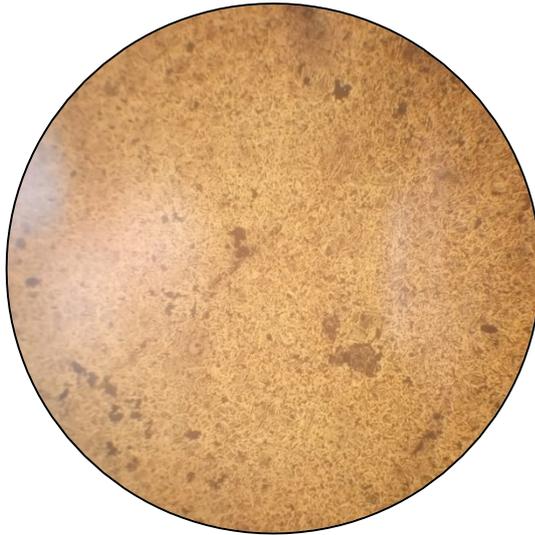


Figura 2-3: Muestra 1. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/4,74horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

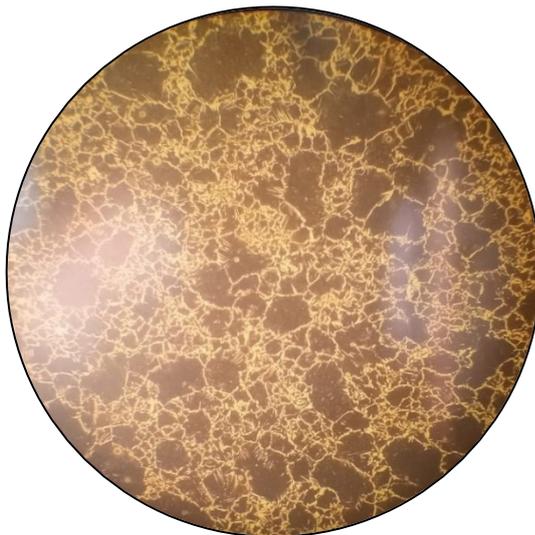


Figura 3-3. Muestra 2. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/7,40horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

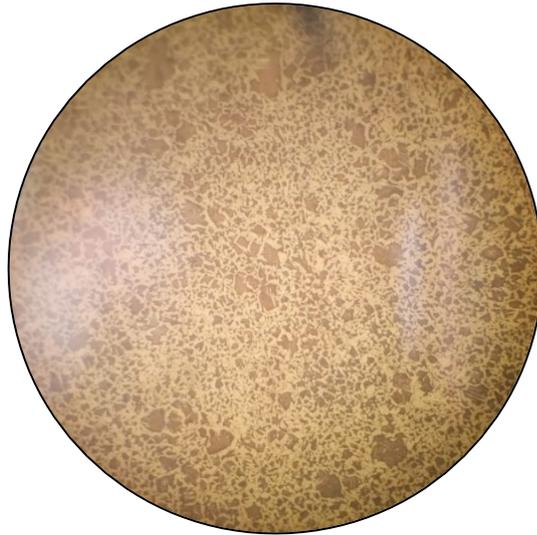


Figura 4-3. Muestra 2. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/7,40horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

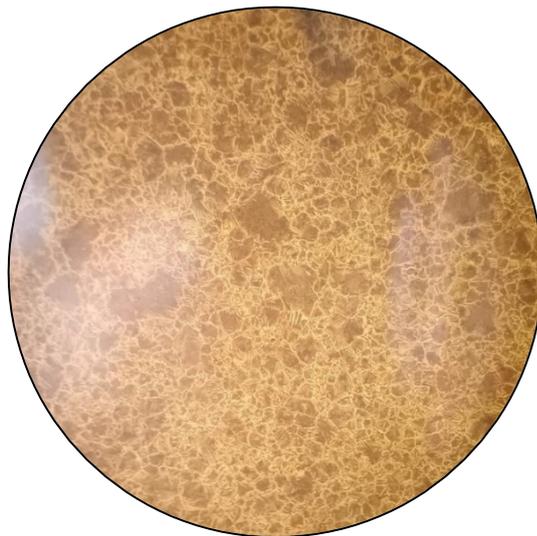


Figura 5-3. Muestra 3. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/7,18horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

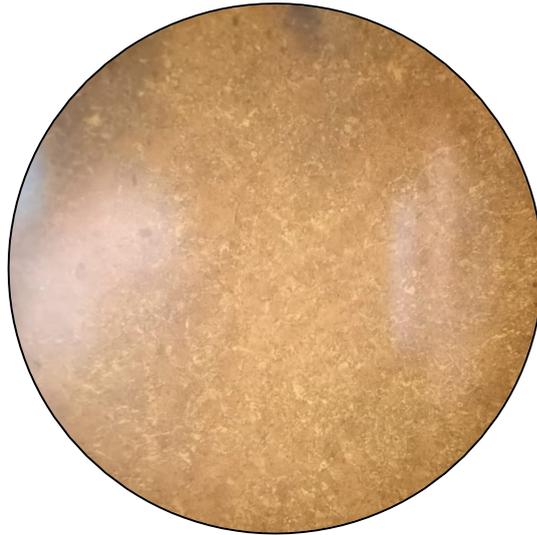


Figura 6-3. Muestra 3. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/7,18horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

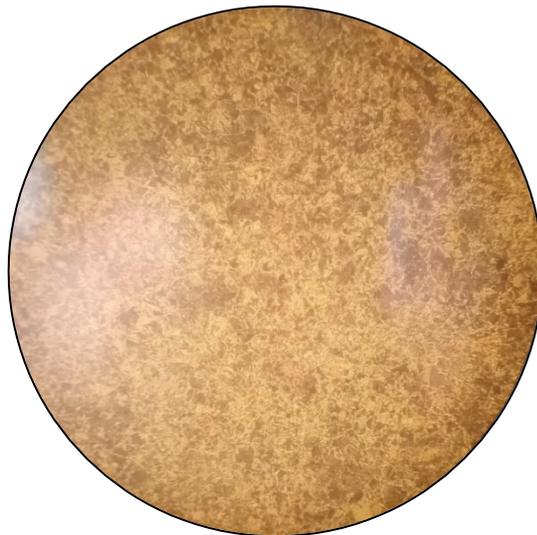


Figura 7-3. Muestra 4. (Núcleo). Ferrita y perlita. Prueba a 1183°K/11,22horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021



Figura 8-3. Muestra 4. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/11,22horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

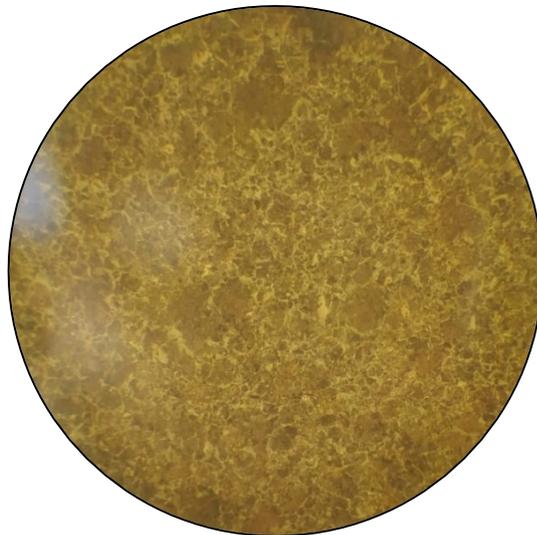


Figura 9-3. Muestra 5. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1183°K/10,77horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021



Figura 10-3. Muestra 5. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/10,77horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

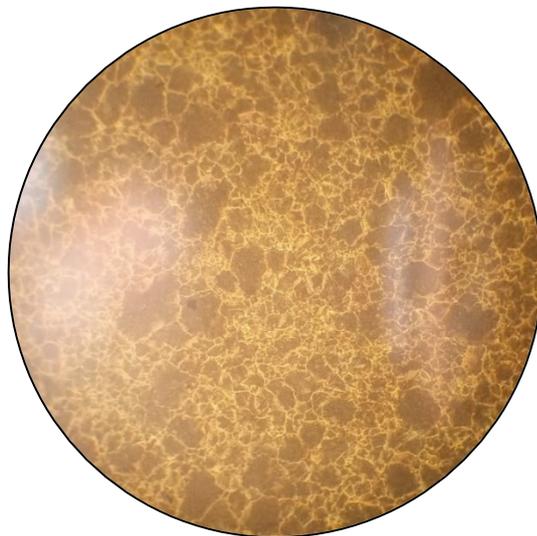


Figura 11-3. Muestra 6. (Núcleo). Ferrita y perlita. Prueba a 1183°K/16,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

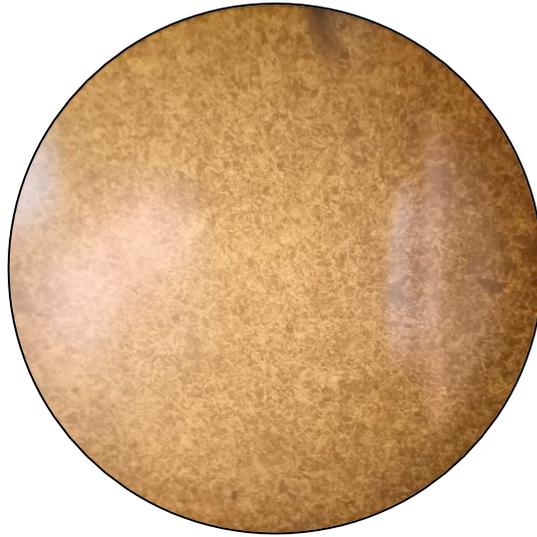


Figura 12-3. Muestra 6. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1183°K/16,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

Temperatura: 1203 °C

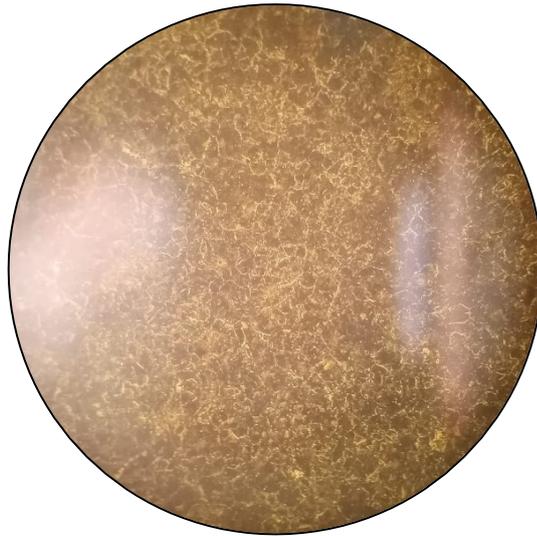


Figura 13-3. Muestra 7. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/3,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

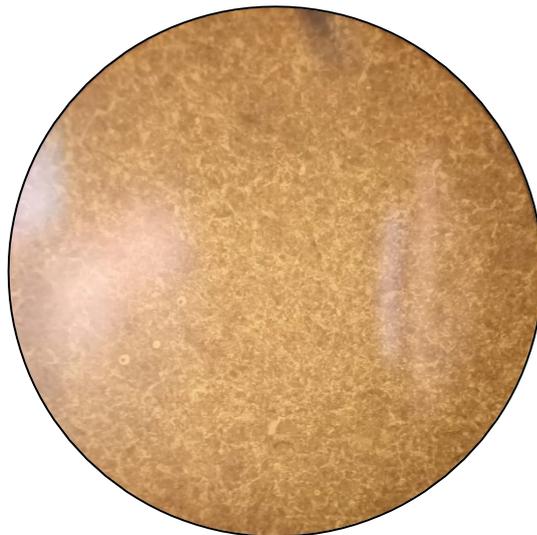


Figura 14-3. Muestra 7. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/3,82horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

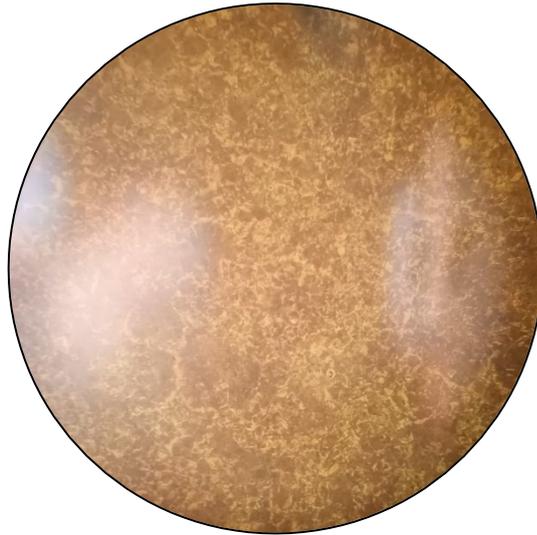


Figura 15-3. Muestra 8. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/5,97horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

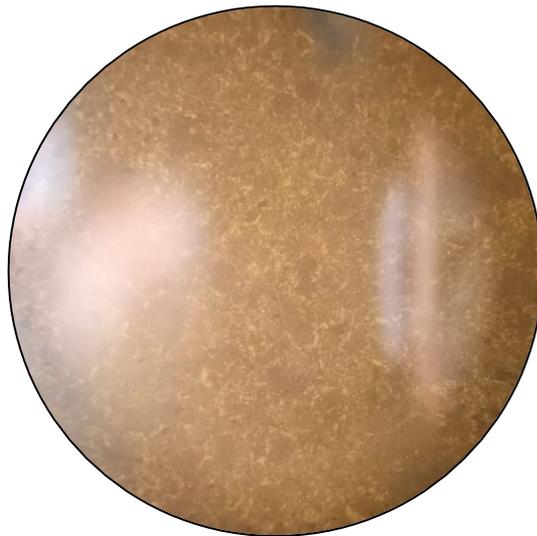


Figura 16-3. Muestra 8. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/5,97horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

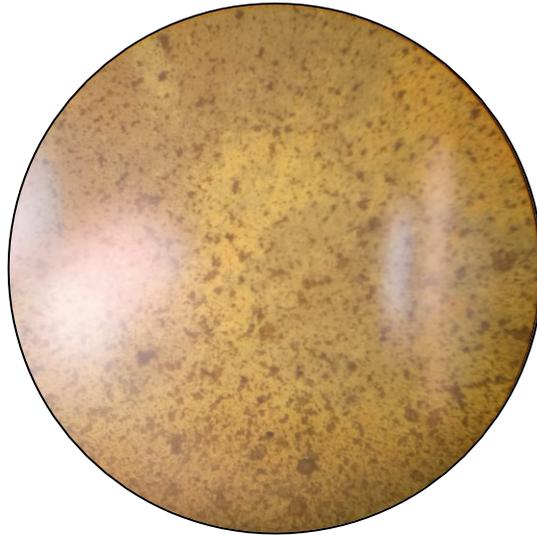


Figura 17-3. Muestra 9. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/5,69horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

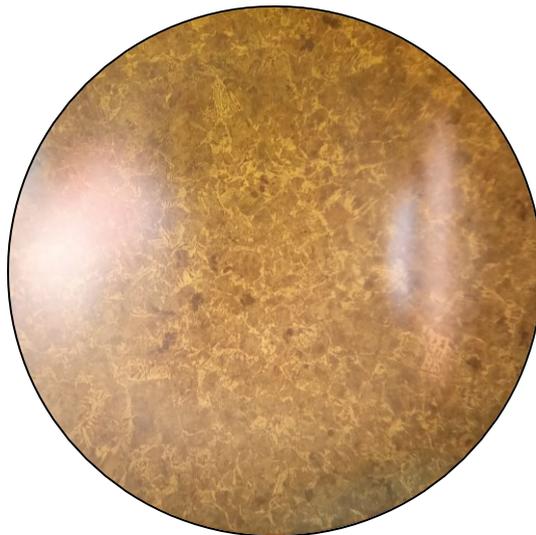


Figura 18-3. Muestra 9. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/5,69horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

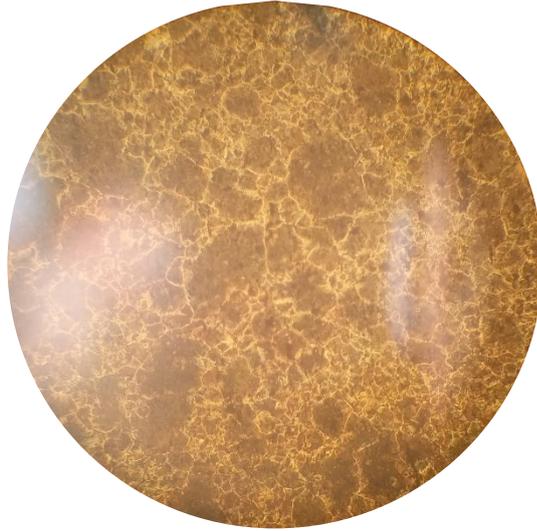


Figura 19-3. Muestra 10. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/8,89horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

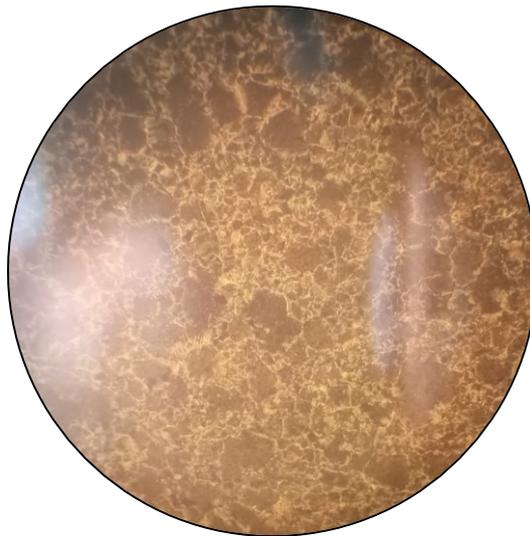


Figura 20-3. Muestra 10. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/8,89horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

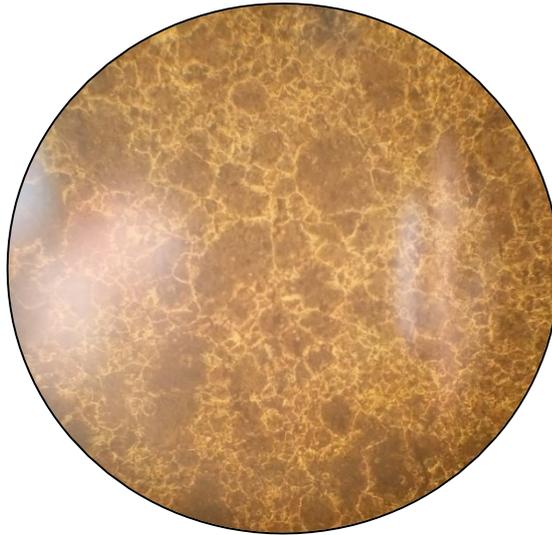


Figura 21-3. Muestra 11. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/8,67horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

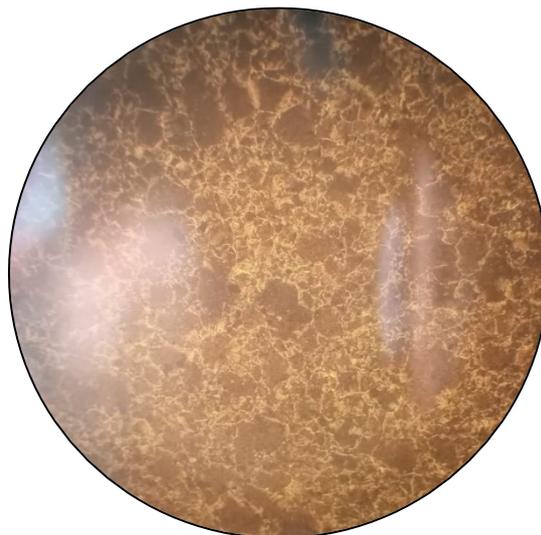


Figura 22-3. Muestra 11. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/8,67horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

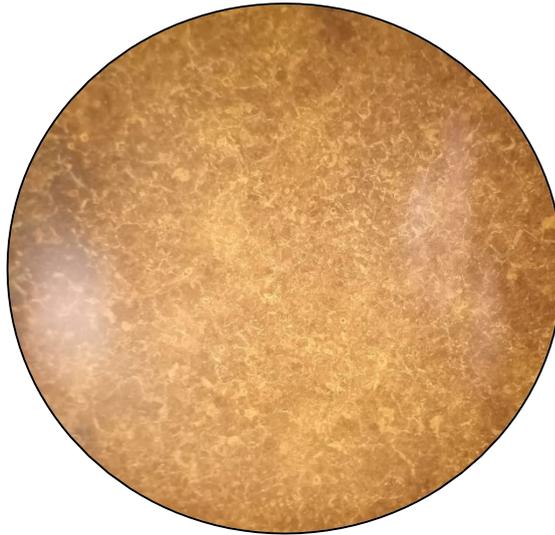


Figura 23-3. Muestra 12. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/13,54horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021



Figura 24-3. Muestra 12. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/13,54horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

Temperatura: 1223 °C

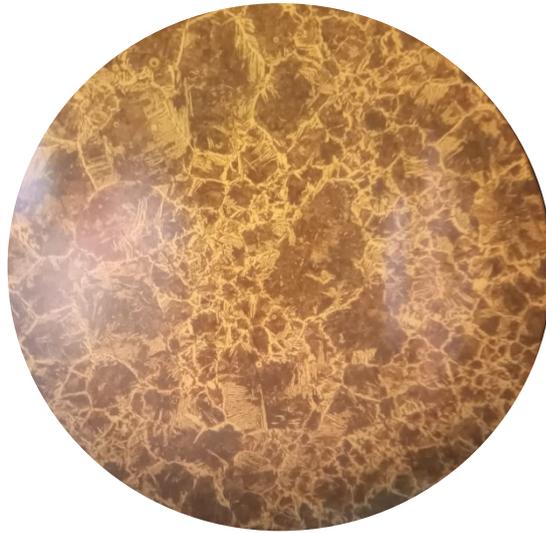


Figura 25-3. Muestra 13. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/3,05horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

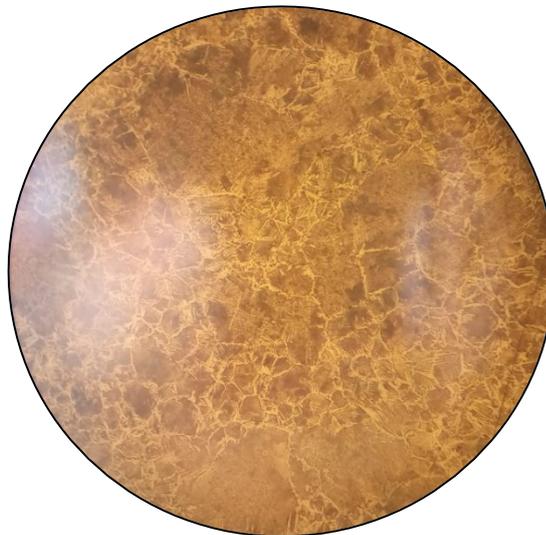


Figura 26-3. Muestra 13. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°C/3,05 horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

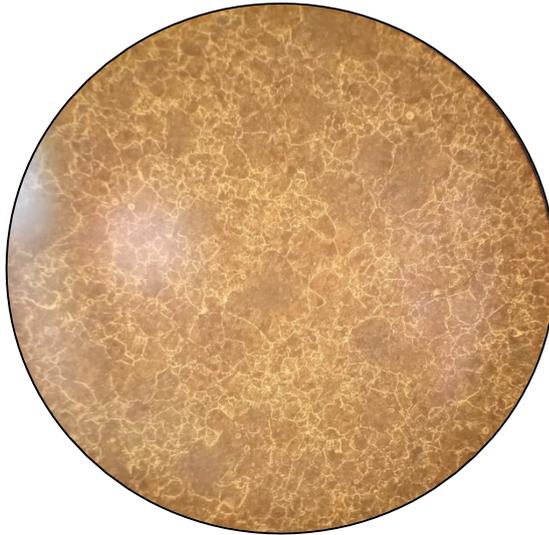


Figura 27-3. Muestra 14. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/4,76horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

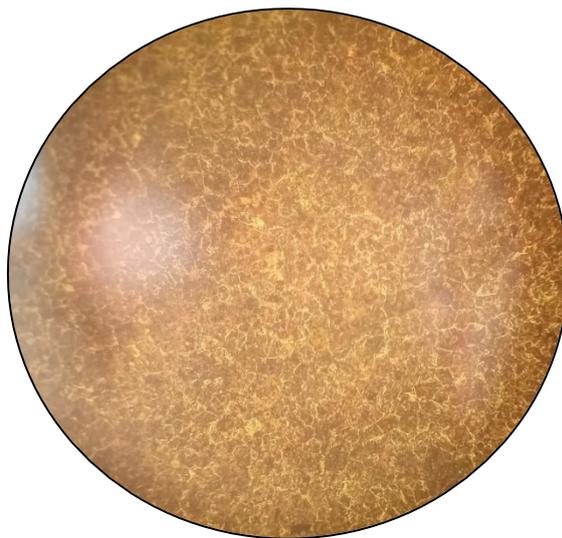


Figura 28-3. Muestra 14. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/4,76horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

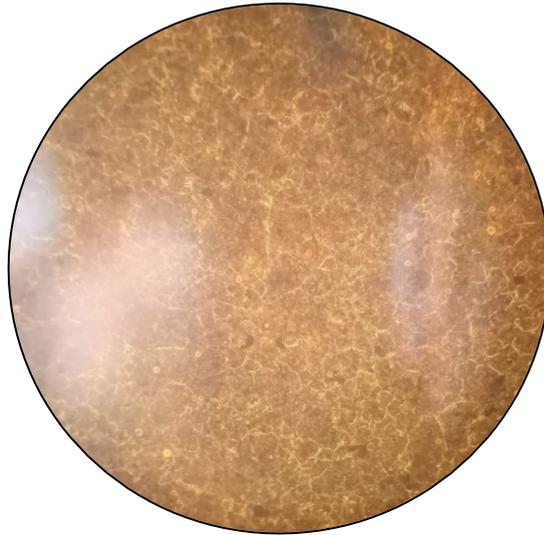


Figura 29-3. Muestra 15. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/4,64horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

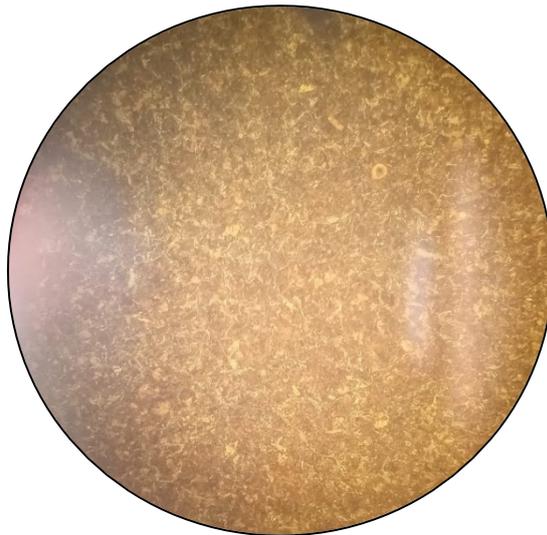


Figura 30-3. Muestra 15. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/4,64horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

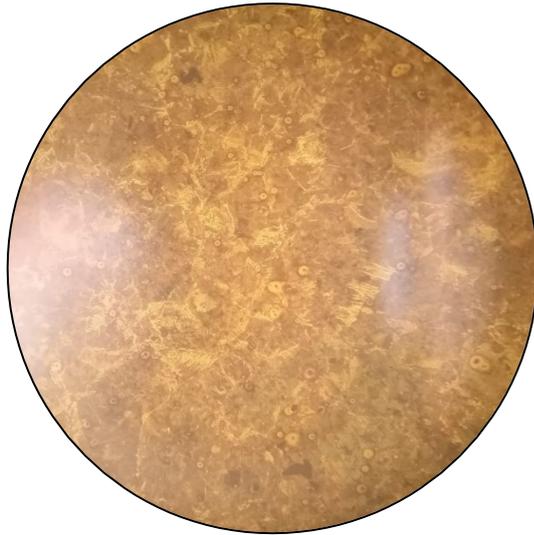


Figura 31-3. Muestra 16. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/7,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

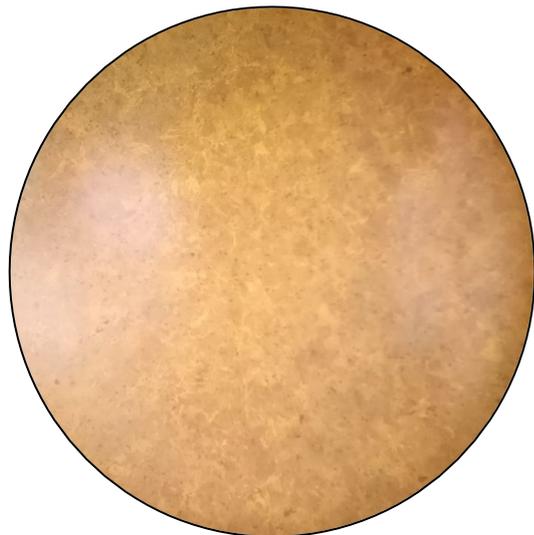


Figura 32-3. Muestra 16. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/7,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021



Figura 33-3. Muestra 17. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/7,14horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

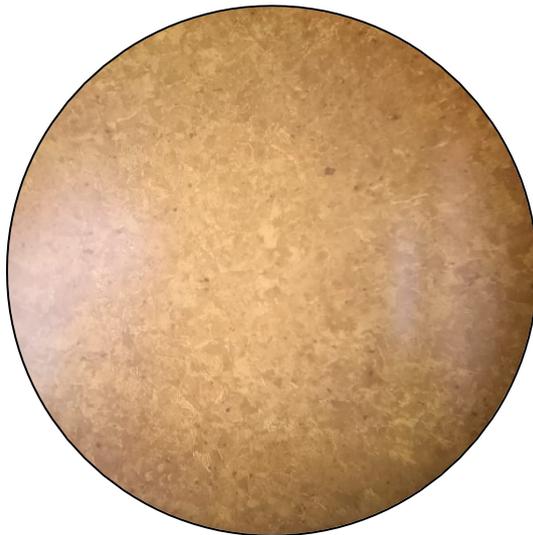


Figura 34-3. Muestra 17. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/7,14horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

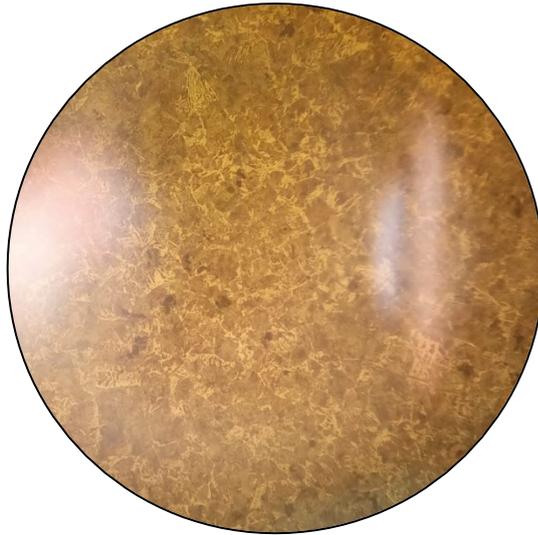


Figura 35-3. Muestra 18. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/11,16horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021



Figura 36-3. Muestra 18. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/11,16horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

3.1.2. Microestructuras Finales del acero AISI 1018 sometidas a carburización líquida

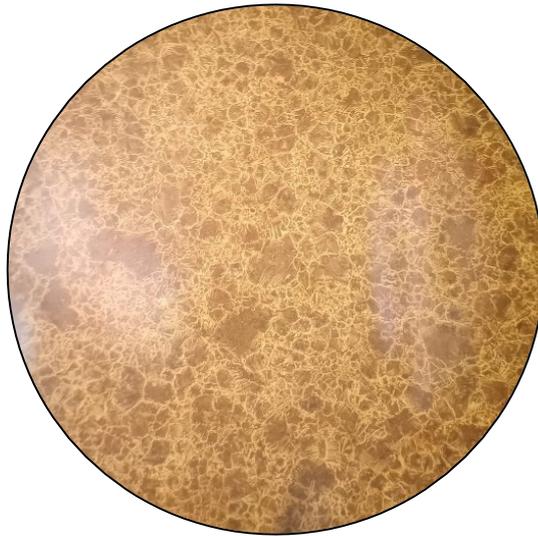


Figura 37-3. Muestra 19. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1883°K/3,02horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

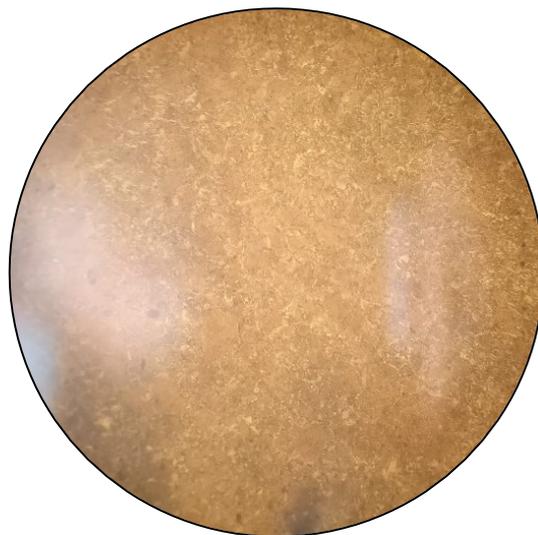


Figura 38-3. Muestra 19. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1883°K/3,02horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

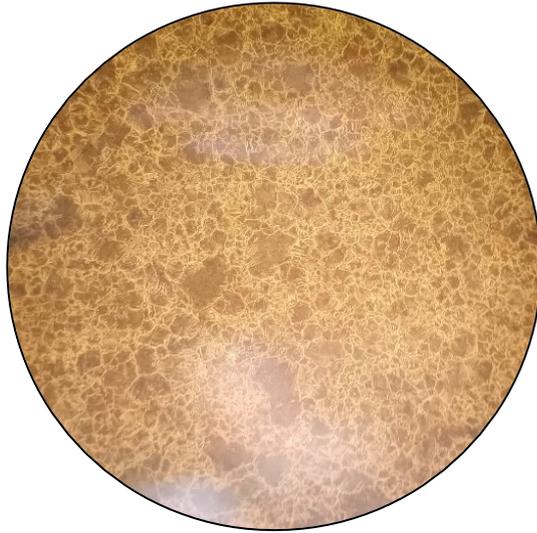


Figura 39-3. Muestra 20. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1883°K/4,71horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

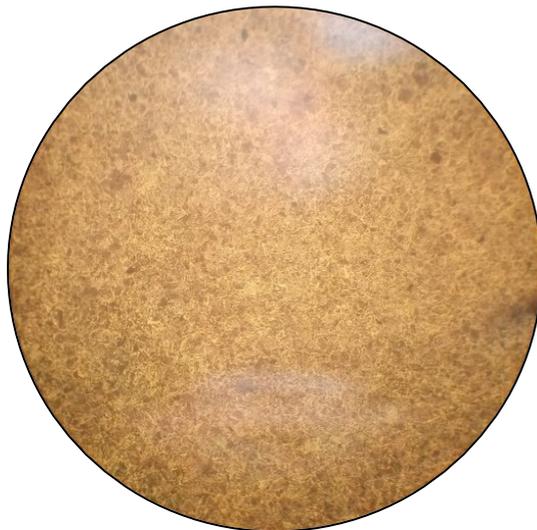


Figura 40-3. Muestra 20. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1883°K/4,71horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

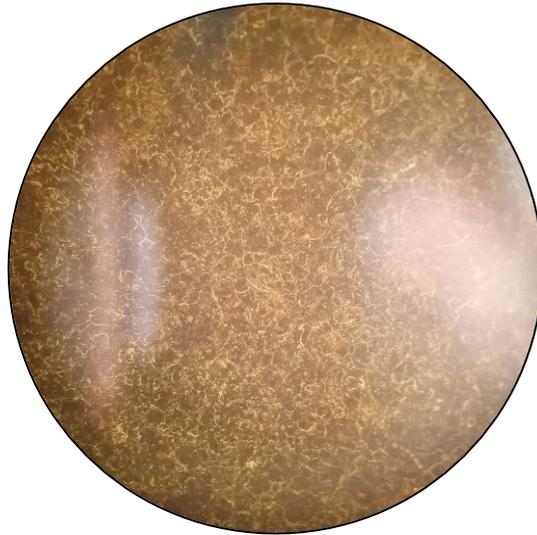


Figura 41-3. Muestra 21. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/2,48horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

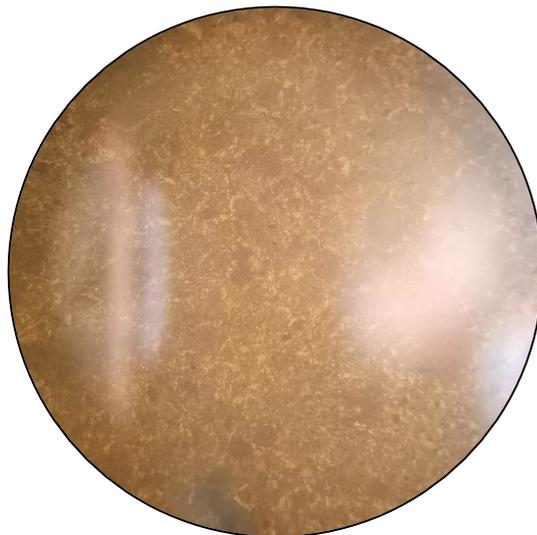


Figura 42-3. Muestra 21. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/2,48horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

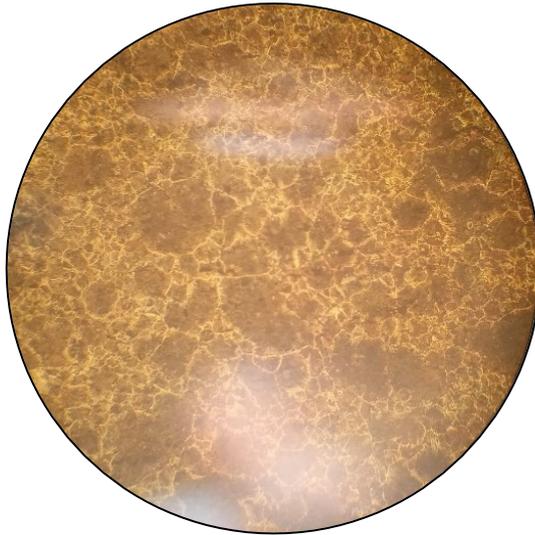


Figura 43-3. Muestra 22. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1203°K/3,88horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

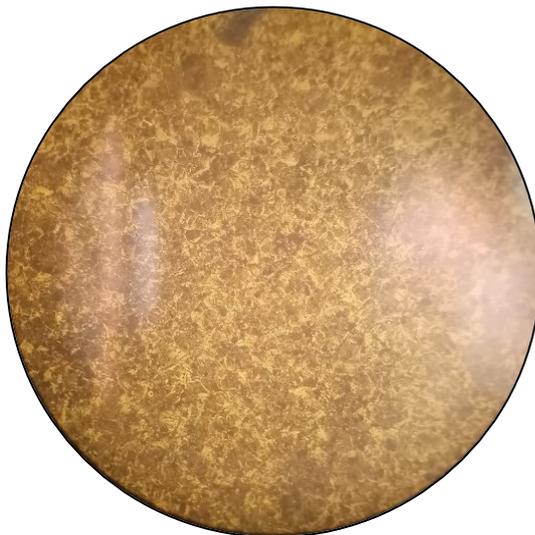


Figura 44-3. Muestra 22. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1203°K/3,88horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

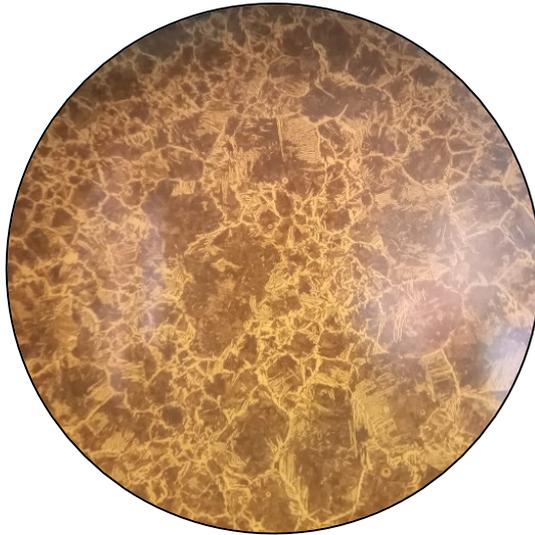


Figura 45-3. Muestra 23. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/2,07horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

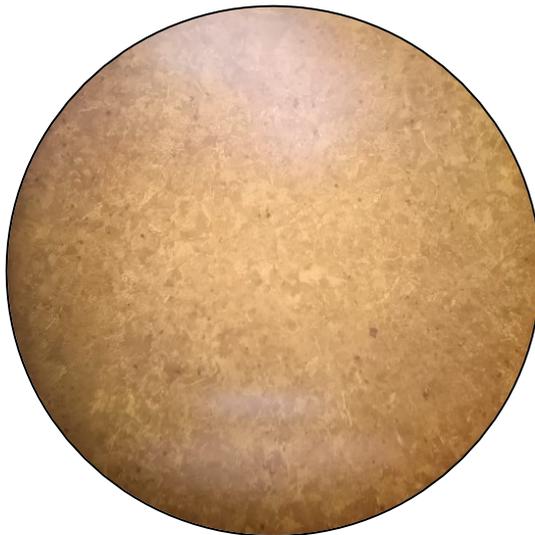


Figura 46-3. Muestra 23. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/2,07horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Figura 47-3. Muestra 24. (Núcleo). Ferrita y perlita fina. Prueba a 1223°K/3,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Figura 48-3. Muestra 24. (Extremo). Martensita revenida. Prueba a 1223°K/3,24horas con tratamiento térmico bonificado. Aumento 500x. Reactivo: Nital.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

3.2. Microensayo de dureza vickers

$$D_m = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (22)$$

$$HV = \frac{1,8544 * P}{D_m^2} \quad (23)$$

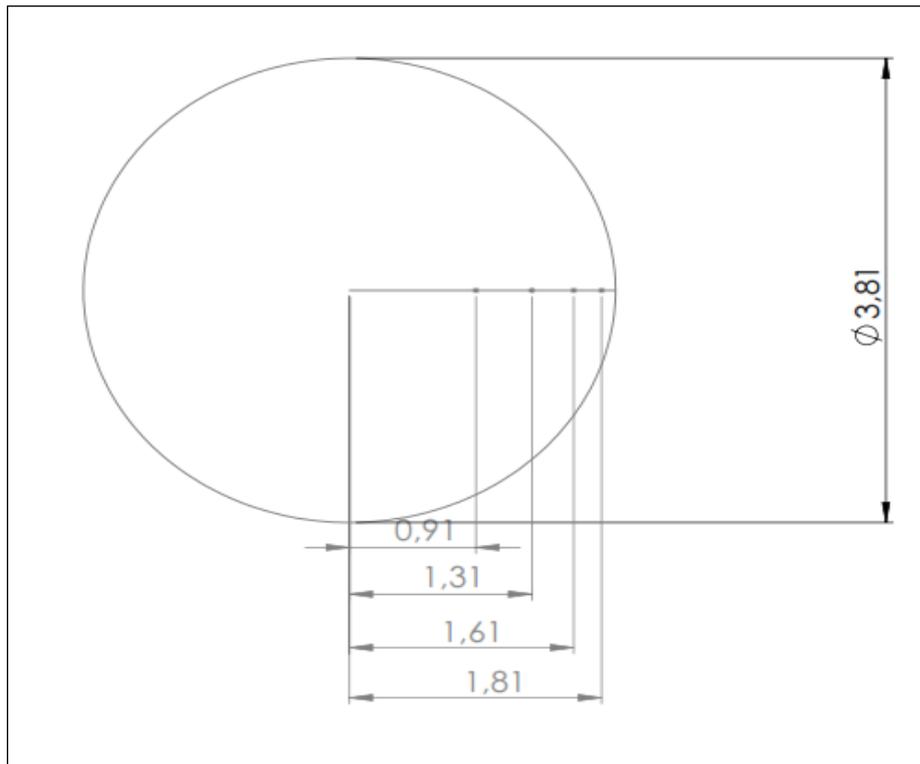


Figura 49-3. Probeta AISI 1018 carburizada.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

3.3. Ensayo de micro dureza Vickers en una probeta AISI 1018 en condiciones normales

Tabla 1-3: Micro dureza Vickers en condiciones normales.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00						442
9,15						442
13,15	48,00	46,50	0,09216	0,0893	0,0907	442
16,15						442
18,15						442

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

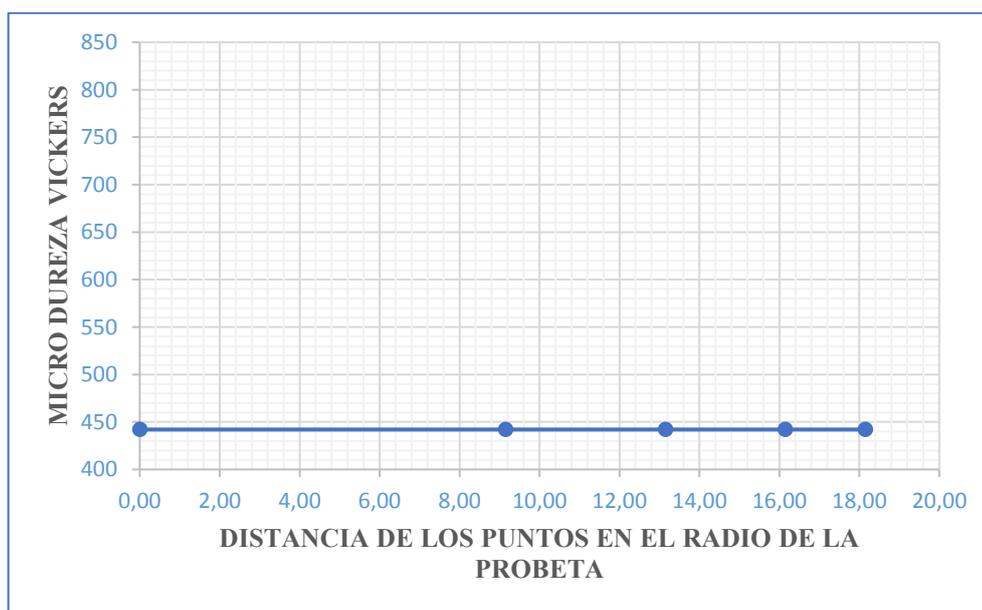


Gráfico 1-3: Micro dureza de probeta AISI 1018 en condiciones normales

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

3.4. Ensayo de micro dureza Vickers de la temperatura de carburización T=1883°K

Tabla 2-3: Micro dureza Vickers con %C=0,4% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,74 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	46,00	45,50	0,0883	0,0874	0,0878	472
9,15	45,00	45,00	0,0864	0,0864	0,0864	487
13,15	46,00	43,00	0,0883	0,0826	0,0854	498
16,15	42,50	42,00	0,0816	0,0806	0,0811	553
18,15	42,50	41,00	0,0816	0,0787	0,0802	566

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

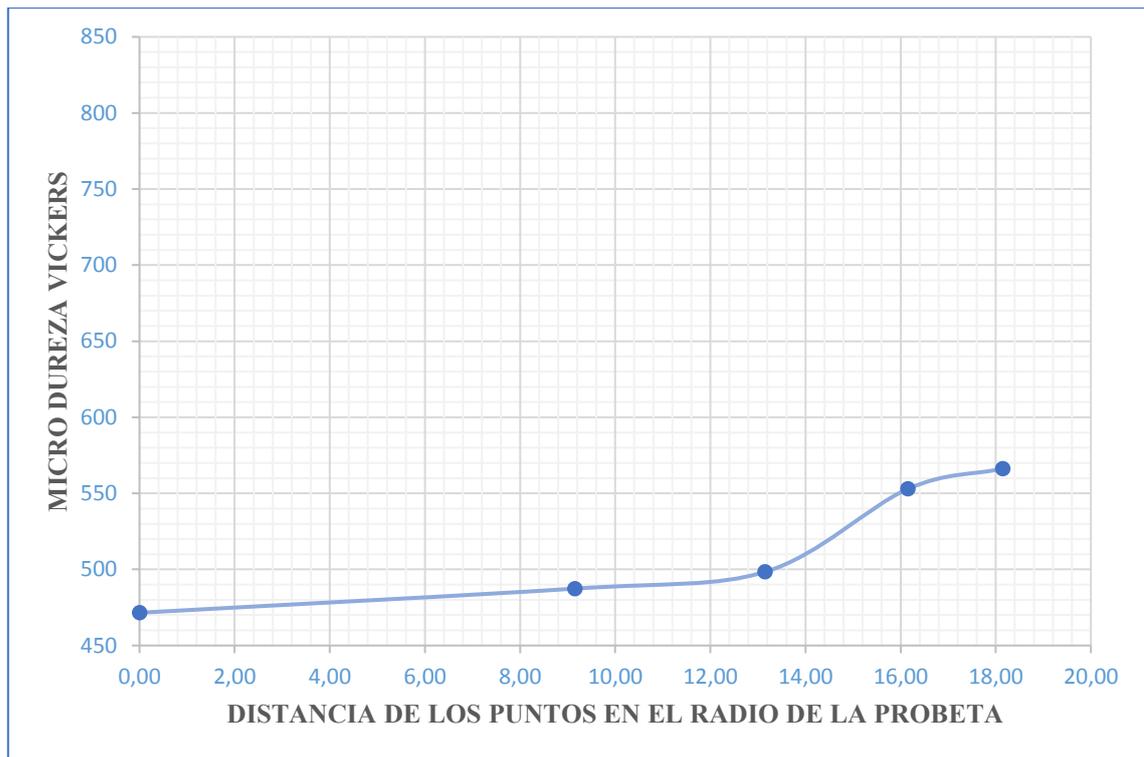


Gráfico 2-3: Micro dureza en la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,4%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,74 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 3-3: Micro dureza Vickers con %C=0,4% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,40 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	48,00	43,50	0,0922	0,0835	0,0878	472
9,15	46,00	43,50	0,0883	0,0835	0,0859	493
13,15	47,00	42,00	0,0902	0,0806	0,0854	498
16,15	42,00	45,00	0,0806	0,0864	0,0835	522
18,15	40,00	40,00	0,0768	0,0768	0,0768	617

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Gráfico 3-3: Micro dureza en la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0.4%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,40 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 4-3: Micro dureza Vickers con %C=0,5% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,18 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	47,00	44,00	0,0902	0,0845	0,0874	477
9,15	47,50	43,00	0,0912	0,0826	0,0869	482
13,15	45,00	44,50	0,0864	0,0854	0,0859	493
16,15	40,50	45,50	0,0778	0,0874	0,0826	534
18,15	41,50	39,50	0,0797	0,0758	0,0778	602

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

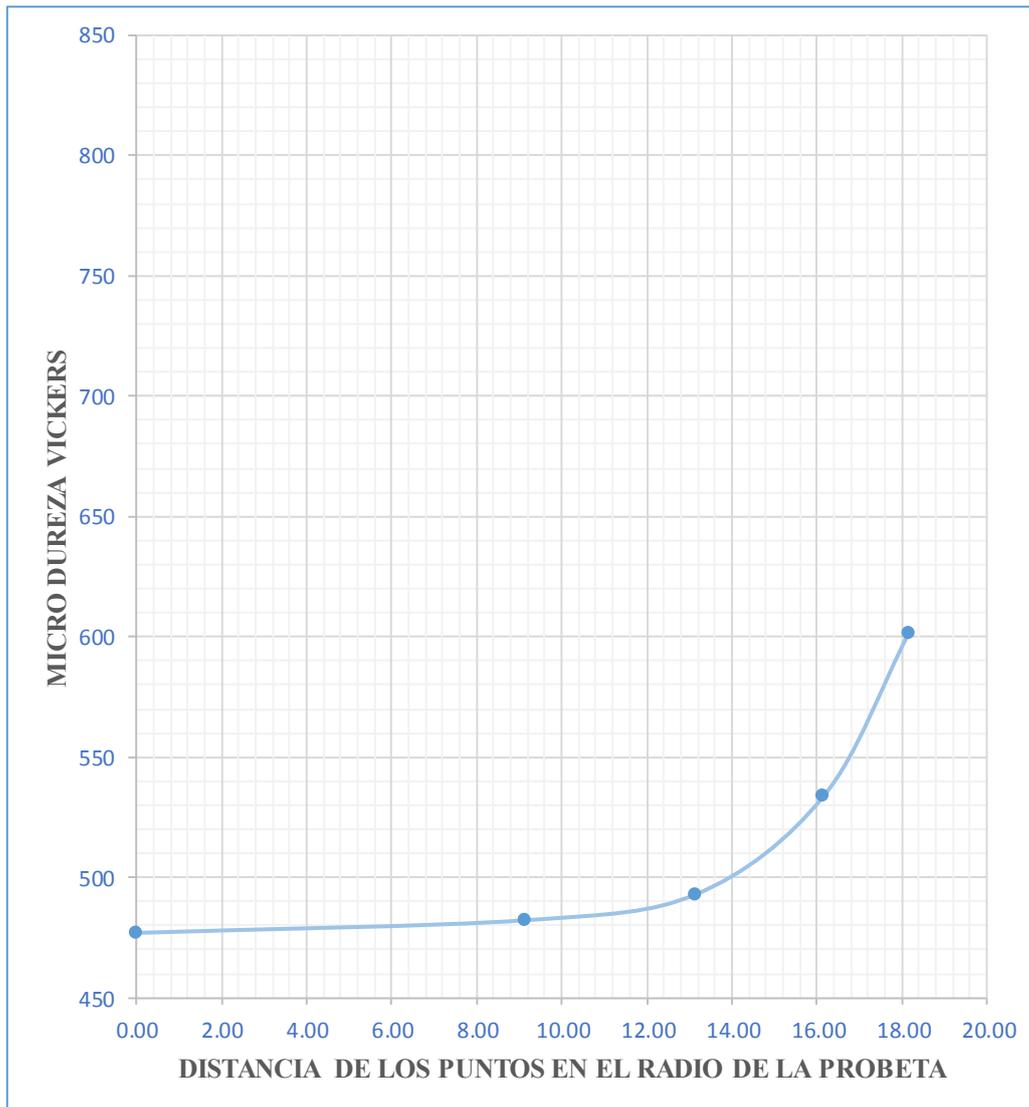


Gráfico 4-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,5% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,18 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 5-3: Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,22 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	40,00	51,50	0,0768	0,0989	0,0878	472
9,15	38,00	38,00	0,073	0,0730	0,0730	683
13,15	33,00	39,00	0,0634	0,0749	0,0691	762
16,15	36,00	35,00	0,0691	0,0672	0,0682	783
18,15	35,00	35,00	0,0672	0,0672	0,0672	806

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

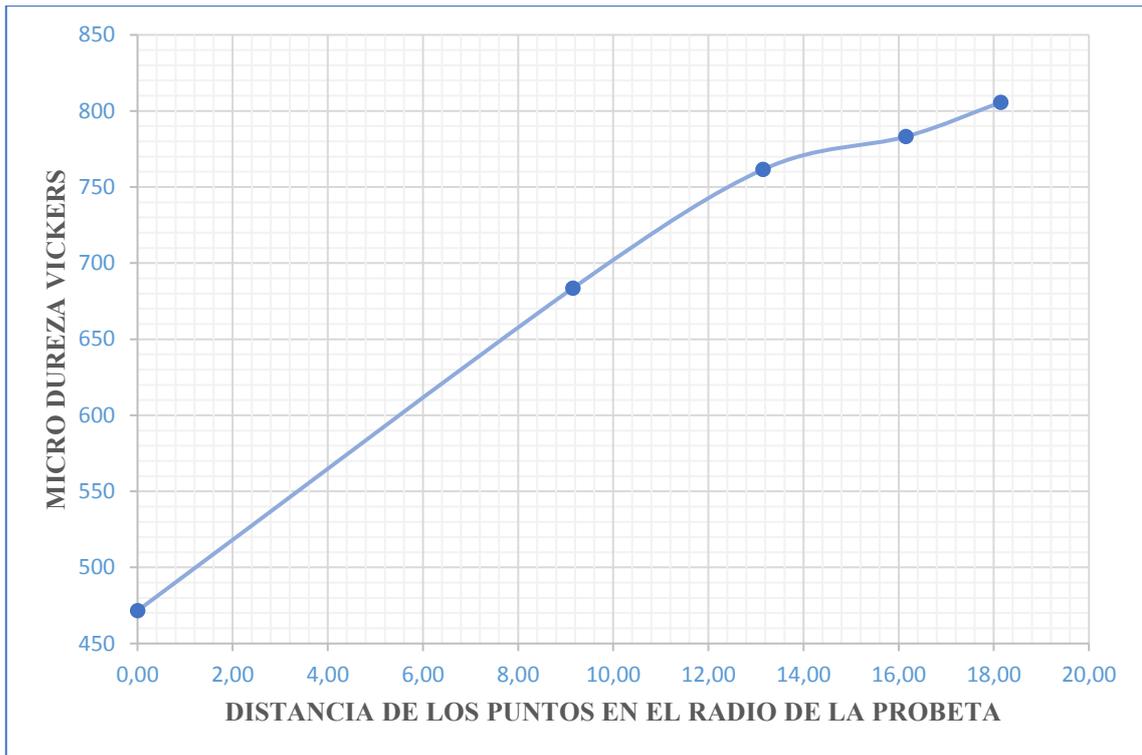


Gráfico 5-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,50%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,22 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 6-3: Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 10,77 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	50,00	41,00	0,096	0,0787	0,0874	477
9,15	41,00	41,00	0,0787	0,0787	0,0787	587
13,15	40,00	39,00	0,0768	0,0749	0,0758	633
16,15	40,00	38,00	0,0768	0,0730	0,0749	649
18,15	38,00	38,50	0,073	0,0739	0,0734	675

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

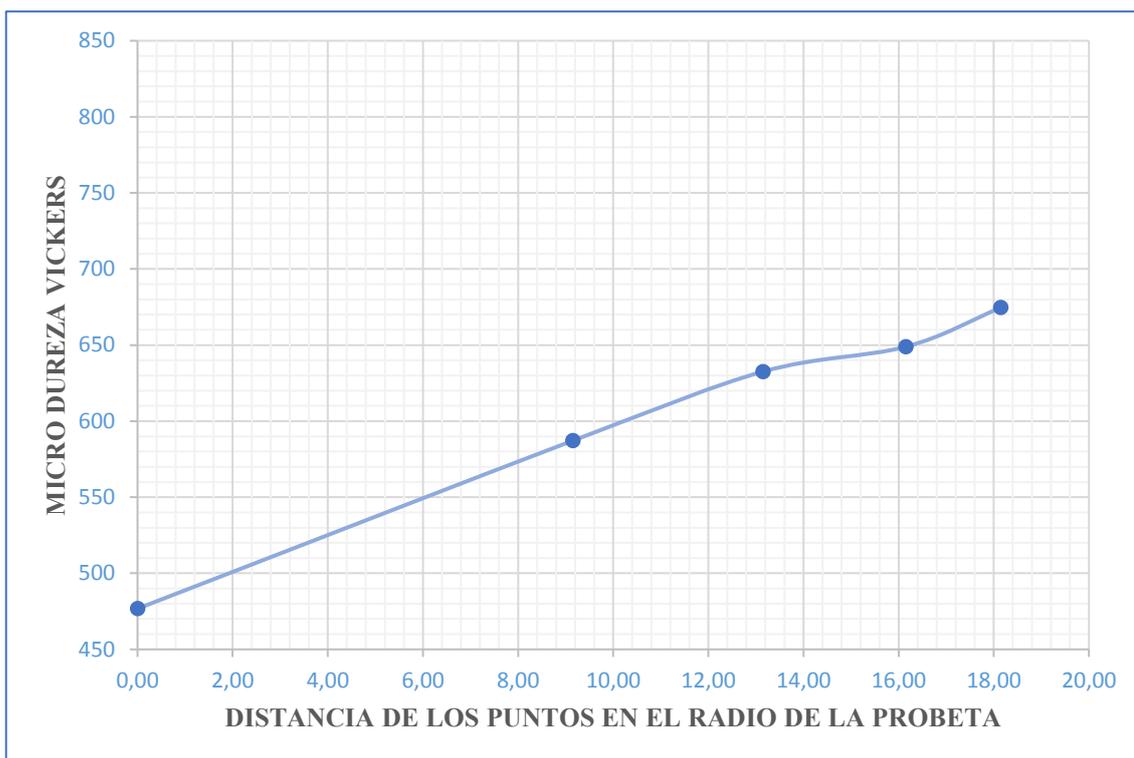


Gráfico 6-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 10,77 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 7-3: Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 16,82 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	47,00	44,50	0,0902	0,0854	0,0878	472
9,15	38,00	37,00	0,073	0,0710	0,0720	702
13,15	36,50	35,00	0,0701	0,0672	0,0686	772
16,15	37,00	34,00	0,071	0,0653	0,0682	783
18,15	34,50	35,00	0,0662	0,0672	0,0667	817

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

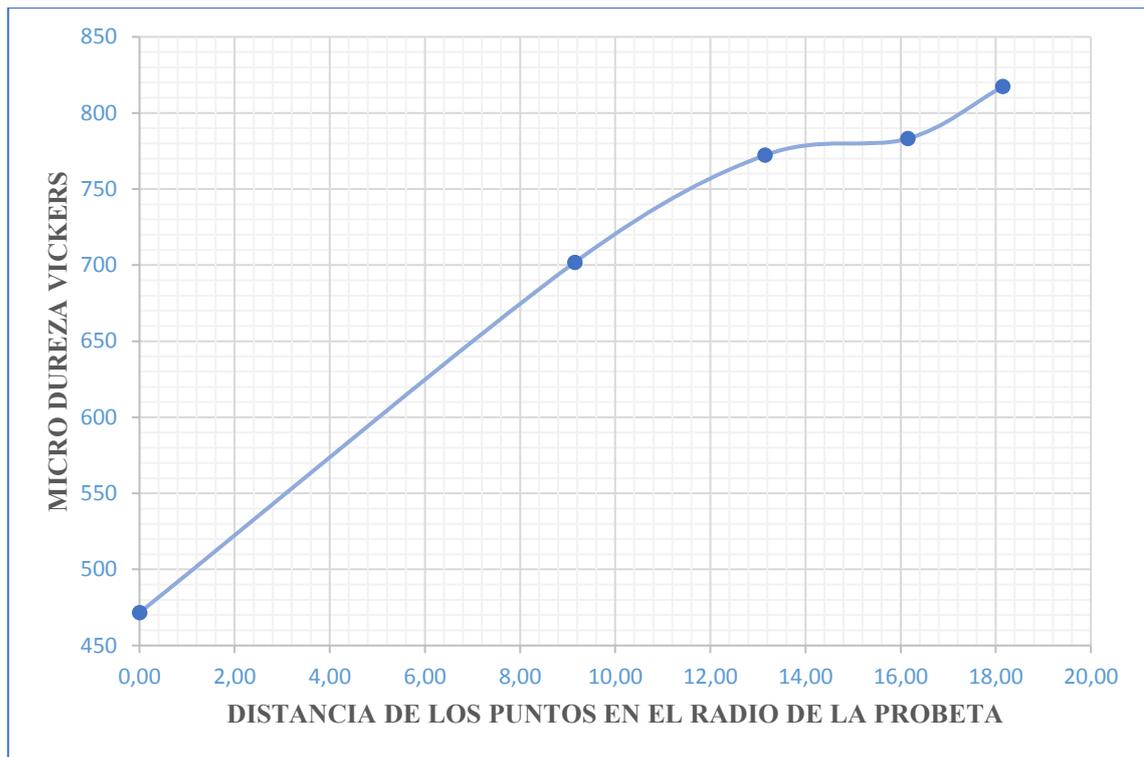


Gráfico 7-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 16,82 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

3.5. Ensayo de micro dureza Vickers de la temperatura de carburización T=1203°K.

Tabla 8-3: Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,82 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	45,00	46,00	0,0864	0,0883	0,0874	477
9,15	45,50	44,00	0,0874	0,0845	0,0859	493
13,15	44,00	44,00	0,0845	0,0845	0,0845	510
16,15	44,00	43,50	0,0845	0,0835	0,0840	516
18,15	44,00	42,00	0,0845	0,0806	0,0826	534

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

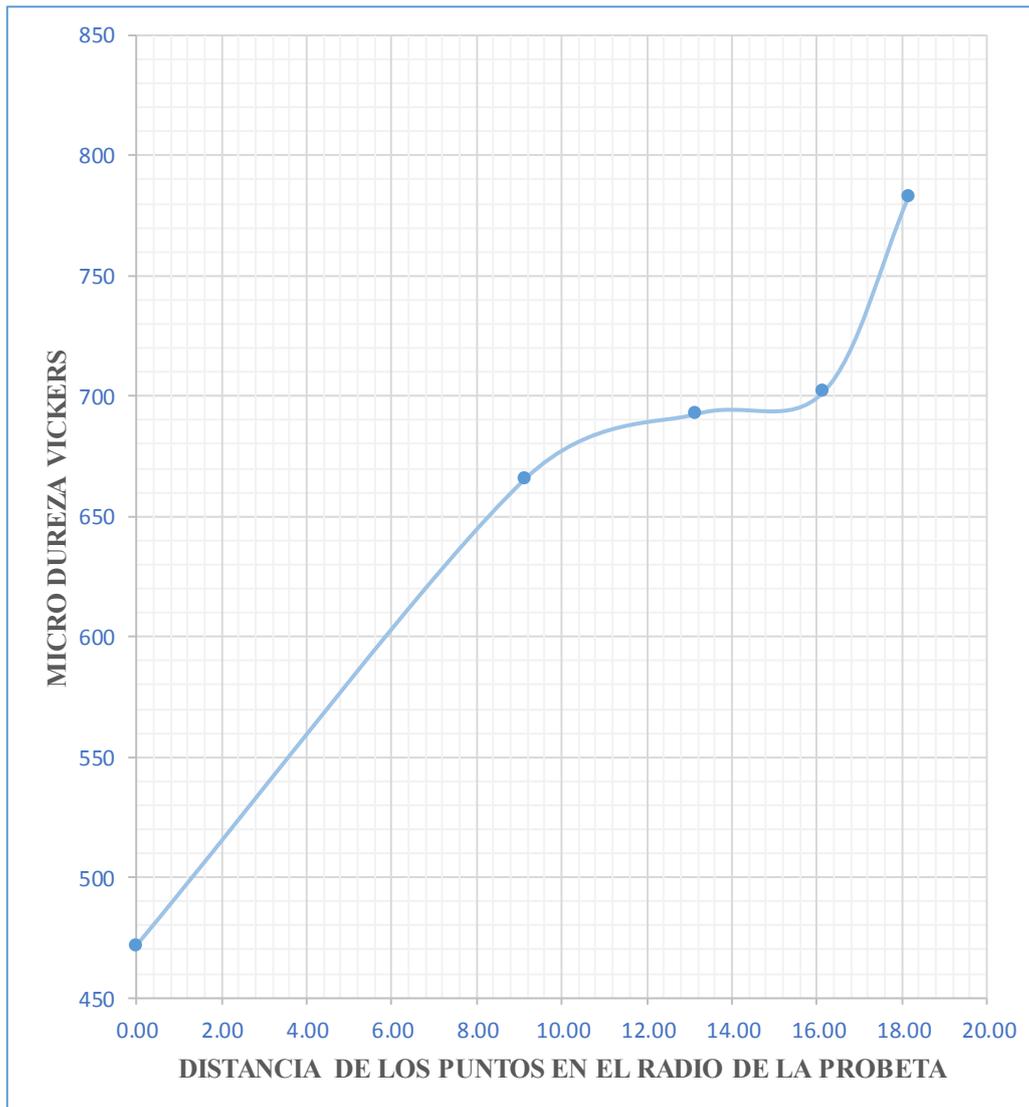


Gráfico 8-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con: %C=0,40%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,82 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 9-3: Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 5,97 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	49,00	42,00	0,0941	0,0806	0,0874	477
9,15	44,00	43,00	0,0845	0,0826	0,0835	522
13,15	43,50	41,00	0,0835	0,0787	0,0811	553
16,15	40,50	40,00	0,0778	0,0768	0,0773	609
18,15	38,00	35,00	0,073	0,0672	0,0701	741

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

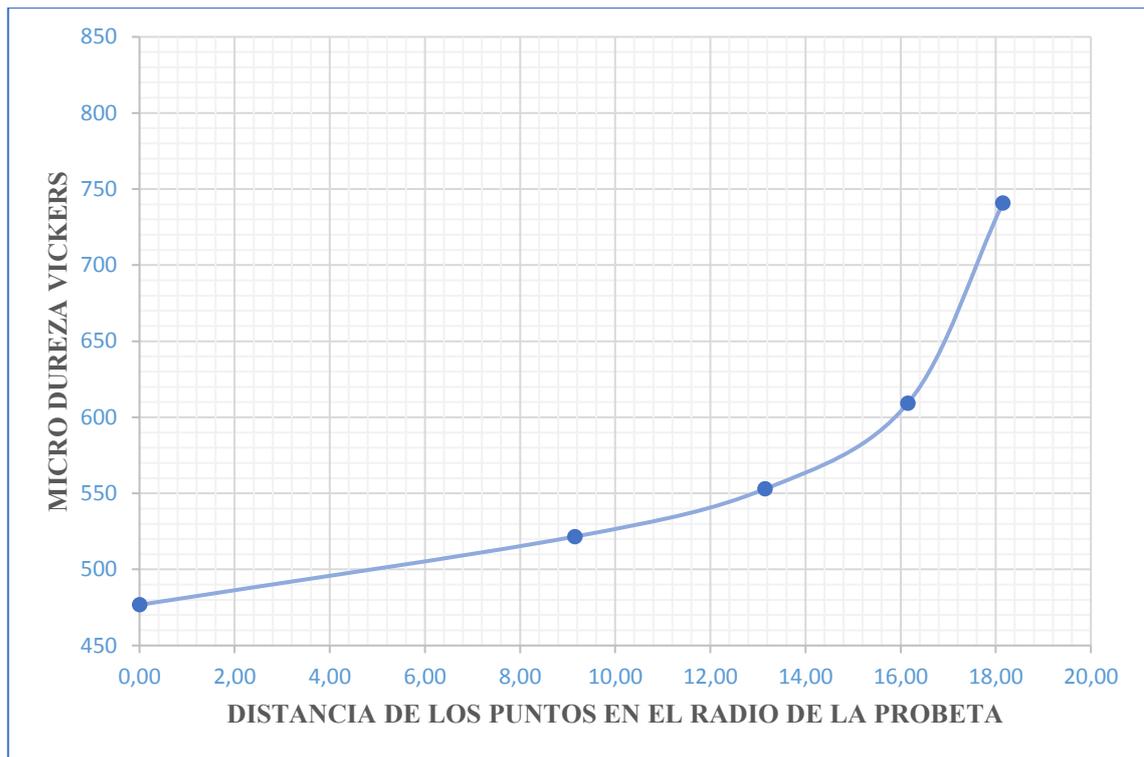


Gráfico 9-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,40%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 5,97 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 10-3: Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 5,69 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	48,00	43,50	0,0922	0,0835	0,0878	472
9,15	49,00	42,00	0,0941	0,0806	0,0874	477
13,15	45,00	45,00	0,0864	0,0864	0,0864	487
16,15	43,00	43,00	0,0826	0,0826	0,0826	534
18,15	42,00	42,00	0,0806	0,0806	0,0806	560

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

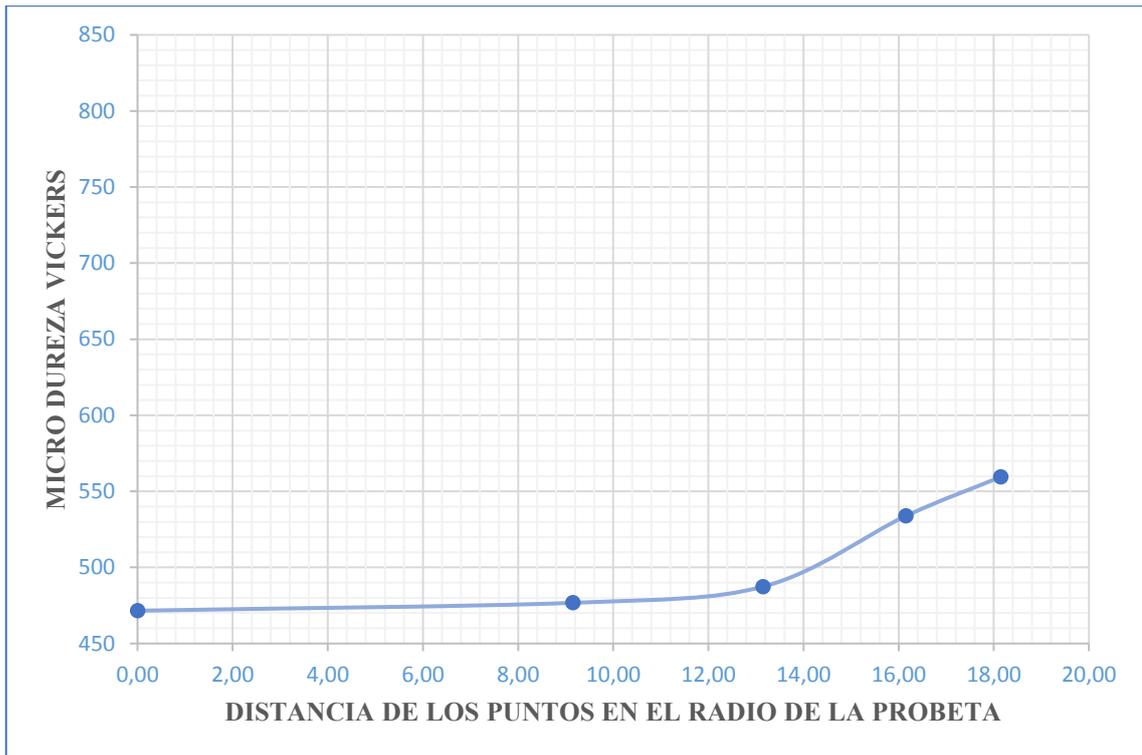


Gráfico 10-3: Micro dureza de la Probeta AISI 1018 carburizada con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 5,69 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 11-3: Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 8,89 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	51,00	40,50	0,0979	0,0778	0,0878	472
9,15	39,00	38,00	0,0749	0,0730	0,0739	666
13,15	39,50	36,00	0,0758	0,0691	0,0725	693
16,15	38,00	37,00	0,073	0,0710	0,0720	702
18,15	35,50	35,50	0,0682	0,0682	0,0682	783

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

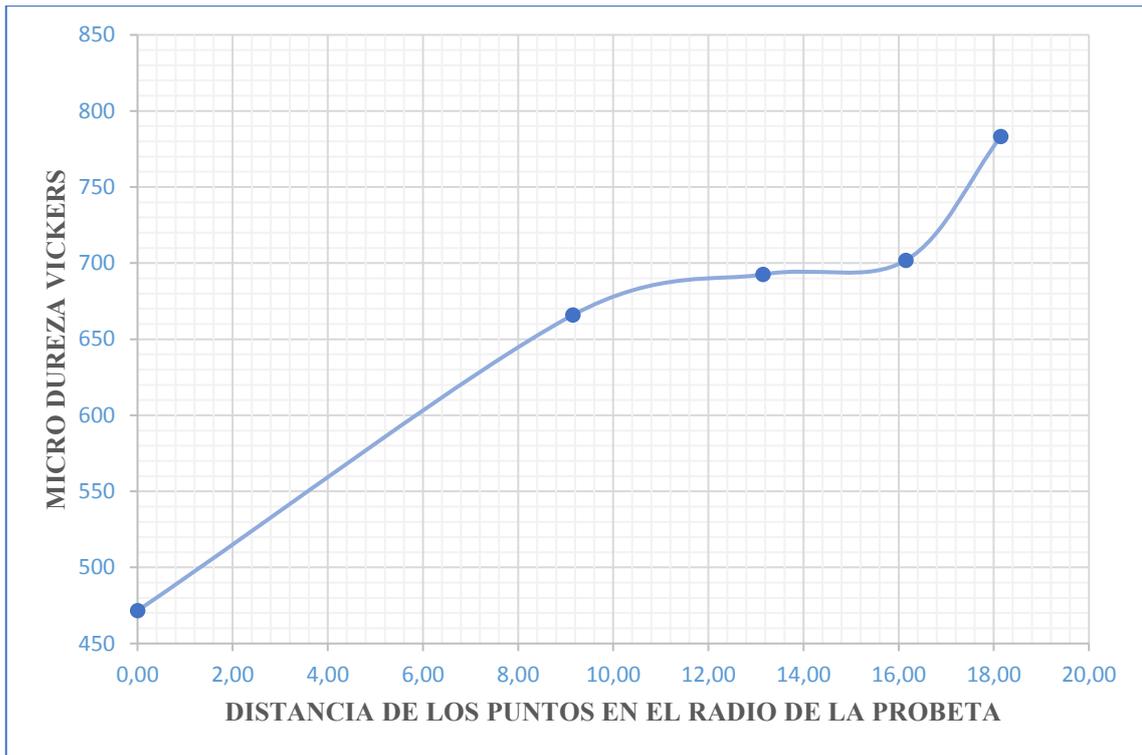


Gráfico 11-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 8,89 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 12-3: Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 8,67 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	45,00	46,50	0,0864	0,0893	0,0878	472
9,15	38,50	39,50	0,0739	0,0758	0,0749	649
13,15	39,00	38,00	0,0749	0,0730	0,0739	666
16,15	37,00	39,00	0,071	0,0749	0,0730	683
18,15	35,00	36,00	0,0672	0,0691	0,0682	783

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

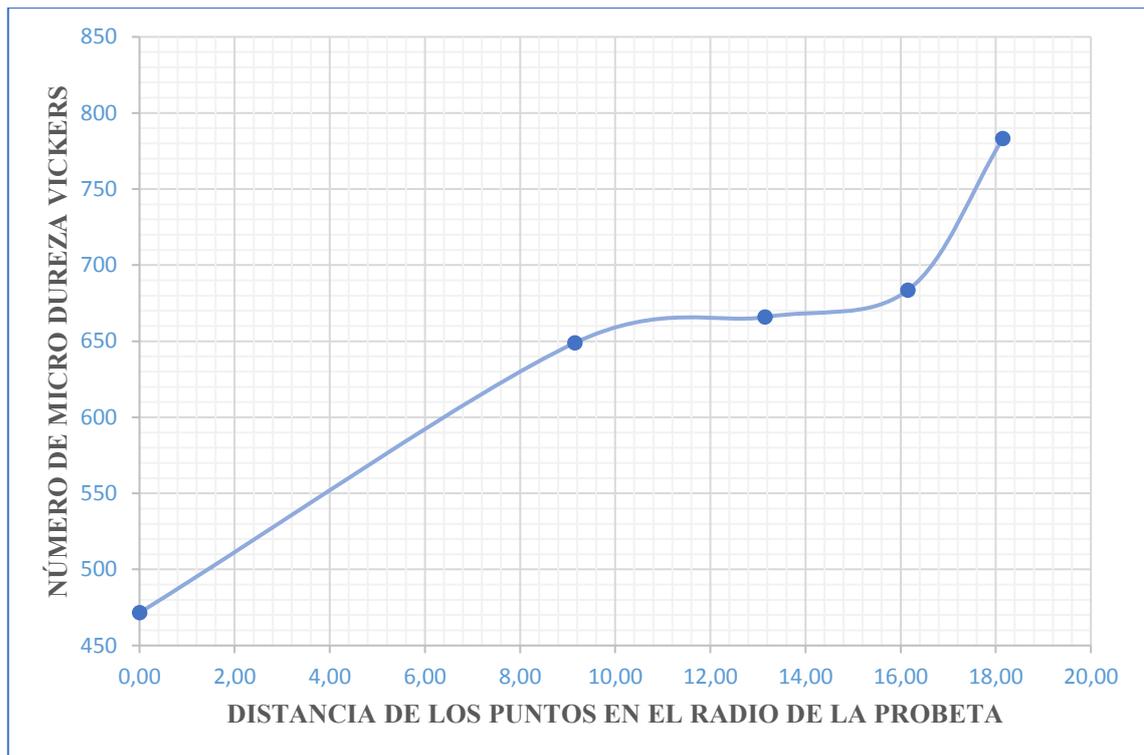


Gráfico 12-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 8,67 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 13-3: Micro dureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 13,54 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	42,00	49,50	0,0806	0,0950	0,0878	472
9,15	40,00	36,00	0,0768	0,0691	0,0730	683
13,15	37,00	35,00	0,071	0,0672	0,0691	762
16,15	36,00	35,00	0,0691	0,0672	0,0682	783
18,15	35,00	35,00	0,0672	0,0672	0,0672	806

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

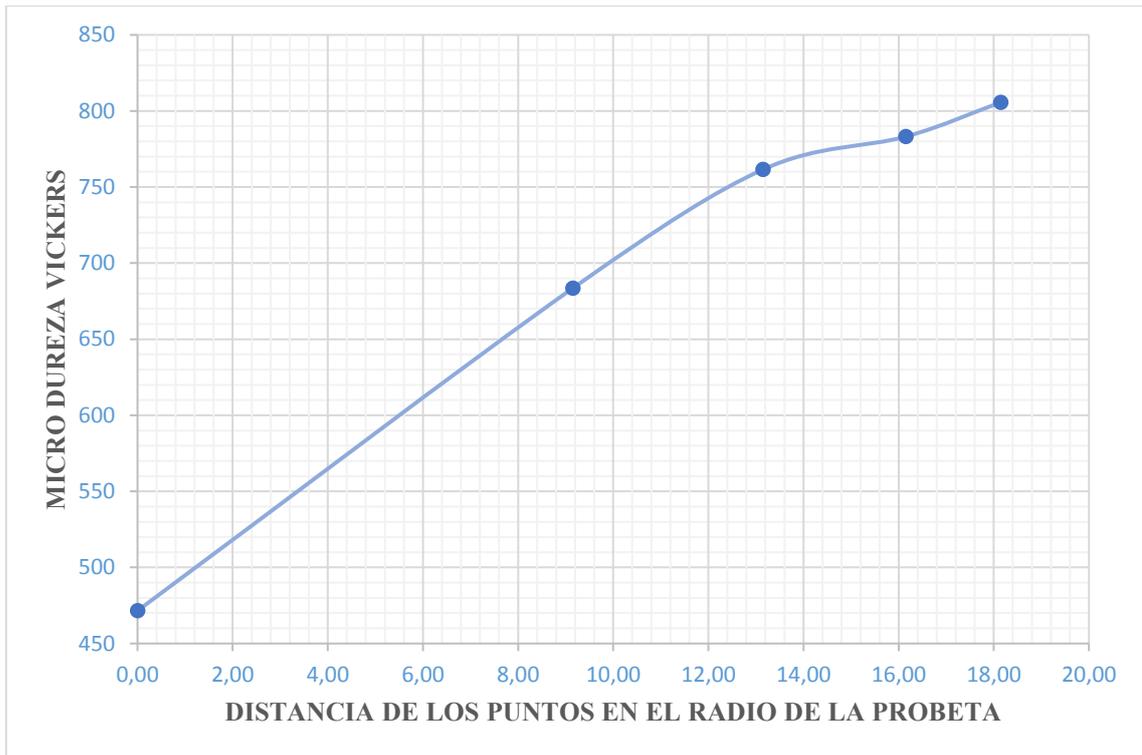


Gráfico 13-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 13,54 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

3.6. Ensayo de micro dureza Vickers de la temperatura de carburización T=1223°K.

Tabla 14-3: Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,05 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	45,00	46,00	0,0864	0,0883	0,0874	477
9,15	44,50	40,50	0,0854	0,0778	0,0816	546
13,15	41,00	41,50	0,0787	0,0797	0,0792	580
16,15	40,50	40,50	0,0778	0,0778	0,0778	602
18,15	40,00	38,00	0,0768	0,0730	0,0749	649

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

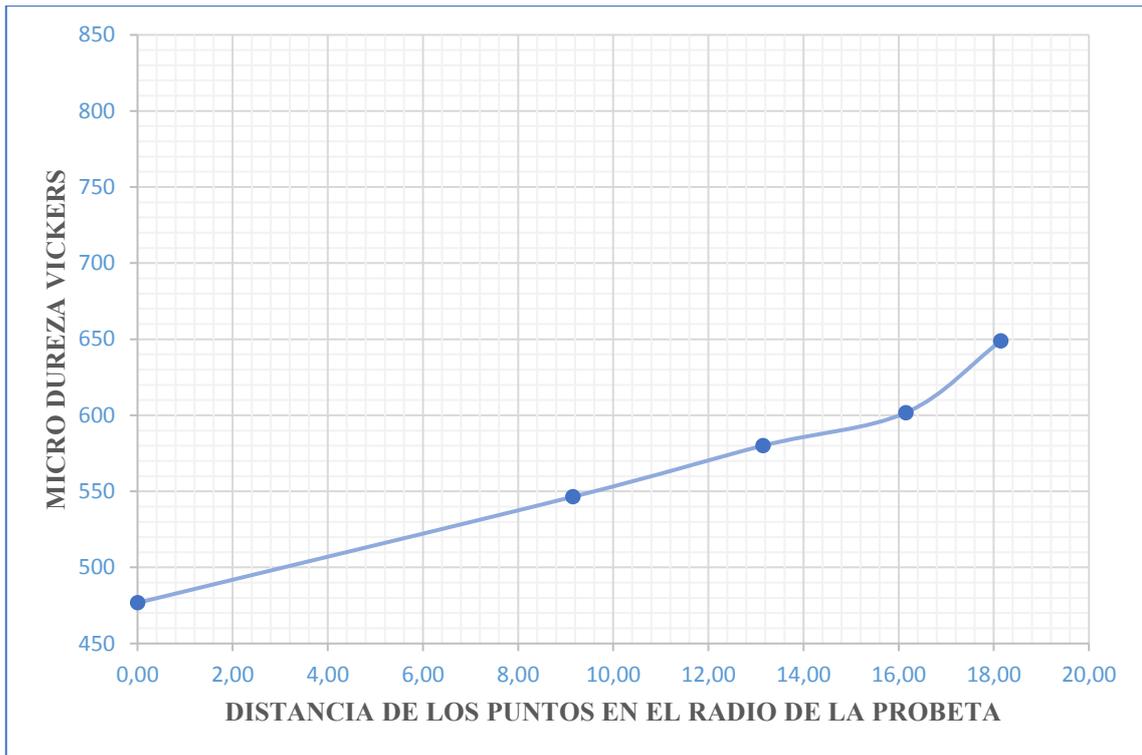


Gráfico 14-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 3,05 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 15-3: Micro dureza Vickers con %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 4,76 horas.

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	40,00	51,00	0,0768	0,0979	0,0874	477
9,15	39,50	39,00	0,0758	0,0749	0,0754	641
13,15	39,00	39,00	0,0749	0,0749	0,0749	649
16,15	39,00	38,00	0,0749	0,0730	0,0739	666
18,15	37,00	38,00	0,071	0,0730	0,0720	702

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

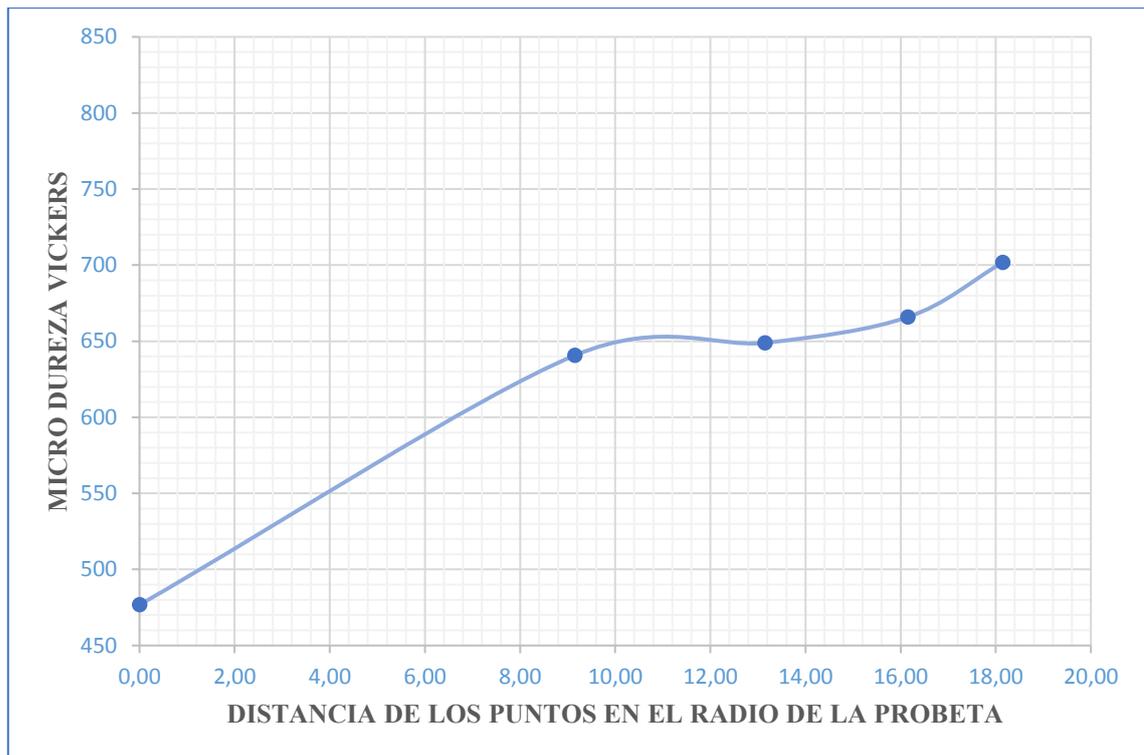


Gráfico 15-3: Curva de Dureza Vickers vs Distancia con condiciones: %C=0,40% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 4,76 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 16-3: Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,64 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	42,00	49,50	0,0806	0,0950	0,0878	472
9,15	40,00	42,50	0,0768	0,0816	0,0792	580
13,15	39,50	38,50	0,0758	0,0739	0,0749	649
16,15	40,00	37,50	0,0768	0,0720	0,0744	657
18,15	41,00	35,50	0,0787	0,0682	0,0734	675

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

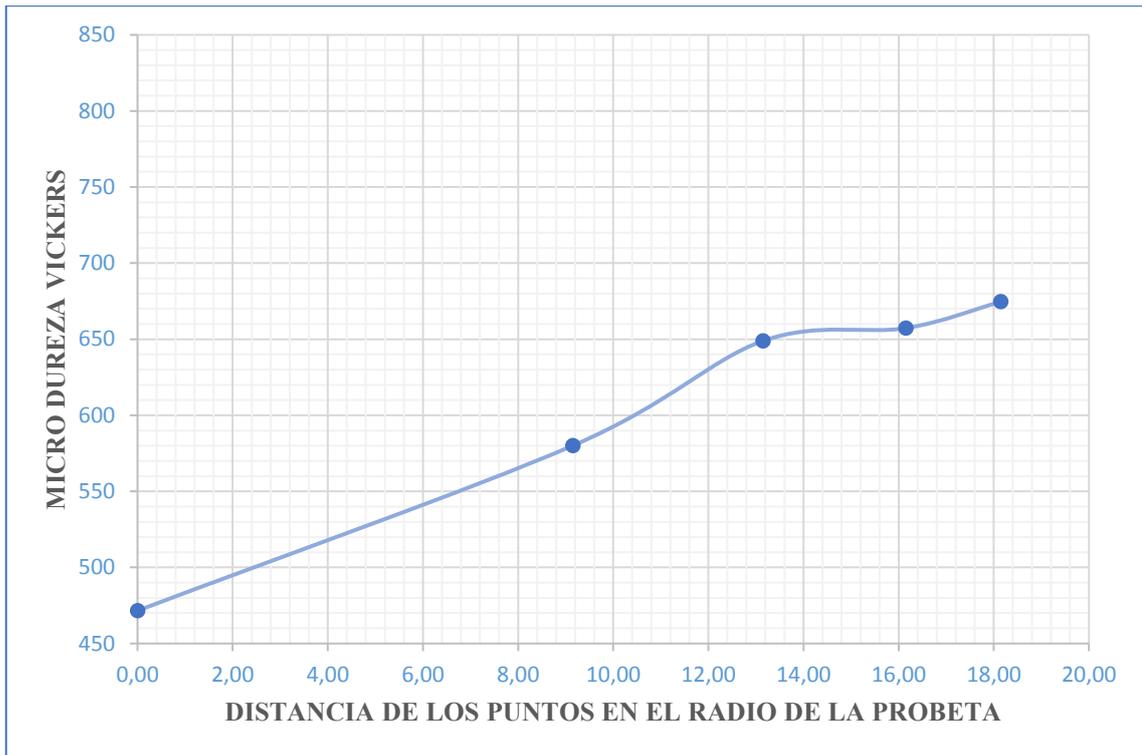


Gráfico 16-3: Micro durezas de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,50%, una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 4,64 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

Tabla 17-3: Micro dureza Vickers con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,24 horas

	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _m (mm)	HV (Kg/mm ²)
0,00	42,00	49,00	0,0806	0,0941	0,0874	477
9,15	40,00	38,00	0,0768	0,0730	0,0749	649
13,15	38,00	37,50	0,073	0,0720	0,0725	693
16,15	36,50	36,50	0,0701	0,0701	0,0701	741
18,15	35,00	36,50	0,0672	0,0701	0,0686	772

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

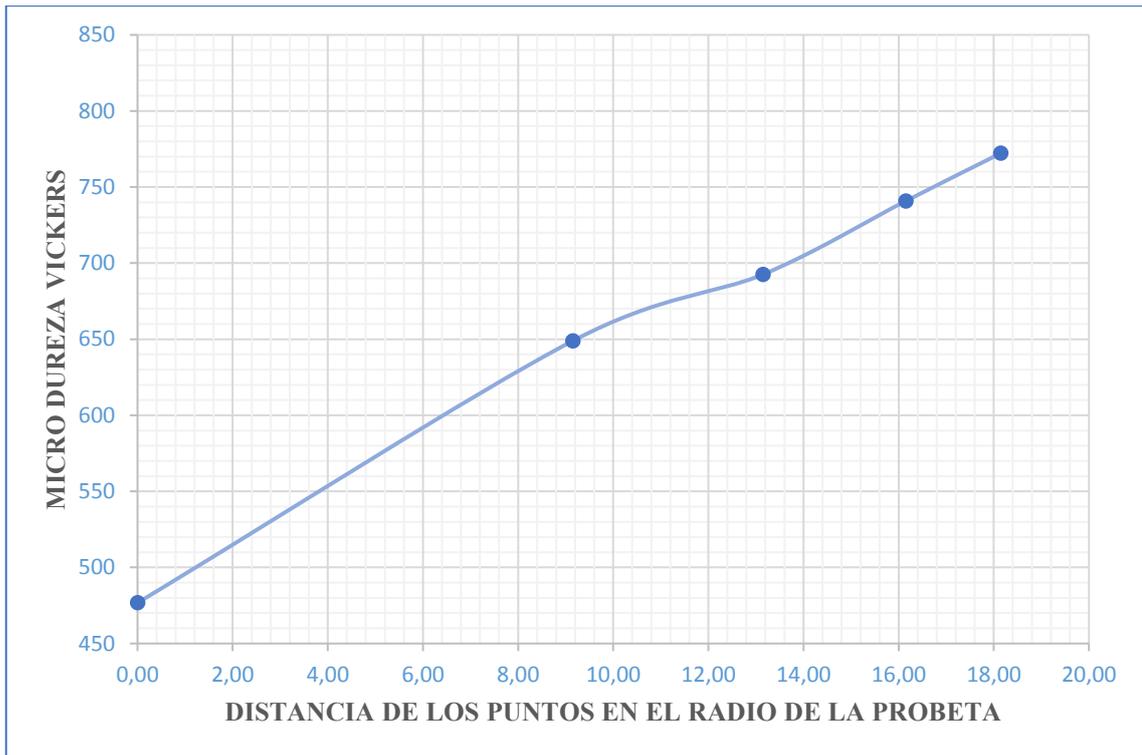


Gráfico 17-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con %C=0,50% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 7,24 horas

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 18-3: Número de microdureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,14 horas.

	D₁ (μm)	D₂ (μm)	D₁ (mm)	D₂ (mm)	D_m (mm)	HV (Kg/mm²)
0,00	47,00	44,50	0,0902	0,0854	0,0878	472
9,15	45,00	37,00	0,0864	0,0710	0,0787	587
13,15	39,50	39,00	0,0758	0,0749	0,0754	641
16,15	38,50	38,00	0,0739	0,0730	0,0734	675
18,15	40,50	34,00	0,0778	0,0653	0,0715	711

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

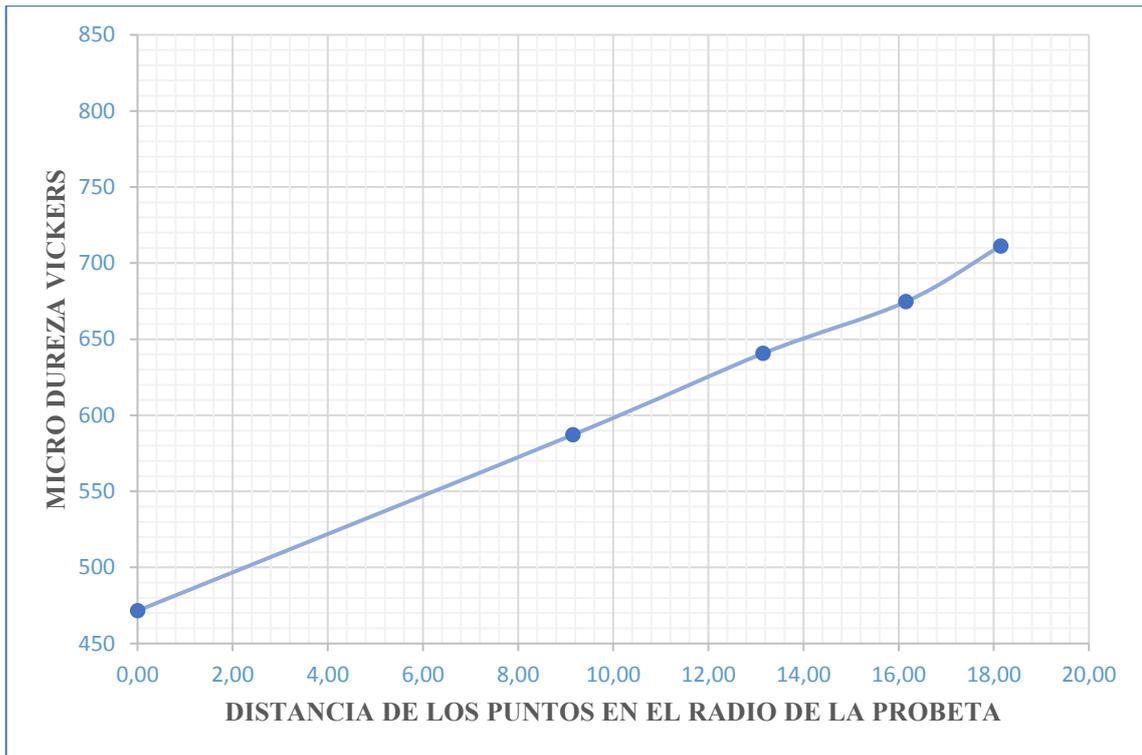


Gráfico 18-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,00 milímetros y un tiempo de 7,14 horas.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 19-3: Número de microdureza Vickers con %C=0,60% y una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,16 horas.

	D₁ (μm)	D₂ (μm)	D₁ (mm)	D₂ (mm)	D_m (mm)	HV (Kg/mm²)
0,00	43,00	48,00	0,0826	0,0922	0,0874	477
9,15	40,00	38,00	0,0768	0,0730	0,0749	649
13,15	37,50	37,00	0,072	0,0710	0,0715	711
16,15	37,00	36,00	0,071	0,0691	0,0701	741
18,15	35,00	35,00	0,0672	0,0672	0,0672	806

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Gráfico 19-3: Micro dureza de la probeta AISI 1018 carburizada con condiciones: %C=0,60%, una capa de profundidad de 1,25 milímetros y un tiempo de 11,16 horas.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 20-3: Micro dureza medida experimentalmente en las probetas sometidas a carburización sólida.

Nº	Temperatura (°K)	Tiempo(h)	HV 1	HV 2
1	1183	4,45	566	580
2	1183	6,95	617	602
3	1183	7,12	602	617
4	1183	11,12	806	783
5	1183	10,72	675	702
6	1183	16,75	817	841
7	1203	3,73	534	546
8	1203	5,83	741	711
9	1203	5,64	560	580
10	1203	8,81	783	762
11	1203	8,50	783	751
12	1203	13,27	806	829
13	1223	2,98	649	675
14	1223	4,66	702	721
15	1223	4,50	675	693
16	1223	7,04	772	751
17	1223	6,78	711	693
18	1223	10,60	806	829

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Las gráficas de micro dureza superficial de las probetas sometidas a la carburización sólida en las Figuras 22-3 y 23-3 ilustran cada tratamiento efectuado. Se observa la variación de la micro dureza superficial entre cada tratamiento dando a notar la influencia de los diferentes factores con sus respectivos niveles sobre la variable respuesta, micro dureza Vickers.

En la Gráfico 20-3 se obtuvo la mayor micro dureza en la probeta 6 de 817 HV, cuyo tratamiento es de una temperatura de 1183°K y un tiempo de 16,75 horas, y un punto mínimo en la probeta 7 de 534 HV, cuyo tratamiento es de una temperatura de 1203°K y un tiempo de 3,73 horas. En el Gráfico 21-3 se obtuvo la mayor micro dureza en la probeta 6 de 841 HV, y un punto mínimo en la probeta 7 de 546 HV.

En este contexto, las mayores micro durezas superficiales se obtienen a mayores temperatura y tiempo de carburización y las menores micro durezas superficiales de lo contrario.

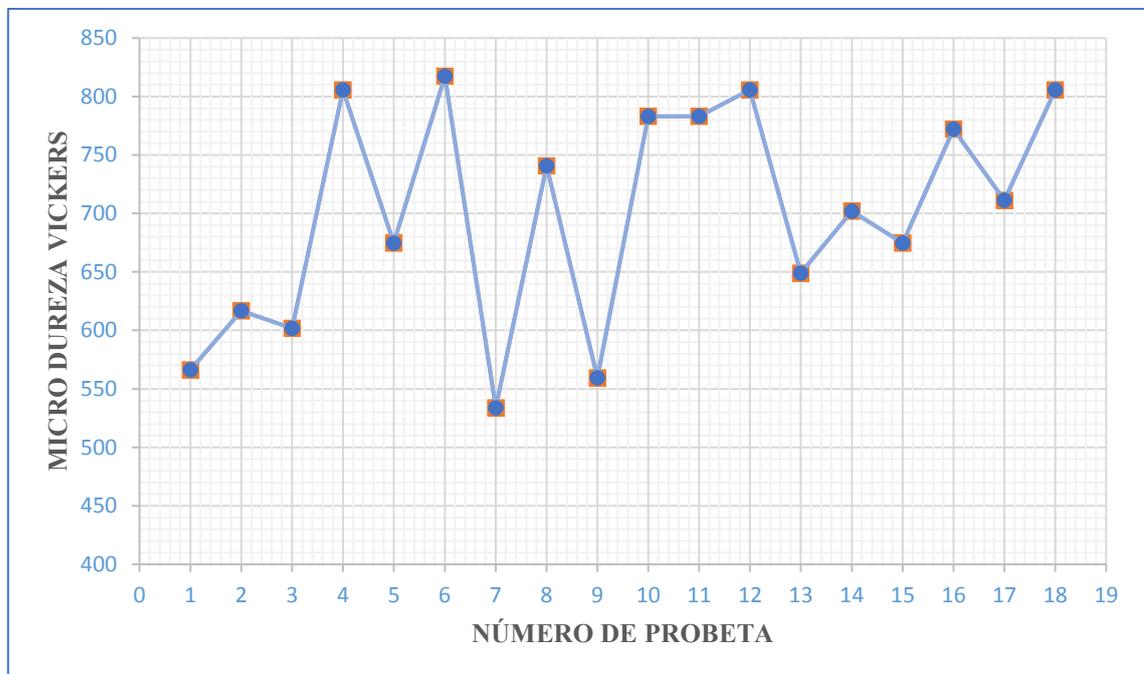


Gráfico 20-3: Micro dureza superficial HV 1 de las probetas posterior a una carburización sólida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Gráfico 21-3: Micro dureza superficial HV 2 de las probetas posterior a una carburización sólida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

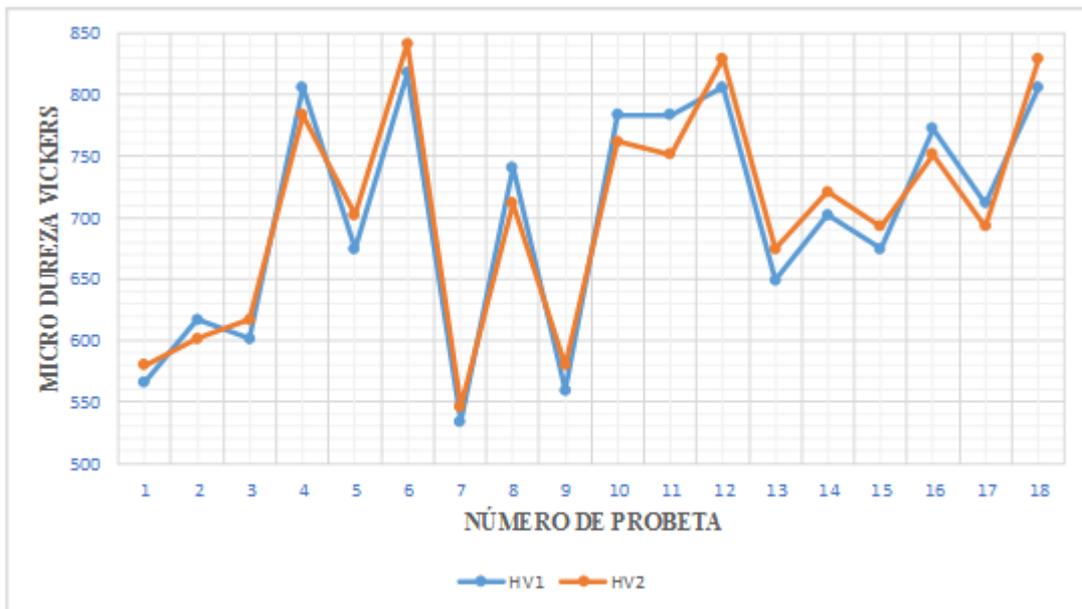


Gráfico 22-3: Relación de micro dureza superficial HV 1 y HV 2 de las probetas posterior a una carburización sólida

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 21-3: Micro dureza medida experimentalmente en las probetas sometidas a carburización líquida.

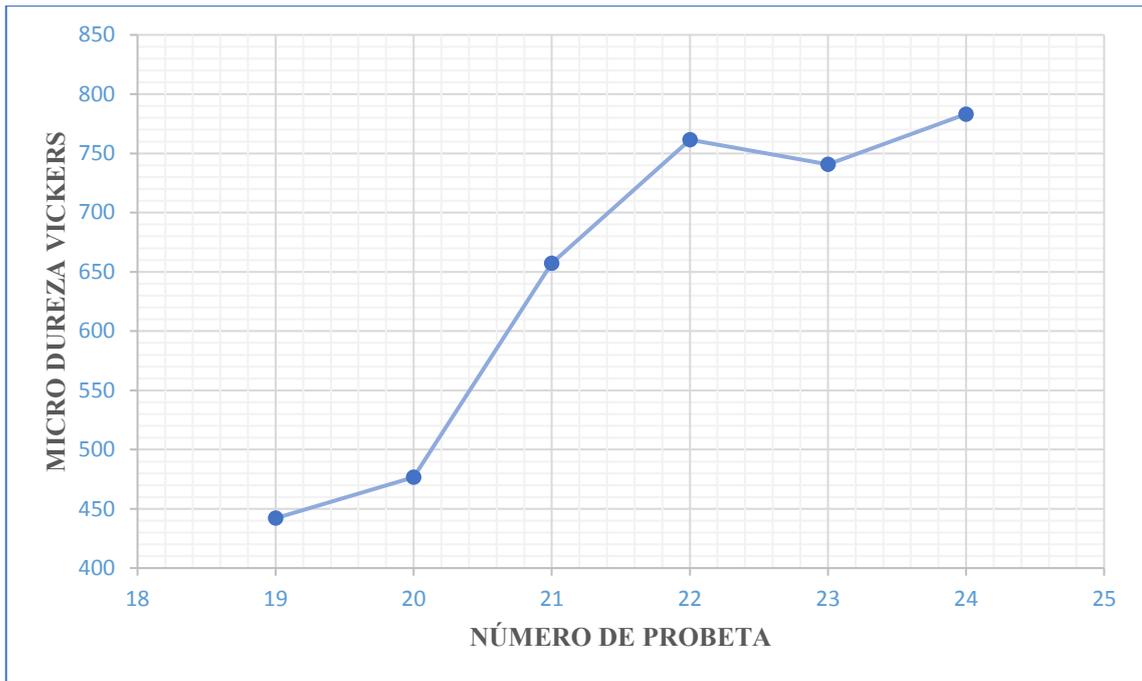
N°	TEMPERATURA (°K)	TIEMPO (h)	HV 1	HV 2
19	1183	3,02	442	566
20	1183	4,71	477	731
21	1203	2,48	657	649
22	1203	3,88	762	772
23	1223	2,07	741	731
24	1223	3,24	783	772

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Las gráficas de micro dureza superficial de las probetas sometidas a la carburización líquida en las Figuras 24-3 y 25-3 ilustran cada tratamiento efectuado. Se observa la variación de la micro dureza superficial entre cada tratamiento dando a notar la influencia de los diferentes factores con sus respectivos niveles sobre la variable respuesta, micro dureza Vickers.

En la Figura 24-3 se obtuvo la mayor micro dureza en la probeta 24 de 783 HV, cuyo tratamiento es de una temperatura de 1223°K y un tiempo de 3,24 horas y un punto mínimo en la probeta 19 de 442 HV, cuyo tratamiento es de una temperatura de 1183°K y un tiempo de 3,02 horas. En la Figura 25-3 se obtuvo la mayor micro dureza en las probetas 22 y 24 de 772 HV, cuyo tratamiento de la primera es de una temperatura de 1203°K y un tiempo de 3,88 horas y un punto mínimo en la probeta 19 de 566 HV.

En este contexto, las mayores micro durezas superficiales se obtienen a mayores temperatura y tiempo de carburización y las menores micro durezas superficiales de lo contrario.



Gráfica 23-3: Micro dureza superficial HV 1 de las probetas posterior a una carburización líquida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

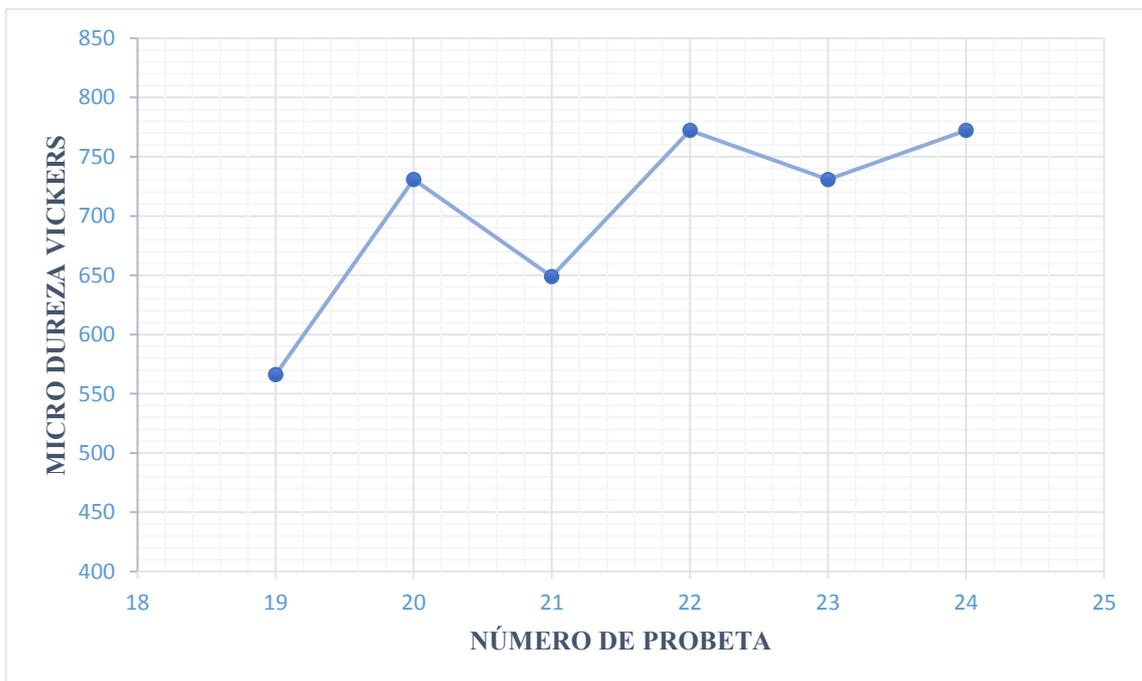


Gráfico 24-3: Micro dureza superficial HV 2 de las probetas posterior a una carburización líquida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

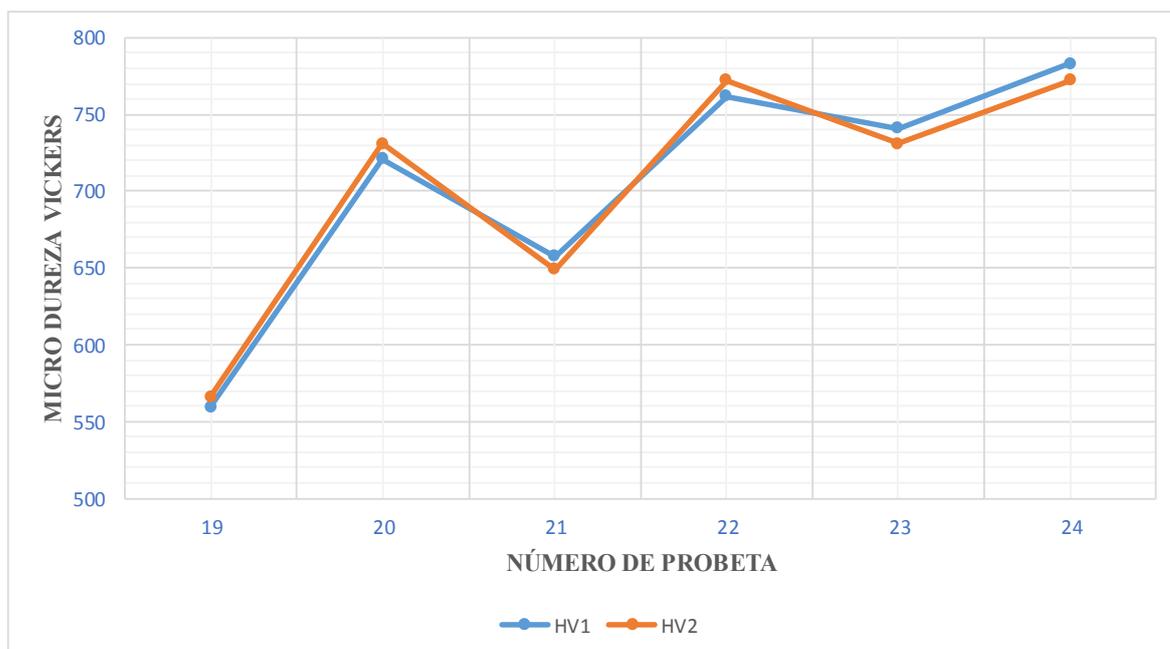


Gráfico 25-3: Relación de Micro dureza superficial HV 1 Y HV 2 de las probetas posterior a una carburización líquida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

3.7. Diseño experimental

Carburización sólida

Factores

A: Temperatura (°K)

B: Concentración de carburización C_x (%).

C: Profundidad de capa carburizada x (mm).

Tabla 22-3: Factores y niveles del diseño experimental de la carburización sólida.

Nº	TEMPERATURA (°K)	C_x (%)	x (mm)	HV1	HV2
1	1183	0,40	1,00	566	580
2	1183	0,40	1,25	617	602
3	1183	0,50	1,00	602	617
4	1183	0,50	1,25	806	783
5	1183	0,60	1,00	675	702
6	1183	0,60	1,25	817	841
7	1203	0,40	1,00	534	546
8	1203	0,40	1,25	741	711

9	1203	0,50	1,00	560	580
10	1203	0,50	1,25	783	762
11	1203	0,60	1,00	783	751
12	1203	0,60	1,25	806	829
13	1223	0,40	1,00	649	675
14	1223	0,40	1,25	702	721
15	1223	0,50	1,00	675	693
16	1223	0,50	1,25	772	751
17	1223	0,60	1,00	711	693
18	1223	0,60	1,25	806	829

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 23-3: Diseño experimental mixto de carburización sólida.

TEMPERATURA (A)	CONCENTRACIÓN DE LA CARBURIZACIÓN (B)											
	0,4				0,5				0,6			
	PROFUNDIDAD DE CAPA CARBURIZADA (C)											
	1,00			1,25			1,00			1,25		
1183	566	580	617	602	602	617	806	783	675	702	817	841
1203	534	546	741	711	560	580	783	762	783	751	806	829
1223	649	675	702	721	675	693	772	751	711	693	806	829

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 24-3: Parámetros del diseño experimental.

Niveles del factor A	a	3
Niveles del factor A	b	3
Niveles del factor A	c	2
Número de repeticiones	n	2
Tamaño de la población	N	36

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 26-3: Datos para la sumatoria de cuadrados del factor A.

TEMPERATURA (A)	CONCENTRACIÓN DE LA CARBURIZACIÓN (B)												Y _{i..}	Y ² _{i..}	
	0,4				0,5				0,6						
	PROFUNDIDAD DE CAPA CARBURIZADA (C)														
	1,00			1,25			1,00			1,25					
1183	566	580	617	602	602	617	806	783	675	702	817	841	8207	67359900	
1203	534	546	741	711	560	580	783	762	783	751	806	829	8386	70319024	
1223	649	675	702	721	675	693	772	751	711	693	806	829	8675	75263770	
													Y _{...}	25268	212942694
													ΣY ² _{ijk}	18029204	

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 27-3: Datos de la interacción entre los factores A y B.

AxB	B
-----	---

A	0,4	0,5	0,6
1183	2365	2807	3035
1203	2532	2684	3169
1223	2746	2890	3039
Y.j.	7643	8382	9243
		$\Sigma Y^2_{.j.}$	214112850
		$\Sigma Y^2_{ij.}$	71477246

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 28-3: Datos de la interacción entre los factores A y C.

AxC	C	
A	1,00	1,25
1183	3741	4466
1203	3754	4632
1223	4094	4581
Y..k	11591	13680
	$\Sigma Y^2_{..k}$	321485956
	$\Sigma Y^2_{i.k}$	107237570

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 29-3: Datos de la interacción entre los factores B y C.

BxC	C	
B	1,00	1,25
0,4	3550	4093
0,5	3725	4657
0,6	4315	4928
	ΣY^2_{jk}	107826505

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Fórmulas para el cálculo de la sumatoria de cuadrados

Sumatoria de cuadrados total:

$$SCT = \sum Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (24)$$

Sumatoria de cuadrados del factor A:

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bcn} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (25)$$

Sumatoria de cuadrados del factor B:

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{acn} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (26)$$

Sumatoria de cuadrados del factor C:

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y_{..k}^2}{abn} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (27)$$

Sumatoria de cuadrados de la interacción entre los factores A y B:

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{cn} - \frac{Y_{..}^2}{N} - SC_A - SC_B \quad (28)$$

Sumatoria de cuadrados de la interacción entre los factores A y C:

$$SC_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y_{i,k}^2}{bn} - \frac{Y_{..}^2}{N} - SC_A - SC_C \quad (29)$$

Sumatoria de cuadrados de la interacción entre los factores B y C:

$$SC_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{j,k}^2}{an} - \frac{Y_{..}^2}{N} - SC_B - SC_C \quad (30)$$

Sumatoria de cuadrados de la interacción entre los factores A, B y C:

$$SC_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{ijk}^2}{n} - \frac{Y_{..}^2}{N} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC} \quad (31)$$

Sumatoria de cuadrados del error:

$$SC_E = SCT - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC} - SC_{ABC} \quad (32)$$

Tabla 30-3: Factor de corrección y sumatoria de cuadrados.

FC	17735920
SC _T	293284
SC _A	9305
SC _B	106818
SC _C	124411
SC _{AB}	17269
SC _{AC}	3292
SC _{BC}	3935
SC _{ABC}	23914
SC _E	4339

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Los grados de libertad responden a las siguientes ecuaciones:

$$GL_A = a - 1 \quad (33)$$

$$GL_B = b - 1 \quad (34)$$

$$GL_C = c - 1 \quad (35)$$

$$GL_{AB} = (a - 1)(b - 1) \quad (36)$$

$$GL_{AC} = (a - 1)(c - 1) \quad (37)$$

$$GL_{BC} = (b - 1)(c - 1) \quad (38)$$

$$GL_{ABC} = (a - 1)(b - 1)(c - 1) \quad (39)$$

$$GL_T = N - 1 \quad (40)$$

$$GL_E = GL_T - GL_A - GL_B - GL_C - GL_{AB} - GL_{AC} - GL_{BC} - GL_{ABC} \quad (41)$$

La fórmula del valor crítico Fo es:

$$F_o = \frac{CM}{GL_E}$$

Tabla 31-3: Análisis ANOVA del diseño experimental de carburización sólida.

FV	SC	GL	CM	Fo	F(α;GL;GLE)	SIGNIFICANCIA
A	9305	2	4652,47	19,30	3,55	SÍ
B	106818	2	53408,97	221,54	3,55	SÍ
C	124411	1	124411,35	516,06	4,41	SÍ
AB	17269	4	4317,26	17,91	2,93	SÍ
AC	3292	2	1646,24	6,83	3,55	SÍ
BC	3935	2	1967,65	8,16	3,55	SÍ
ABC	23914	4	5978,39	24,80	2,93	SÍ
E	4339	18	241,08			
TOTAL	293284	35	8379,54			

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

El coeficiente de variabilidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{CM_T - CM_E}{CM_T}$$

Tabla 32-3: Coeficiente de variabilidad

Coeficiente de
variabilidad 97,12%

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

DIAGRAMA DE DIFERENCIA MÍNIMA SIGNIFICATIVA (LSD)

La ecuación del valor LSD_{AB} es:

$$LSD_{AB} = t_{\alpha/2} * \sqrt{\frac{CM_E}{n}}$$

Tabla 33-3: Estadístico de prueba y LSD

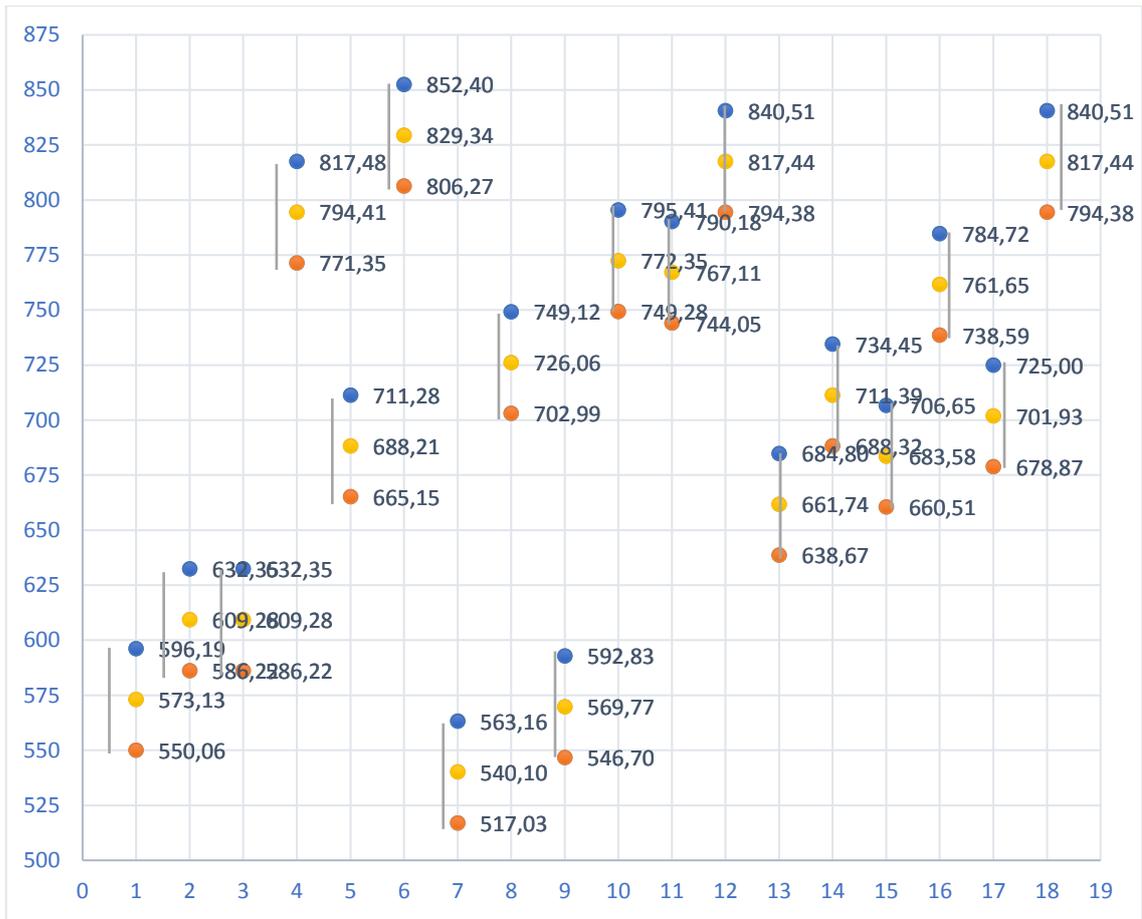
$t_{(\alpha/2;GLE)}$	2,10
LSD _{AB}	23,07

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 34-3: Límites inferior y superior y promedio de los factores A, B y C.

A	B	C	U _{ABC}	PROMEDIO _{ABC}	LSD _{ABC}
1183	0,4	1,00	550,06	573,13	596,19
		1,25	586,22	609,28	632,35
	0,5	1,00	586,22	609,28	632,35
		1,25	771,35	794,41	817,48
	0,6	1,00	665,15	688,21	711,28
		1,25	806,27	829,34	852,40
1203	0,4	1,00	517,03	540,10	563,16
		1,25	702,99	726,06	749,12
	0,5	1,00	546,70	569,77	592,83
		1,25	749,28	772,35	795,41
	0,6	1,00	744,05	767,11	790,18
		1,25	794,38	817,44	840,51
1223	0,4	1,00	638,67	661,74	684,80
		1,25	688,32	711,39	734,45
	0,5	1,00	660,51	683,58	706,65
		1,25	738,59	761,65	784,72
	0,6	1,00	678,87	701,93	725,00
		1,25	794,38	817,44	840,51

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.



Gráfica 26-3: Diagrama LSD de la carburización sólida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021

CARBURIZACIÓN LÍQUIDA

Factores

A: Temperatura (°K)

B: Profundidad de capa carburizada x (mm).

Tabla 35-3: Factores y niveles del diseño experimental de la carburización líquida.

N°	TEMPERATURA (°K)	x (mm)	HV1	HV2
19	1183	1,00	560	566
20	1183	1,25	721	731
21	1203	1,00	657	649
22	1203	1,25	762	772
23	1223	1,00	741	731
24	1223	1,25	783	772

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 36-3: Diseño experimental mixto de la carburización líquida.

TEMPERATURA (A)	PROFUNDIDAD DE CAPA (B)		Y _i	Y ² _i
	1,000	1,25		
1183	560	566	721	731
1203	657	649	762	772
1223	741	731	783	772

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 37-3: Datos para la sumatoria de cuadrados del factor A.

TEMPERATURA (A)	PROFUNDIDAD DE CAPA (B)		Y _i	Y ² _i	
	1,00	1,25			
1183	560	566	721	731	
1203	657	649	762	772	
1223	741	731	783	772	
			Y ² _{ijk}	6009328,4	23871131

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 38-3: Datos para la sumatoria de cuadrados del factor B.

TEMPERATURA (A)	PROFUNDIDAD DE CAPA (B)		Y _k	Y ² _k
	1,00	1,25		
1183	560	721	1280	1639520
1183	566	731	1297	1682209
1203	657	762	1419	2013088
1203	649	772	1421	2019587
1223	741	783	1524	2322483
1223	731	772	1503	2259039
Y _j	3905	4542	8444	11935925

Y^2_j	15245144	20630841	35875985
---------	----------	----------	----------

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 39-3: Datos de la interacción entre los factores A y B.

TEMPERATURA (A)	PROFUNDIDAD DE CAPA (B)		
	1,00	1,25	
1183	1126	1452	
1203	1306	1534	
1223	1472	1555	
		Y^2_{ijk}	12018110

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 40-3: Parámetros del diseño experimental de la carburización líquida.

Niveles del factor A	a	3
Niveles del factor B	b	2
Número de repeticiones	n	2
Tamaño de población	N	12

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 41-3: Factor de corrección y sumatoria de cuadrados.

Factor de corrección	
FC	5942284,34
Sumatoria de cuadrados totales	
SC _T	67044,02
Sumatoria de cuadrados del factor A	
SC _A	25498,47
Sumatoria de cuadrados del factor B	
SC _B	37046,51
Sumatoria de cuadrados interacción AxB	
SC _{AB}	4225,60
Sumatoria de cuadrados del error aleatorio	
SC _E	273,43

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Tabla 42-3: Análisis ANOVA del diseño experimental de carburización líquida.

FV	SC	GL	CM	F _o	F(α;GL;GL _E)	SIGNIFICANCIA
A	25498,47	2	12749,23	279,76	5,14	SÍ
B	37046,51	1	37046,51	812,93	5,99	SÍ
AxB	4225,60	2	2112,80	46,36	5,14	SÍ
ERROR	273,43	6	45,57			
TOTAL	67044,02	11	51954,12			

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 43-3: Coeficiente de variabilidad.

Coeficiente de variabilidad	
CV	99,91%

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

DIAGRAMA DE DIFERENCIA MÍNIMA SIGNIFICATIVA (LSD)

Tabla 44-3: Estadístico de prueba y LSD.

$t_{(\alpha/2;GL_E)}$	2,45
LSD_{AB}	11,68

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

Tabla 45-3: Límites inferior y superior y promedio de los factores A y B.

A	B	U _{AB}	PROMEDIO _{AB}	LSD _{AB}
1183	1,00	551,18	563	574,54
	1,25	714,18	726	737,54
1203	1,00	641,41	653	664,77
	1,25	755,21	767	778,57
1223	1,00	724,12	736	747,48
	1,25	766,01	778	789,37

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

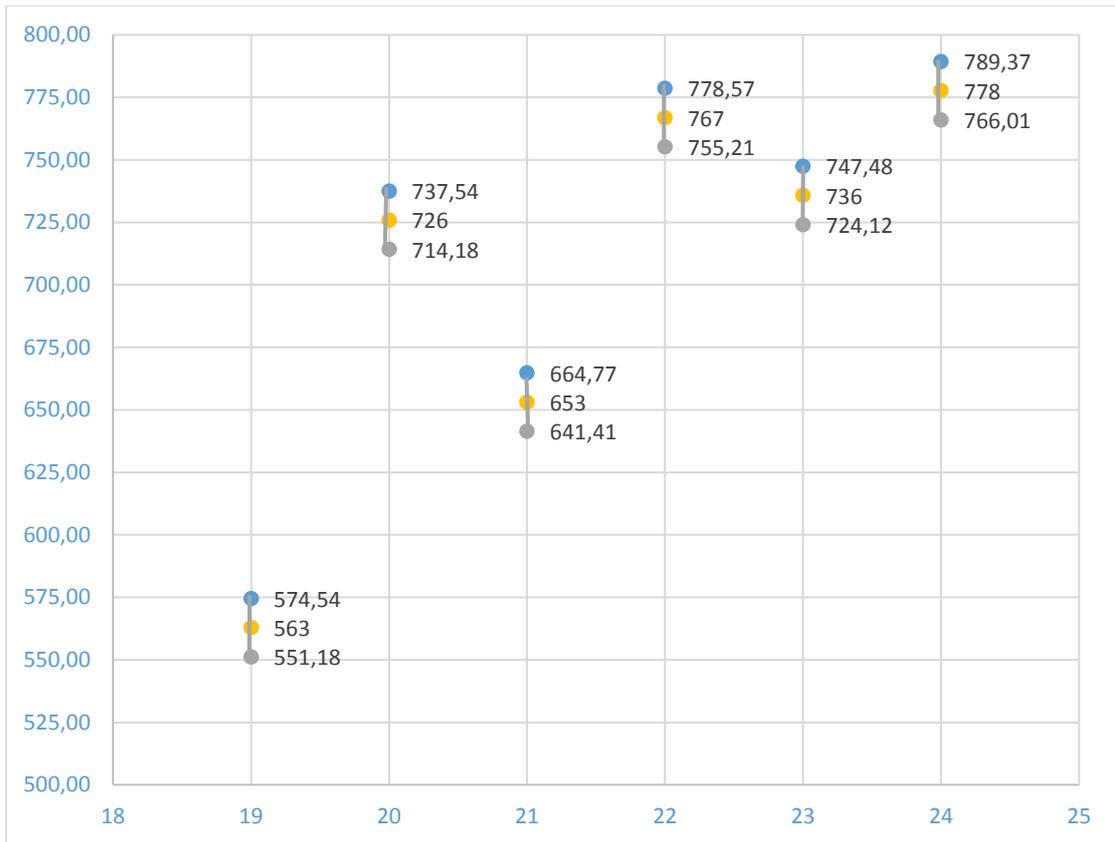


Gráfico 27-3: Diagrama LSD de la carburización líquida.

Realizado por: Ostaiza y Palacios, 2021.

CONCLUSIONES

Los principales tratamientos termoquímicos de carburización son: la carburización sólida y líquida en baño de sales del acero AISI 1018, a pesar de que los dos consisten en incrementar el contenido de carbono de un acero presentan ventajas y desventajas bien definidas. Para que esto suceda se verifica en el diagrama hierro-carbono que las temperaturas a las que se someterán las muestras en el tratamiento sobrepasen la temperatura de austenización. Luego se aplican dos tratamientos térmicos: el temple para aliviar tensiones generadas en la carburización a una temperatura A_3 del diagrama hierro-carbono más $50\text{ }^\circ\text{C}$, seguido de un revenido para la generación de martensita, siendo esta la forma más dura del carbono se puede trabajar con temperaturas establecidas en fichas técnicas según el fabricante del acero.

El proceso de carburización por empaquetamiento o sólida consiste en colocar la muestra de acero AISI 1018 con una mezcla compuesta del 80% de coque y un 20% de activador, este último se escoge de acuerdo con el número de piezas a carburizar. Para esta investigación se utilizó el carbonato de calcio en un recipiente herméticamente sellado y este fue colocado en un horno de tratamientos a la temperatura de carburización escogida y el tiempo de carburización calculado según la ley de Fick. Los parámetros necesarios para el cálculo del tiempo de carburización comprenden: solubilidad en la superficie del acero AISI 1018 $C_s=1,2\%$, concentración de carbono inicial $C_0=0,18\%$, concentración de carbono al que se requiere llegar $C_{x_1}=0,40\%$, $C_{x_2}=0,50\%$ y $C_{x_3}=0,60\%$ y profundidad de penetración del carbono $x=1,00\text{mm}$ y $x=1,25\text{mm}$.

El proceso de la carburización líquida en baño de sales es la sumersión de la muestra en un baño de cloruro de sodio, cloruro de bario, cloruro de sodio y carbonato de sodio en los porcentajes de 20%, 30%, 25% y 25%, respectivamente. Donde los cloruros de bario y de sodio actúan como activadores. Mediante la ecuación (10) se calculó el tiempo de carburización líquida, al establecer la relación entre la profundidad de la capa de difusión y la constante de penetración. Sin embargo, la profundidad de capa carburizada se escoge la misma que en la carburización sólida para un análisis estadístico entre ambas. La constante de penetración calculada para cada temperatura es 0,576 pulgadas para una temperatura de 1883°K , 0,635 pulgadas para 1203°K y 0,694 pulgadas, para la última temperatura.

En el análisis de varianza ANOVA de la carburización sólida, los factores de profundidad de la capa carburizada (C) y la concentración de carbono al que se quiere llegar (B) tienen una influencia muy significativa sobre la dureza superficial del acero AISI 1018, mientras que la temperatura (A) es solo significativa en el mismo orden de nivel de significancia. Los factores A, B y C y sus interacciones influyen en el 97,12% de la variación de la variable respuesta, por lo

que el diseño está controlado y es eficiente, es decir, las variables externas generan perturbaciones despreciables. Por otro lado, la gráfica LSD (Figura 26-3) indica una maximización para la dureza superficial en las probetas 4, 6, 12 y 18. Estas tres últimas con los mayores tiempos de carburización de cada temperatura. La probeta N°4 se carburizó a 1183 °K durante 11,12 horas y se obtuvo un promedio de dureza superficial de 794,41 HV; la probeta N°6 se carburizó a 1183 °K durante 16,75 horas y se obtuvo un promedio de dureza superficial de 829,34 HV; la probeta N°12 se carburizó a 1203 °K durante 13,27 horas y se obtuvo un promedio de dureza superficial de 817,44 HV; finalmente, la probeta N°18 se carburizó a 1223 °K durante 10,60 horas y se obtuvo un promedio de dureza superficial de 817,44 HV.

Asimismo, en el análisis de varianza ANOVA de la carburización líquida, los factores de temperatura (A) y la profundidad de la capa carburizada (B) tienen una influencia muy significativa sobre la dureza superficial del acero AISI 1018 que se evidencia en su coeficiente de variabilidad de 99,91%, sin embargo, el factor B es más influyente que el factor A. La gráfica LSD (Figura 27-3) indica una maximización para la dureza superficial en las probetas 22 y 24, aquellas con el mayor tiempo de carburización, la primera se carburizó a 1203°K durante 3,88 horas y se obtuvo una dureza superficial promedio de 767 HV; para la última, la carburización se llevó a cabo con 1223°K y 3,24 horas cuya dureza superficial promedio es de 778 HV.

La temperatura de carburización y la profundidad de la capa carburizada son directamente proporcionales a la micro dureza Vickers del acero 1018 al ser sometido a los procesos de carburización sólida y líquida en sales. También, la concentración de carbono de la superficie presenta esta relación con la variable respuesta. Esto es, a mayor temperatura, profundidad de capa y concentración de carbono final se obtendrán mayores micro durezas en el acero AISI 1018. Siendo la profundidad de la capa carburizada el factor más influyente durante la carburización.

El tratamiento más efectivo de la carburización sólida es el aplicado a la probeta 18 con un promedio de micro dureza de 852,40 HV. Este tratamiento se lleva a cabo a 1223 °K durante 10,60 horas, se obtuvo una concentración superficial de 0,60% de carbono y una capa carburizada de 1,25 mm. Si bien es cierto, los demás tratamientos candidatos, a excepción de la probeta 4, también presentan los dos últimos parámetros por lo que facilitan la formación de martensita, al poseer la máxima concentración final de carbono requerida en el experimento. Por otro lado, la probeta 12 tiene el mismo promedio de micro dureza que la probeta 18, mientras que la probeta 6 posee un mejor promedio de micro dureza (852,40 HV) en su superficie, gracias a un tiempo de permanencia mucho más prolongado (13,27 y 16,75 horas, respectivamente).

El tratamiento que maximiza el promedio de micro dureza Vickers en el acero AISI 1018 de la carburización líquida es el correspondiente a la probeta 24, con un promedio de micro dureza

de 778 HV y un tiempo de 3,24 horas; se descarta la probeta 22 puesto que existe un tiempo mayor en 0,64 horas y con un menor promedio de micro dureza (767 HV).

La capa superficial de la muestra de acero AISI 1018 es una micro estructura de martensita revenida producto del proceso de bonificado. La estructura inicial del material base es de ferrita y perlita, tras un temple de 34.05 minutos de tiempo de permanencia y la temperatura de temple respectiva para cada temperatura de carburización se obtuvo martensita en la zona austenítica y gracias al enfriamiento rápido, el cual impide la difusión manteniendo la estructura martensítica a pesar de la disminución de la temperatura. El enfriamiento rápido en aceite disminuye la fragilidad y deformaciones del material templado en comparación con el enfriamiento en agua. Sin embargo, este enfriamiento causa demasiada tensión en el material, lo que resulta en una fragilidad excesiva que se alivia con el tratamiento térmico del revenido.

RECOMENDACIONES

Para obtener buenos resultados de los tratamientos térmicos y termoquímicos se debe realizar una correcta limpieza de la pieza a tratar, es decir, eliminar escoria, grasas, aceites.

Durante los procesos de los tratamientos térmicos y termoquímicos de los especímenes se debe utilizar un equipo de protección adecuado para poder controlar, manipular y transportar dichas muestras sin ocasionar laceraciones o incapacitar al investigador, lo que puede retrasar la experimentación.

Para el uso de equipos técnicos como el horno de tratamientos térmicos, pirómetro, microdurómetro, microscopio, pulidora, tronzadora vertical, entre otros se requiere un conocimiento previo, una capacitación y supervisión del técnico a cargo.

Para el cálculo de la temperatura de los tratamientos térmicos considerar el porcentaje de los elementos aleantes del material, previamente medidos por espectrofotometría.

Para las mediciones correctas de microdureza es necesario contar con dos superficies paralelas de la muestra o probeta caso contrario los valores no serán confiables y además se tendrán errores sistemáticos en el análisis estadístico.

Plantear un diseño experimental que integre los métodos de carburización, considerándolos factores del experimento, que permita un análisis combinado para obtener el tratamiento más eficiente que maximice la micro dureza del acero.

BIBLIOGRAFÍA

AVNER, S. H., HAEN, J. L. E., & MEJÍA, G. B. *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw-Hill, 1979, pp. 50-55.

AYALA, S., VILLA, C., CASTILLO, M., & AGUILAR, R. *Estudio del comportamiento al desgaste de aceros 1018 y 8620 recubiertos mediante un proceso de cementación sólida*, 2007. [Consulta: 18 de septiembre 2021]. Disponible en: <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/15/15-53.pdf>

BERNAL, J. *Endurecimiento superficial del acero por difusión del carbono en hierro gamma*. Ii, s.f., pp. 1994-4682.

BESSEMER, H. *On the manufacture of malleable iron and steel without fuel*. United States: Civil Eng Archit J, 1856, pp. 298–300.

HASAN, M. Z., HUSSEIN, A. A., HASAN, A. S., & ALI, O. M. *Improvement of AISI 1018 carbon steel Gr 1018 mechanical properties by liquid carburizing in salt bath*. *Materials Today: Proceedings*, 2020. pp. 512–516. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.179>

LLULLUNA, F. R. L. *Mecánica Procesamiento De Imágenes Mediante Software Libre Python Para El Análisis Metalográfico En Aceros*. Escuela Politécnica Nacionalj, Facultad De Ingeniería, 2014. pp.119. [Consulta: 2021-09-25]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7171/1/CD-5361.pdf>

LUNA, J., ORTIZ, J., MUÑIZ, C., & MARTÍNEZ, F. *Tratamiento termoquímico en un acero AISI 8620 mediante cementación solida utilizando rebaba de hierro gris*, 2014. [Consulta: 2021-10-09]. Disponible en: <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2014/03/05/tratamiento-termoquimico-en-un-acero-aisi-8620-mediante-cementacion-solida-utilizando-rebaba-de-hierro-gris/>

MÉNDEZ CURISACA, A. J. *Análisis de la influencia del tiempo de aplicación del tratamiento termoquímico de cementado en la dureza superficial del acero AISI/SAE 1018*. (Maestría) Universidad Politécnica Salesiana, Ingeniería Mecánica, Ecuador. 2021. pp. 40-60.

NEWELL, J. *Ciencia de materiales-aplicaciones en ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V, 2010.

ORTIZ, M., CRUZ, A., MORGADO, I., FARFÁN, J. M., HERNÁNDEZ, J., & CRUZ, J. D. *Tratamientos termoquímicos*. Escuela Superior Ciudad Sahagún, Sahagún. 2020. pp. 17–31.

SCHEY, J. A., & LEÓN CÁRDENAS, J. *Procesos de manufactura*. México: McGraw Hill, 2002, pp. 20-30.

SMITH, W. F., HASHEMI, J., CÁZARES, G. N., & GONZÁLEZ-CAVER, P. A. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: McGraw-Hill, 2006, pp. 100-103.

UXUA, M., & CRISTOBAL, C. Cementación solida de un acero de bajo carbono empleando carbón vegetal y conchas marinas como activador ecológico. Universidad Nacional de San Agustín. Facultad de Ingeniería de procesos. Escuela Profesional de Ingeniería de Materiales, 2016. pp. 30-40.

ANEXOS

ANEXO A: HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

Hoja de Datos de Seguridad de Materiales (MSDS)	
--	---

Cianuro de Sodio		
-----------------------------	--	---

Sección I : Información del Producto Químico y de la Compañía

Nombre del Material	Cianuro de Sodio.
Fórmula Química	NaCN
Número CAS	143-33-9
Código UN	1689
Guía de Respuesta	157
Clasif. Mat. Pelig.	6.1
Código Hazchem	2X
Sinónimos	Sal de Sodio, Cianuro blanco.
Uso	Pilas de Lixiviación.
Manufacturero	TICOR CHEMICAL COMPANY PTY LTD. P.O. Box 1305, Gladstone, Queensland, 4680. Teléfono (07) 4976-1777.
Usuario	Emergencias (07) 4973-6660 las 24 horas. MINERA BARRICK MISQUICHILCA S.A Emergencias (51-1) 217-0180.

Sección II : Composición / Información de Componentes

Ingredientes	Proporción	Número CAS
Cianuro de Sodio	98 %	143-33-9
HCOONa	1 %	
H2O	0,3 %	
Na2CO3	0,6 %	
NaOH	0,1 %	1310-73-2
PEL de OSHA : 5 mg/m ³ TLV de ACGIH : C 5 mg/m ³		

Sección III : Identificación de Riesgos	
Entradas Principales	Inhalación, absorción, Ingestión, contacto.
Inhalación	El polvo o neblina (solución) puede ser irritante a las vías respiratorias y garganta. En NaCN reacciona con la humedad liberando gas cianhídrico.
Ojos	El cianuro en forma de polvo o como gas de cianhídrico, es rápidamente absorbido por los ojos y puede ser la vía de severas irritaciones e intoxicación. Debido al contenido de hidróxido de sodio puede causar daños a los tejidos severos y dolorosos.
Piel	Es un tóxico por absorción de la piel. El contacto prolongado o repetido puede causar escozor, caracterizado por erupciones musculares, papilares y vesiculares. A través de la piel se puede absorber cantidades fatales de cianuro de sodio.
Ingestión	El cianuro inhibe la oxidación tisular provocando la muerte por asfixia química en minutos.
Carcinogenicidad	No figura como cancerígeno.

Sección IV : Medidas de Primeros Auxilios	
Inhalación	Remover a la víctima al aire fresco. Si hay dificultad al respirar y los síntomas de envenenamiento son evidentes dar oxígeno y nitrito de amilo y no inducir al vómito. Contactar un médico inmediatamente.
Contacto con los ojos	En caso de contacto lavar arriba y abajo de los párpados por 15 minutos. Llamar al médico.
Contacto con la piel	En caso de contacto lavar la zona afectada inmediatamente con abundante agua. Retirar la ropa contaminada. Si los síntomas de envenenamiento son evidentes dar oxígeno. Llamar al médico.
Ingestión	Si respira y esta consciente, lavar la boca con agua. Si esta inconsciente no darle de beber nada. Dar carbón activado (Carbosorb) y buscar ayuda médica inmediatamente.
Facilidades para primeros auxilios	Donde esté presente el cianuro asegúrese que las instalaciones deben contar con ducha y lavaojos disponibles.

Sección V : Medidas para la extinción de incendios	
Medios de Extinción	Usar polvo químico seco para fuegos. No usar extintores de dióxido de carbono (CO ₂) ya que pueden liberar HCN. No utilice agua a menos que los contenedores se encuentren intactos.
Riesgos Especiales	No es combustible y sus límites de inflamabilidad son bajos.

Sección VI : Medidas para derrames accidentales	
Procedimientos de Recajo y Limpieza	Barra y recoja con pala y deposite en un recipiente cerrado o una bolsa plástica para detener el derrame mientras se transporta. Etiquete los contenedores. Cubra y mantenga seco el derramamiento.
Derrames Pequeños (soluciones)	Utilice material absorbente adecuado que no reaccione con el material derramado tales como arena. No utilice aserrin en ningún caso (ácido). Recoja el material derramado y etiquete los contenedores. Cubra el derrame. Tratar los residuos con agentes neutralizantes notificados por el fabricante.
Derrames Pequeños (sólidos)	Recupere todo lo que es posible con lampas o escobas, etiquete los contenedores. Cubra el derrame. Tratar los residuos con agentes neutralizantes notificados por el fabricante.
Derrames Grandes	Cuidado : El hipoclorito de sodio es un agente contaminante del medio ambiente. Use solo donde existen fugas y es improbable causar problemas. Contacte al servicio de emergencia y proveedor inmediatamente. Contener utilizando sacos de arena o tierra, recuperar el material si es seguro hacerlo. No trate de neutralizar sin asistencia.

Sección VII : Manejo y Almacenamiento	
Almacenamiento	Almacenar en lugares frescos y secos. Las áreas deben contar con buena ventilación y fuera de contacto directo con los rayos solares. Evitar su almacenamiento cerca de materiales incompatibles como productos oxidantes, ácidos, agua y productos que contienen agua. El cianuro en lo posible debe ser almacenado solo.
Manipulación	Utilice siempre su equipo de protección personal.

Sección VIII : Controles de Exposición / Protección Personal	
Protección Respiratoria	Los niveles de exposición deben ser mantenidos bajo los límites. Hacer uso de respiradores canister para NaCN en polvo y con niveles bajos de HCN. En todo caso usar respiradores aprobados por NIOSH si fuera posible con suministro de aire en concentraciones altas.
Equipo de Protección	Usar ropa de seguridad, guantes largos de jebes y lentes o antiparras para una protección total.
Ventilación	Tener una ventilación forzada en las áreas de exposición, para mantener los niveles de exposición por debajo de los límites permisibles.

Sección IX : Propiedades Físicas y Químicas

Estado físico	Sólido en briquetas
Peso	15 gr
Dimensiones	31 mm x 30 mm x 11 mm
Color	Blanco
Olor	Ligero olor a amoniaco o almendras amargas
Punto de Fusión	562 °C (1043 °F).
Punto de Ebullición	1497 °C (2726 °F).
Solubilidad	480 gr/lit de solución a 20 °C
Gravedad Especifica	1.61
Presión de Vapor	0.10 Kpa (800 °C)
Otros	PH : 11-12

Sección X : Estabilidad y Reactividad

Estabilidad	Estable en condiciones normales.
Incompatibilidad	Ocurre reacciones químicas cuando entran en contacto con ácidos fuertes o bases fuertes. El cianuro de sodio es altamente corrosivo a muchos metales. Reacciona violentamente con agentes oxidantes que liberarán gases tóxicos.
Prod descomposición Peligrosos	Puede formar gases tóxicos como HCN y óxidos de nitrógeno.

Sección XI : Información Toxicológica

Toxicidad	Los efectos sobre la salud humana debidos a una exposición excesiva por inhalación, ingestión o contacto con la piel o los ojos pueden incluir irritación de la piel con malestar o erupciones, irritación de los ojos o quemadura con malestar, lagrimeo, visión borrosa y la posibilidad de daño permanente a los ojos. No figura como cancerígeno. Los individuos con enfermedades ya existentes del sistema nervioso central pueden ser más susceptibles a la toxicidad de exposiciones excesivas.
-----------	--

Sección XII : Información Ecológica

Ecotoxicidad	El cianuro es un producto tóxico. Todo manejo debe regirse por las leyes locales.
--------------	---

Acero 1018



C 0.15 / 0.20% **P max.** 0.04%
Mn 0.60 / 0.90% **S max.** 0.05%
Si 0.15 / 0.30%

Acero de bajo carbón 1018
Redondo: EF 3/16" A 6" Y LC 12"
Hexagonal: EF 1/2" A 1 1/2"
Cuadrado: EF 3/16" A 6"
Solera: EF 1/8" X 1/4" A 2" X 8"

Acero de bajo carbón comúnmente usado en su condición de recocido en partes donde la resistencia no es crítica. También puede ser cementado logrando una dureza uniforme en la superficie con centro suave. Este acero puede sustituirse tanto en acabado en frío como en caliente.

El acero 1018 se puede suministrar en perfil redondo, cuadrado, hexagonal, rectangular y con los siguientes acabados de fabricación: Estirado en Frío (EF), Laminado en Caliente (LC), Forjado (Forj), Torneado (Torn), Rectificado (Rect) y Acabado en Frío (AF).

Aplicaciones:

En partes que no esten sujetas a grandes esfuerzos: flechas, tensores, pernos de dirección y de cadenas, catarinas, etc. Por su ductilidad es ideal para procesos de transformación en frío: recalcar, estampar y doblar (dependiendo el acabado). Si se busca que la pieza tenga dureza superficial con el centro suave, este acero es adecuado para un tratamiento térmico (cementación, carburización), para fabricar, piñones, engranes, sinfines, esparragos, tornillos etc.

Maquinabilidad: 78% tomando a el 12L14 como el 100%.

Soldabilidad: Fácilmente soldable por cualquier método.

Tratamientos Térmicos:

Forja: 1180° – 1230°C, enfriar en aire.

Recocido: 840° – 900°C, enfriar en horno.

Templado y Revenido:

1- Cementar entre 900° – 930°C, por 8 horas.

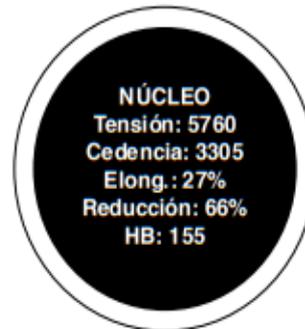
2- Enfriar empaquetado.

3- Recalentar 760° – 790°C.

4- Enfriar en agua.

5- Revenir 120° – 200°C.

CAPA ENDURECIDA (1.2 mm) a 62 HRC



Tu mejor Aleado en Aceros Especiales



www.iirsacero.com.mx



Propiedades Mecánicas

	Resistencia a la tensión (Kg/cm ²)	Punto de cedencia (Kg/cm ²)	% Elongación en 50.8 m.m.	% Reducción de área	Dureza Brinell
Sin tratamiento 1"Ø	4710	3160	36	58	137
Recocido 1"Ø	4220	2810	38	62	121
Estirado en frío 1"Ø	5970	4920	28	55	167
Cementado (915°C) Tratado (775°C) Revenido (180°C)					
1"Ø	6120	3860	25	57	179
2"Ø	5760	3530	30	70	163
4"Ø	5200	2830	32	72	149

Kg/cm² x 14.22 = lbs/pulg²

*Estos valores son sólo de referencia.

Tu mejor Aleado en Aceros Especiales

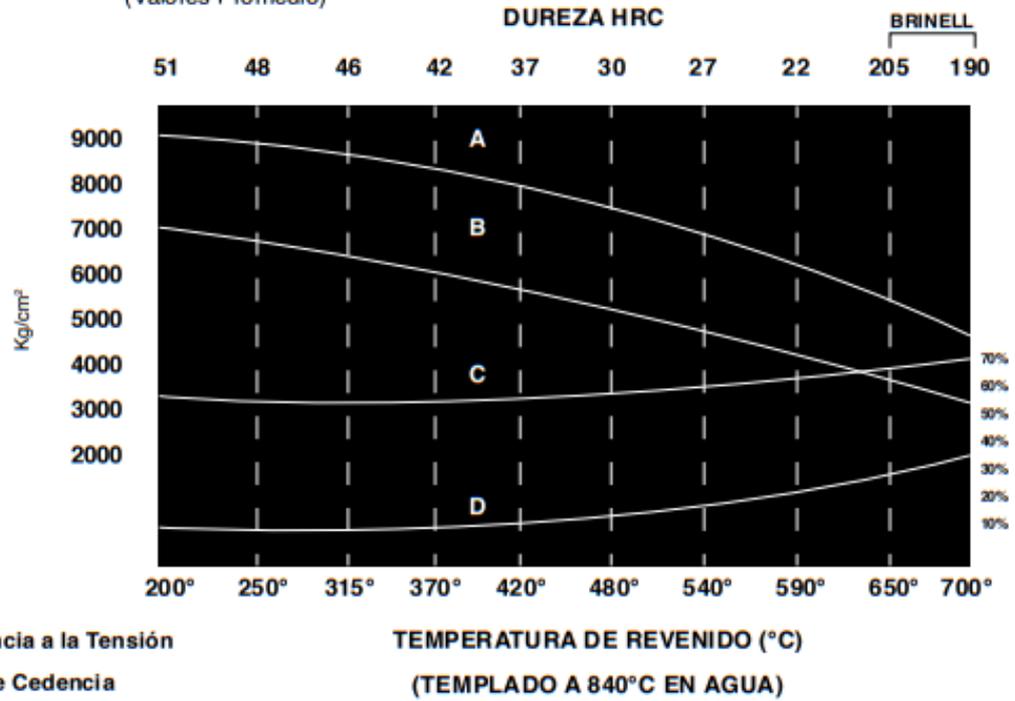


www.iirsacero.com.mx



Características Mecánicas

(Valores Promedio)



- A Resistencia a la Tensión
- B Punto de Cedencia
- C % Reducción de Área
- D % Elongación

Kg/cm² x 14.22 = lbs/pulg²

Tu mejor Aleado en Aceros Especiales



www.iirsacero.com.mx