

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería, El Politécnico

Desarrollo del Proceso de Boronizado para endurecimiento superficial

Daniel Alejandro Iza Acosta

Alfredo Valarezo, Ph.D., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Enero 2013

Universidad San Francisco de Quito

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACION DE TESIS

Desarrollo del proceso de Boronizado para endurecimiento superficial

Daniel Alejandro Iza Acosta

Alfredo Valarezo, Ph.D

Director de Tesis y

Miembro del Comité

Lorena Bejarano, MSc.

Miembro del Comité

Edison Bonifaz, Ph.D

Miembro del Comité

Alfredo Valarezo, Ph.D

Director de la Carrera de Ingeniería Mecánica

Ximena M. Córdova, Ph.D

Decana de la Escuela de Ingenierías

Quito, Enero 2013

®Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior

Firma:

Nombre: Daniel Alejandro Iza Acosta

C.I: 171837149-3

Fecha: 7 de Enero 2013

Agradecimientos

A Dios y la Virgen por siempre cuidarme y guardarme en este largo camino con sus bendiciones.

A mi Director de Tesis, Dr. Alfredo Valarezo, por su apoyo incondicional, su tiempo brindado y la confianza presentada hacia mi persona durante todo el tiempo de la realización de este proyecto de Tesis.

A mis asesores de Tesis, Lorena Bejarano y Edison Bonifaz, por siempre estar disponibles en cualquier aclaración de problemas suscitados durante la realización de este proyecto.

Al Departamento de Química de la USFQ, especialmente a Lourdes Orejuela y Carlos Fabara por estar siempre prestos para ayudarme a desarrollar los experimentos de esta Tesis.

A los Ingenieros responsables del laboratorio de Metalurgia de la Escuela Superior Politécnica del Ejército, en especial al Ing. Eduardo Kubes e Ing. Patricio Quezada, quienes colaboraron con su guía para las mediciones de resultados de este proyecto.

Al Ingeniero Carlos Díaz, responsables del laboratorio de Metalurgia de la Escuela Politécnica Nacional por su colaboración con las metalografías de este proyecto.

A la fábrica de aluminio UMCO, en especial al Ing. Jesús Rojas y al Sr. Marcos Aguilar, por brindarme su apoyo en las mediciones de dureza de las diferentes probetas para el desarrollo de este proyecto de Tesis.

A la fábrica Imetca, en especial al Sr. Hugo Carrera y sus colaboradores, por prestarme las inmediaciones de su taller para realizar la construcción y realización de las piezas de la retorta de este proyecto.

Al Sr. Fabián Morales por su incondicional apoyo durante la realización de este proyecto.

Dedicatoria

El presente proyecto está dedicado de manera especial a mis padres, Jaime y Blanca, por su amor incondicional en todo momento y por siempre confiar en mis capacidades para sobresalir en este camino como estudiante. A pesar de sus ocupaciones supieron ser un ejemplo en todo momento en este camino como estudiante, a ellos les debo mi más sincero respeto y amor infinito.

A mi director de Tesis Dr. Alfredo Valarezo por siempre confiar en mis capacidades y brindarme su apoyo durante toda la realización de este proyecto; por ser un amigo, más que un director. Le expreso mi más sincero agradecimiento y respeto.

Resumen

La industria hoy en día necesita materiales en la manufactura que presenten propiedades altamente eficientes y que ayuden a la mejora en la línea de producción. El proceso de endurecimiento por boronizado es una alternativa innovadora y con bajos costos en el mercado ecuatoriano para mejorar las características de los aceros y otros materiales no ferrosos.

En este proyecto, se presenta el desarrollo del proceso de boronizado como un método de endurecimiento superficial, mediante el uso de la técnica de empaquetamiento de boro con gas y lecho fluidizante. Los análisis se realizan en cinco aceros: AISI 1018, AISI 4140, AISI 316L, AISI D3, AISI AO1; y una fundición de hierro con alto contenido de Níquel (Ni-Resist). Los resultados demuestran la efectividad del método alcanzando durezas de hasta 88[HRC] con espesores de capa boronizada de hasta 148[μm].

Así mismo en este estudio se desarrolla un análisis del costo del servicio de boronizado para introducirlo en el mercado ecuatoriano.

Abstract

Current, the industry requires materials for manufacturing that are both highly efficient and highly productive. Boriding is an innovative and cheap process in the Ecuadorian market to improve the characteristics of steel in the surface.

In this project, the boriding process as a surface hardening method by the use of the gas pack boriding technique will be developed. Analyses were performed on five types of steels: AISI 1018, AISI 4140, AISI 316L, AISI D3, AISI AO1, and cast iron with high nickel content (Ni-Resist). The results demonstrate the effectiveness of the method, reaching high hardness of up to 88 [HRC] and thicknesses up to 148 [μm].

Additionally, a cost analysis is performed to consider introducing the boriding process, into the Ecuadorian market.

Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	20
1.1	Antecedentes	20
1.2	Justificación del proyecto.....	21
1.3	Objetivos	22
1.3.1	Objetivos específicos	22
2	Marco Teórico	24
2.1	Generalidades de tratamientos en aceros	24
	Figura 2.1 Diagrama de tipos tratamientos en aceros (2)	24
2.1.1	Tratamientos térmicos en aceros.....	25
2.1.2	Tratamientos termoquímicos en aceros	26
2.1.3	Tratamientos mecánicos en aceros.....	27
2.1.4	Recubrimientos superficiales en aceros	27
2.2	Boronizado	28
2.2.1	Generalidades del proceso de Boronizado.....	28
2.2.2	Proceso de Boronizado	32
2.2.3	Boronizado de materiales Ferrosos.....	33
2.2.4	Técnicas Termoquímicas del proceso de boronizado	38
2.2.5	Aplicaciones industriales del proceso de boronizado	44
3	Método Experimental	46
3.1	Propuesta de desarrollo	46
3.1.1	Método	46
3.1.2	Equipos y materiales para el desarrollo del proceso de boronizado	47
3.1.3	Selección de materiales para la aplicación del proceso de boronizado (materiales substrato).....	52
3.1.4	Fases experimentales	57
3.2	Desarrollo Experimental	59
3.2.1	Diseño y construcción de retorta.....	59
3.2.2	Probetas.....	63

3.2.3	Procedimiento para la preparación de probetas para boronizado	64
3.2.4	Ensayo de dureza	66
3.2.5	Ensayo Metalográfico	68
3.2.6	Ensayo de tintas penetrantes	72
4	Resultados Experimentales y Discusión.....	74
4.1	Mediciones microdureza	74
4.2	Comparación de microdurezas superficiales y en substrato para AISI D3 (K100) K100 Y AO1 (K460) con Tratamientos Térmicos comunes de estos aceros.....	80
4.2.1	Material AISI D3 (K100).....	80
4.2.2	Material AISI AO1 (K460).....	84
4.3	Metalografías.....	88
4.3.1	AISI 1018 (E920).....	89
4.3.2	AISI 316L (A200).....	93
4.3.3	AISI 4140 (V320)	97
4.3.4	Fundición de hierro con aleación de Níquel	101
4.3.5	AISI D3 (K100)	104
4.3.6	AISI AO1 (K460)	113
4.4	Tintas penetrantes.....	120
4.5	Discusión.....	122
4.5.1	Discusión mediciones microdureza	122
4.5.2	Discusión metalografías.....	124
5	Aplicación Industrial del Proceso de Boronizado: Empresa UMCO	126
	Los planos proporcionados por la empresa Umco del pin se detallan en el ANEXO F.	126
5.1	Descripción de la máquina y función del pin.....	127
5.1.1	Historial de pines en la empresa durante operación.....	127
5.2	Problemas presentados en el pin	127
5.3	Aplicación de boronizado a pines	128
5.4	Resultados obtenidos.....	130
5.4.1	Pin de AISI AO1 – 5 horas boronizado y temple	130
5.4.2	Pin de AISI AO1 – 5 horas boronizado, templado y revenido	130

5.5	Posibles problemas y causas del rompimiento de los pines	131
6	Análisis del costo del servicio de boronizado	133
6.1	Generalidades de costo de un servicio	133
6.1.1	Costos del ciclo de vida	133
6.2	Análisis FODA para el servicio de boronizado.....	134
6.3	Costo total del desarrollo del proyecto de boronizado.....	136
	Los costos descritos anteriormente, se resumen en la tabla 6.1	138
6.4	Costo por kilogramo de material base para el proceso termoquímico de boronizado.....	140
6.4.1	Costos fijos.....	141
6.4.2	Costos Variables	143
6.4.3	Ecuaciones de cálculo de costo de servicio de boronizado de acuerdo a la cantidad de material base.....	144
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	148
7.1	Conclusiones	148
7.2	Recomendaciones.....	149
8	Referencias Bibliográficas.....	151
	ANEXOS	154

Lista de Figuras

Figura 1.1 Espectro de durezas en escala Knoop para varios tipos de Procesos térmicos (5).....	22
Figura 2.1 Diagrama de tipos tratamientos en aceros (2)	24
Figura 2.2 Morfología de la capa de boronizado sobre aceros (4).....	28
Figura 2.3 Diagrama de equilibrio Hierro-Boro (13).....	33
Figura 2.4 Morfología de capa de doble fase FeB y FeB ₂ de boronizado para un acero de bajo contenido de carbono (4 horas de boronizado / 900° C) (14).....	34
Figura 2.5 Efectos de los elementos aleantes en los aceros para el espesor de la capa boronizada (18) (19)	37
Figura 2.6 Diagrama del boronizado por empaquetamiento (4).....	39
Figura 2.7 Diagrama del proceso de boronizado por plasma (4).....	42
Figura 2.8 Diagrama del proceso de boronizado por lecho fluidizante (4)	43
Figura 3.1 Esquema de proceso de boronizado (29).....	47
Figura 3.2 Compuesto de boro Ekabor®2	48
Figura 3.3 Polvo Ekabor®2	48
Figura 3.4 Esquema de retorta (29).....	49
Figura 3.5 Horno Thermo Scientific.....	50
Figura 3.6 Temperatura vs Tiempo Horno Thermo Scientific	50
Figura 3.7 Válvula de Argón IO®xygen	51
Figura 3.8 Carbonato de calcio	51
Figura 3.9 Sistema de absorción para salida de gases	52
Figura 3.10 Diagrama tratamientos térmicos AISI D3 (K100).....	55
Figura 3.11 Diagrama tratamientos térmicos AISI AO1 (K460).....	56
Figura 3.12 Medidas en milímetros del horno Thermo Scientific	60
Figura 3.13 Modelaciones de Retorta	61
Figura 3.14 Diseño final de retorta (Ver Anexo A)	62
Figura 3.15 Dimensión y diseño de probetas.....	63
Figura 3.16 Procedimiento para la preparación de boronizado	65
Figura 3.17 Geometría y forma del indentador Knoop (34)	66

Figura 3.18 Microdurómetro Tukon	67
Figura 3.19 Montaje de probetas	69
Figura 3.20 Máquina Desbastadora	70
Figura 3.21 Banco de pulido grueso	70
Figura 3.22 Banco de pulido fino	71
Figura 3.23 Microscopio Metalográfico	72
Figura 3.24 Kit de tintas penetrantes Ardrex de Chemetall.....	73
Figura 4.1 Gráfico de barras de las diferentes medidas de microdureza en escala Knoop para los distintos materiales del proceso de boronizado.....	77
Figura 4.2 Gráfico de barras de las diferentes medidas en escala Rockwell C para los distintos materiales del proceso de boronizado	79
Figura 4.3 Comparaciones de mediciones de microdureza Knoop superficiales y substrato para acero AISI D3 (K100) con distintos tratamientos.....	83
Figura 4.4 Comparaciones de mediciones de dureza Rockwell C superficiales y substrato para acero AISI D3 (K100) con distintos tratamientos.....	83
Figura 4.5 Comparaciones de mediciones de microdureza Knoop superficiales y substrato para acero AISI AO1 (K460) con distintos tratamientos.....	86
Figura 4.6 Comparaciones de mediciones de dureza Rockwell C superficiales y substrato para acero AISI AO1 (K460) con distintos tratamientos.....	87
Figura 4.7 Secciones de la probeta montada para análisis metalográfico.....	88
Figura 4.8 Metalografía arista transversal material AISI1018 (E920), 1 hora de boronizado (850°C) 200x.....	89
Figura 4.9 Metalografía arista longitudinal material AISI1018 (E920), 1 hora de boronizado (850°C) 200x.....	90
Figura 4.10 Metalografía arista transversal material AISI1018 (E920), 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	91
Figura 4.11 Metalografía arista longitudinal material AISI1018 (E920), 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	92
Figura 4.12 Metalografía arista transversal material AISI 316L (A200), 1 hora de boronizado (850°C) 200x.....	93
Figura 4.13 Metalografía arista longitudinal material AISI 316L (A200), 1 hora de boronizado (850°C) 200x.....	94

Figura 4.14 Metalografía arista longitudinal material AISI 316L (A200), 5 horas de boronizado (920°C) 200x.....	95
Figura 4.15 Metalografía arista longitudinal material AISI 316L (A200), 5 horas de boronizado (920°C) 200x.....	96
Figura 4.16 Metalografía arista transversal material AISI 4140(V320), 1 hora de boronizado (850°C) 200x.....	97
Figura 4.17 Metalografía arista longitudinal material AISI 4140(V320), 1 hora de boronizado (850°C) 200x.....	98
Figura 4.18 Metalografía arista transversal material AISI 4140(V320), 5 horas de boronizado (920°C) 200x.....	99
Figura 4.19 Metalografía arista longitudinal material AISI 4140(V320), 5 horas de boronizado (920°C) 200x.....	100
Figura 4.20 Metalografía arista transversal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 1 hora de boronizado (850°C) 500x.....	101
Figura 4.21 Metalografía arista longitudinal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 1 hora de boronizado (850°C) 500x.....	102
Figura 4.22 Metalografía arista transversal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 5 horas de boronizado (020°C) 100x.....	103
Figura 4.23 Metalografía arista longitudinal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	103
Figura 4.24 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 1 hora de boronizado (850°C) 500x.....	104
Figura 4.25 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 1 hora de boronizado (850°C) 500x.....	105
Figura 4.26 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 3 horas de boronizado (920°C) 100x.....	106
Figura 4.27 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 3 horas de boronizado (920°C) 100x.....	107
Figura 4.28 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 4 horas de boronizado (920°C) 100x.....	108
Figura 4.29 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 4 horas de boronizado (920°C) 100x.....	109

Figura 4.30 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	110
Figura 4.31 Metalografía arista longitudinal material AISI (K100), 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	111
Figura 4.32 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x.....	112
Figura 4.33 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x.....	112
Figura 4.34 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 3 horas de boronizado (920°C) 100x.....	114
Figura 4.35 Metalografía arista longitudinal material AISI AO1 (K460), 3 horas de boronizado (920°C) 100x.....	114
Figura 4.36 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 4 horas de boronizado (920°C) 100x.....	116
Figura 4.37 Metalografía arista longitudinal material AISI (K460), 4 horas de boronizado (920°C) 100x.....	116
Figura 4.38 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	117
Figura 4.39 Metalografía arista longitudinal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) 100x.....	118
Figura 4.40 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x.....	119
Figura 4.41 Metalografía arista longitudinal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x.....	119
Figura 4.42 Resultado de ensayo de tintas penetrantes.....	121
Figura 4.43 Espesores medidos de la capa boronizada para acero AISI D3 (K100) a diferentes tiempos de exposición.....	125
Figura 4.44 Espesores medidos de la capa boronizada para acero AISI AO1 (K460) a diferentes tiempos de exposición.....	125
Figura 5.1 Pin para ollas presión UMCO.....	126
Figura 5.2 Máquina troqueladora Umco para ollas de presión.....	127
Figura 5.3 Pines Umco aplicado proceso de boronizado durante 5 horas a 920°C	128
Figura 5.4 Tratamientos térmicos para pines realizados en Umco	129

Figura 5.5 Pin roto de AISI AO1- 5 horas de boronizado y temple	130
Figura 5.6 Pin roto de AISI AO1- 5 horas de boronizado, temple y revenido	131
Figura 5.7 Diagrama Esfuerzo- Deformación para materiales frágiles y dúctiles	132
Figura 6.1 Diagrama FODA para el servicio de boronizado	135

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Principales Tratamientos térmicos para aceros (7)	25
Tabla 2.2 Principales Tratamientos termoquímicos para aceros (2).....	26
Tabla 2.3 Principales Tratamientos mecánicos para aceros.....	27
Tabla 2.4 Principales Tratamientos superficiales para aceros	27
Tabla 2.5 Microdureza y puntos de fusión para diferentes fases formadas durante el proceso de boronizado (4).....	29
Tabla 2.6 Medidas de microdureza de aceros boronizados en comparación con otros tratamientos y materiales duros (4).....	30
Tabla 2.7 Principales aplicaciones del proceso de boronizado en materiales ferrosos (9) (15).....	44
Tabla 3.1 Aceros seleccionados para el desarrollo del proceso de boronizado (31)	53
Tabla 3.2 Instrucciones tratamientos térmicos AISI D3 (31)	54
Tabla 3.3 Temperaturas para tratamientos térmicos AISI O1 (31).....	56
Tabla 3.4 Fase experimental 1	58
Tabla 3.5 Fase experimental 2	58
Tabla 3.6 Fase experimental 3	59
Tabla 4.1 Mediciones para AISI 1018(E920) en estado de suministro	74
Tabla 4.2 Mediciones para AISI 1018(E920) para 5 horas de boronizado.....	74
Tabla 4.3 Mediciones para AISI 1018(E920) para 4 horas de boronizado.....	75
Tabla 4.4 Mediciones para AISI 1018(E920) para 3 horas de boronizado.....	75
Tabla 4.5 Tabla de comparaciones de mediciones (Microdureza Knoop).....	76
Tabla 4.6 Tabla de comparaciones de mediciones (Dureza Rockwell C)	78
Tabla 4.7 Tabla de mediciones del acero AISI D3 (K100) para suministro.....	80
Tabla 4.8 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C.....	81
Tabla 4.9 Tabla de mediciones en substrato del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C.....	81
Tabla 4.10 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido.....	81

Tabla 4.11 Tabla de mediciones en substrato del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido.....	82
Tabla 4.12 Tabla de mediciones superficial del acero AISI D3 (K100) con tratamiento térmico de temple y revenido (SIN BORONIZADO)	82
Tabla 4.13 Tabla de mediciones en substrato del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C.....	84
Tabla 4.14 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C.....	84
Tabla 4.15 Tabla de mediciones en substrato del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C.....	85
Tabla 4.16 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido.....	85
Tabla 4.17 Tabla de mediciones en substrato del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido.....	85
Tabla 4.18 Tabla de mediciones superficial del acero AISI AO1 (K460) con tratamiento térmico de temple y revenido.....	86
Tabla 4.19 Tabla de medición de espesores AISI 1018(E920) con una hora de boronizado	90
Tabla 4.20 Tabla de medición de espesores AISI 1018(E920) con cinco horas de boronizado	92
Tabla 4.21 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con una hora de boronizado	94
Tabla 4.22 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con cinco horas de boronizado	96
Tabla 4.23 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con una hora de boronizado	98
Tabla 4.24 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con cinco horas de boronizado	100
Tabla 4.25 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con una hora de boronizado (850°C).....	105
Tabla 4.26 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con tres horas de boronizado (920°C).....	107

Tabla 4.27 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cuatro horas de boronizado (920°C)	109
Tabla 4.28 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado (920°C).....	111
Tabla 4.29 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado (920°C) y tratamiento térmico de temple y revenido	113
Tabla 4.30 Tabla de medición de espesores AISI AO1 (K460) con tres horas de boronizado (920°C).....	115
Tabla 4.31 Tabla de medición de espesores AISI AO1 (K460) con cuatro horas de boronizado (920°C)	117
Tabla 4.32 Tabla de medición de espesores AISI AO1 (K460) con cinco horas de boronizado	118
Tabla 4.33 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado (920°C) y tratamiento térmico de temple y revenido	120
Tabla 6.1 Costos para el desarrollo del proyecto de boronizado	138
Tabla 6.2 Costos fijos y variables para servicio de cinco horas de boronizado.....	144
Tabla 6.3 Costos fijos y variables para servicio de cuatro horas de boronizado	145
Tabla 6.4 Costos fijos y variables para servicio de tres horas de boronizado	146

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Los tratamientos térmicos se desarrollan como una opción para mejorar las características mecánicas de los materiales, así pues, se utilizan procesos de calentamiento y enfriamiento a los que son sometidos los metales y sus aleaciones para modificar su microestructura, más no su composición. Entre los tratamientos térmicos más comunes están: temple, recocido y revenido (1). Particularmente, en esta tesis se discute otro tipo de tratamientos denominados termoquímicos superficiales, los cuales proporcionan además de un cambio en la microestructura, una modificación de los materiales en la superficie a tratarse. Es decir además de modificar la estructura cristalina de los metales, cambia su composición química con el fin de mejorar aún más las propiedades mecánicas de los metales, en especial la dureza y la resistencia al desgaste. Entre los procesos termoquímicos más comunes se encuentran: cementación, nitruración, cianuración, carbonitruración, sulfinación y el boronizado (2).

El tratamiento termoquímico de boronizado es un proceso superficial controlado por la difusión, este proceso se fundamenta en la saturación con boro en la parte más externa de la superficie del material, con la finalidad de aumentar la dureza y la resistencia al desgaste (3). Por esta razón el desarrollo del proceso de boronizado tiene aplicación en el campo de la optimización de partes y piezas por procesos de tratamientos termoquímicos y/o mejoramiento de propiedades mecánicas de los materiales con el fin de aumentar la vida útil de los materiales sometidos al desgaste y corrosión en el campo industrial.

El proceso de boronizado en general implica un sometimiento a alta temperatura del material en un rango de entre 700 a 1000 °C, que va desde 1 a 12 horas; en contacto con un compuesto a base de boro, sea este sólido, líquido o gaseoso. Este proceso puede ser aplicado a una variedad de materiales férricos, no férricos y hasta materiales cerámicos. Existen diferentes técnicas para realizar el proceso de boronizado entre las que se pueden citar: empaquetamiento con boro, boronizado con pastas, boronizado líquido, boronizado gaseoso, boronizado por plasma, y boronizado por lecho fluidizante (4).

Así pues, para el presente proyecto se pretende desarrollar el proceso de boronizado mediante la técnica de empaquetamiento de boro con gas y lecho fluidizante, ya que es una técnica sencilla de implementar. Así mismo para la verificación de la correcta realización del proceso de boronizado se realizarán metalografías y pruebas de dureza y microdureza a los diferentes materiales a experimentar. Por otro lado como aplicación práctica del proyecto se propone realizar el proceso de boronizado a pines empleados en la industria de la manufactura, con el fin de mejorar necesidades y ofrecer el proceso termoquímico de boronizado como una alternativa para la Industria ecuatoriana en tecnologías superficiales.

Además en el presente proyecto se desarrolla un análisis de costos para proponer el servicio de boronizado como una alternativa en el mercado de tratamientos termoquímicos de partes y piezas para la industria ecuatoriana. El análisis económico para el servicio de boronizado está basado en costos de materiales, costos del desarrollo del proceso, costos de energía, costos de propiedad intelectual y costos del desarrollo del proceso.

1.2 Justificación del proyecto

Desarrollar el tratamiento de boronizado representa un avance dentro del estudio de materiales, puesto que al ser un tratamiento termoquímico no muy desarrollado en Ecuador y por sus costos bajos de operación, garantiza una alternativa para el campo industrial en lo que se refiere a procesos de mejora de propiedades mecánicas o reparación de piezas y partes que necesiten una alta dureza, especialmente en condiciones de alto desgaste y corrosión u oxidación.

La figura 1.1 presenta una comparación de diferentes procesos termoquímicos y superficiales, y la microdureza (Dureza Knoop) esperada para cada uno de los procesos; nótese que el proceso de boronizado representa una alternativa para aplicaciones en

donde se requieren materiales con una medida de dureza bastante elevada:

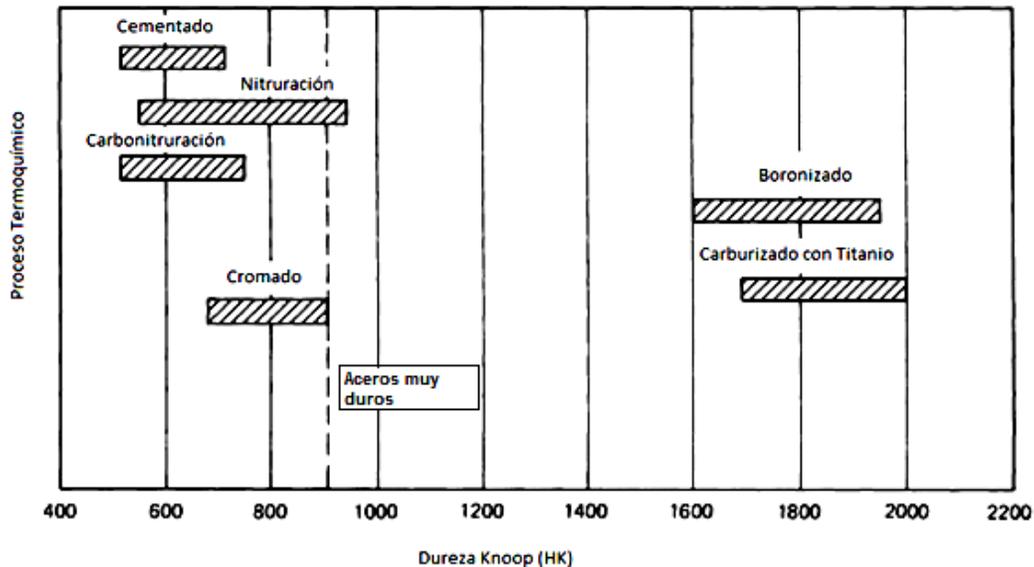


Figura 1.1 Espectro de durezas en escala Knoop para varios tipos de Procesos térmicos
(5)

1.3 Objetivos

El objetivo general del proyecto es desarrollar el tratamiento térmico-químico de boronizado para endurecimiento superficial de metales y comprobar sus propiedades.

1.3.1 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Diseñar y construir un prototipo de retorta (cámara para producir la difusión del boro en las piezas de sustrato) para el desarrollo y análisis del tratamiento de boronizado.
- Analizar varios tipos de metales ferrosos a utilizar en el tratamiento de boronizado de acuerdo a sus propiedades y aplicaciones en la industria.
- Realizar varias pruebas del tratamiento térmico de boronizado con diferentes materiales variando temperatura y tiempo de exposición
- Realizar pruebas de microdureza a las probetas que han sido expuestas al tratamiento de boronizado

- Realizar metalografías de las probetas que han sido expuestas al tratamiento de boronizado
- Comparar los diferentes resultados obtenidos durante los períodos de pruebas para establecer un tiempo y una temperatura óptima para que el tratamiento de boronizado sea eficiente de acuerdo al espesor de la capa boronizada.
- Realizar el tratamiento de boronizado a piezas (acero AISI AO1(K460)) utilizadas en la industria de la manufactura(especialmente, conformado mecánico)

2 Marco Teórico

2.1 Generalidades de tratamientos en aceros

Los metales son sujetos a una diversidad de tratamientos con la finalidad de mejorar o repotenciar sus propiedades como: dureza, resistencia mecánica, plasticidad, entre otros. En la figura 2.1, se muestra una clasificación de los tipos de tratamientos efectuados en metales con el fin de mejorar sus propiedades:

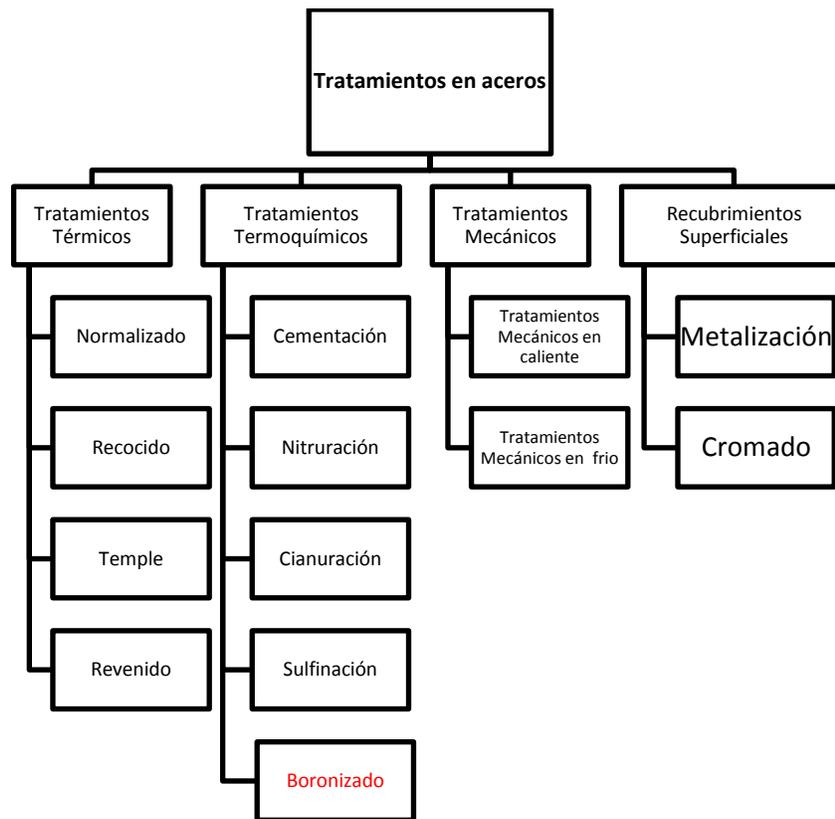


Figura 2.1 Diagrama de tipos de tratamientos en aceros (2)

A continuación se describe brevemente los diferentes tratamientos en aceros, para luego describir el proceso de boronizado. Además es importante anotar que el proceso de temple y revenido (tratamientos térmicos) serán también utilizados para aceros de herramienta después del proceso de boronizado.

2.1.1 Tratamientos térmicos en aceros

Un tratamiento térmico se define como temperatura en función del tiempo necesario para cambiar la microestructura de un material (6). Así los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento de los metales que modifican la estructura cristalina, especialmente el tamaño de grano. La finalidad de los tratamientos térmicos es repotenciar propiedades como: dureza, resistencia mecánica, plasticidad, entre otros. En este tipo de operaciones no se altera la composición química de los materiales. La Tabla 2.1 muestra un resumen breve de los diferentes tipos de tratamientos térmicos realizados a los aceros, así como una descripción de los mismos:

Tabla 2.1 Principales Tratamientos térmicos para aceros (7)

Tratamiento térmico	Descripción y aplicación
Normalizado	Desde el punto de vista térmico es un ciclo de calentamiento de austenización seguido de enfriamiento leve en aire. Típicamente este proceso se desarrolla a una temperatura aproximada de 55 ° C por encima de la línea crítica superior del diagrama de fase hierro carbono. Esto es por encima del Ac_3 (aproximadamente 830 ° C) para aceros hipoeutectoides y por encima de Ac_m (aproximadamente 860° C) para aceros hipereutectoides. Para clasificarlo como un tratamiento de normalización la fase en contacto debe producir una fase austenítica homogénea (con estructura cristalina FCC). Con este tipo de tratamiento se logra que el material vuelva a sus características de suministro.
Recocido	Este tratamiento consiste en calentar el material durante un periodo de tiempo, para posteriormente dejarlo enfriar lentamente. El metal se calienta durante cierto tiempo a una temperatura determinada. Mediante este tratamiento se mejora la plasticidad y se ablandan los materiales, con el fin de que puedan ser trabajados con mayor facilidad (trabajo en frío); además, mejora la estabilidad dimensional y mejora las propiedades eléctricas de los metales. Este proceso para aceros al carbono produce una microestructura de ferrita-perlita.
Temple	Es un proceso de calentamiento y enfriamiento rápido de piezas metálicas. Este proceso típicamente se desarrolla de entre 815 a 870 ° C para los aceros y se enfría en diferentes medios dependiendo del material, entre los más comunes se utiliza agua, aceite y baños de sales. En la microestructura es característico de este proceso obtener una estructura martensítica. Con este tipo de tratamiento se busca un metal excesivamente duro, elevado esfuerzo de fluencia, elevados esfuerzos residuales y muy frágil.

Revenido	Es un proceso complementario que se da a aceros previamente endurecidos (templados). En este proceso se calienta al material a una temperatura debajo de la temperatura crítica de transformación, se mantiene la misma por un periodo de tiempo y luego se enfría a una tasa de temperatura adecuada. Con este tratamiento se pretende aumentar la ductilidad y la tenacidad, se alivian tensiones residuales y puede aumentar el tamaño de grano. Con este procedimiento se reduce un poco la dureza obtenida mediante el temple.
-----------------	---

2.1.2 Tratamientos termoquímicos en aceros

Los tratamientos termoquímicos son procedimientos de calentamiento y enfriamiento de los aceros, en las cuales se adicionan otros elementos a los elementos base en la superficie de las piezas; con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de forma localizada. A diferencia de los tratamientos térmicos, este tipo de tratamientos cambia la estructura atómica superficial de los materiales de substrato por el hecho de aportar otros elementos (2). La Tabla 2.1 muestra un resumen breve de los diferentes tipos de tratamientos termoquímicos:

Tabla 2.2 Principales Tratamientos termoquímicos para aceros (2)

Tratamiento termoquímico	Descripción y aplicación
Cementación	Es un proceso que consiste en la adición de carbono por difusión a la superficie de un acero de bajo contenido de carbono, con la finalidad de obtener una mayor dureza del material. Este proceso se desarrolla a una temperatura por sobre la temperatura austenítica del acero.
Nitruración	Es un proceso de endurecimiento del acero por difusión de nitrógeno a la superficie, con la finalidad de formar compuestos con el hierro que mejoren la resistencia al desgaste y corrosión del acero. Este proceso se desarrolla a temperaturas entre 500 y 600 °C.
Cianuración	Es un tratamiento que combina la cementación y la nitruración por medio de sales; la finalidad de este tratamiento es mejorar la dureza del acero, así como la resistencia al desgaste.
Sulfinación	Este proceso consiste en aportar carbono, nitrógeno y en especial azufre a la superficie de los aceros, con la finalidad de aumentar la resistencia al desgaste y para reducir el coeficiente de rozamiento.
Boronizado	Es un tratamiento termoquímico de difusión de átomos de boro en la superficie de un acero mediante el aumento de la temperatura que está sobre la transformación austenítica; con la finalidad de obtener en una misma pieza una capa superficial resistente al desgaste y un núcleo con alta tenacidad. Este proceso es utilizado generalmente para aceros de herramienta que necesitan una alta dureza.

2.1.3 Tratamientos mecánicos en aceros

Los tratamientos mecánicos son procedimientos que mejoran las características o propiedades de los aceros por deformación mecánica y pueden ser con calor o sin calor.

La tabla 2.3 muestra los dos tipos de tratamientos mecánicos aplicables a aceros (2):

Tabla 2.3 Principales Tratamientos mecánicos para aceros

Tratamiento Mecánico	Descripción
Tratamiento Mecánico en caliente (forja)	Este tratamiento consiste en el calentamiento del material a una temperatura determinada para, luego, deformarlo mediante impacto. Con este procedimiento disminuye el tamaño de grano y se elimina del material cavidades interiores; mejorando así la microestructura interna del material.
Tratamiento Mecánico en frío	Este tratamiento consiste en deformar el material a una temperatura ambiente ya sea con impacto o por el proceso de trefilado o laminación. Este tipo de tratamiento incrementa la dureza, así como la resistencia mecánica del material.

2.1.4 Recubrimientos superficiales en aceros

Los recubrimientos superficiales son procesos que mejoran la superficie de los aceros y en general de los metales sin variar la composición química del sustrato, mas bien adicionan una capa de un material distinto. Este tipo de tratamientos a diferencia de los tratamientos termoquímicos, no necesitan un calentamiento en las piezas a tratarse. La tabla 2.4 muestra los recubrimientos superficiales más comunes utilizados en la industria (2):

Tabla 2.4 Principales Tratamientos superficiales para aceros

Tratamiento Superficial	Descripción
Metalización	En este proceso se proyecta un metal fundido pulverizado sobre la superficie de otro; con esto se obtiene unir a la superficie de un metal las propiedades de otro diferente
Cromado duro	Este proceso consiste en la deposición de cromo electrolítico sobre la superficie del metal base; con la finalidad de mejorar la resistencia al desgaste y disminuir el coeficiente de rozamiento

2.2 Boronizado

2.2.1 Generalidades del proceso de Boronizado

El proceso de boronizado implica un sometimiento a alta temperatura del material en un rango de entre 700 a 1000 °C (1300 a 1830 °F), que va desde 1 a 12 horas; en contacto con un compuesto a base de boro, sea este sólido, líquido o gaseoso. Este proceso puede ser aplicado a una variedad de materiales ferrosos, no ferrosos y hasta materiales cerámicos. Existen diferentes técnicas para realizar el proceso de boronizado entre las que se pueden citar: empaquetamiento con boro, boronizado con pastas, boronizado líquido, boronizado gaseoso, boronizado por plasma, y boronizado por lecho fluidizante (4).

2.2.1.1 Características de la superficie boronizada

La superficie de boro resultante de la difusión en la superficie del material base presenta compuestos de características intersticiales, los cuales pueden consistir en una sola fase de boruro o una capa de boruro polifásico (4).

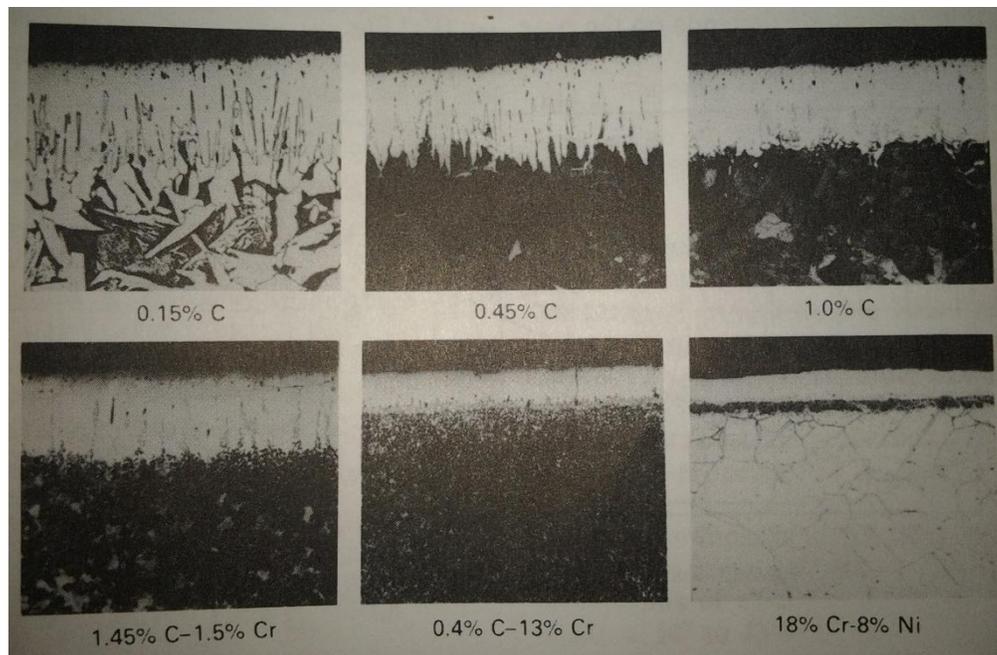


Figura 2.2 Morfología de la capa de boronizado sobre aceros (4)

La morfología, el crecimiento y la formación de la capa de boruro pueden ser influenciados por los elementos de aleación propios del material base. La microdureza de la capa boronizada depende en gran medida también de la composición y estructura de la capa boronizada, así como también de la composición del material base (4). La tabla 2.5 muestra la variación de la dureza considerando las variaciones de las diferentes fases que se forman durante el proceso de boronizado con diferentes sustratos de las aleaciones de los aceros, así como los puntos de fusión de dichas fases.

Tabla 2.5 Microdureza y puntos de fusión para diferentes fases formadas durante el proceso de boronizado (4)

Substrato	Constituyentes de las fases de la capa boronizada	Microdureza de la capa [HV] ó [Kg/mm ²]	Punto de fusión [°C]
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	-
Co	CoB	1850	-
	Co ₂ B	1500-1600	-
	Co ₃ B	700-800	-
Co-27.5 Cr	CoB	2200(100g carga)	-
	Co ₂ B	~ 1550(100g carga)	-
	Co ₃ B	700-800	-
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	-
	Ni ₂ B	1500	-
	Ni ₃ B	900	-
Inco 100	...	1700 (200g carga)	-
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	Mo ₂ B	2330	~2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	~1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB	-	-
	TiB ₂	3000 (100g carga)	-
Nb	NbB ₂	2200	3050
	NbB ₄	-	-
Ta	Ta ₂ B	-	3200-3500
	TaB ₂	2500	3200
Hf	HfB ₂	2900	3250
Zr	ZrB ₂	2250	3040

2.2.1.2 Ventajas del proceso de boronizado

- Las capas boronizadas presentan valores de dureza muy elevados (oscilan entre 1450 y 5000 HV) y que además sus fases constituyentes tienen altos puntos de fusión. Con lo que se comprueba que las superficies boronizadas presentan una dureza mucho mayor en comparación con cualquier otro tratamiento de endurecimiento convencional, tal como se muestra en la tabla 2.6 (4).

Tabla 2.6 Medidas de microdureza de aceros boronizados en comparación con otros tratamientos y materiales duros (4)

Material	Microdureza [HV] ó [Kg/mm ²]
Acero de mediana aleación boronizado	1600
Acero AISI H3 boronizado	1800
Acero AISI A2 boronizado	1900
Acero Templado	900
Acero templado y revenido H13	540-600
Acero templado y revenido A2	630-700
Acero rápido BM42	900-910
Aceros Nitrurizados	650-1700
Aceros de baja aleación cementados	650-950
Enchapado con cromo	1000-1200
Carburos cementados, WC + Co	1160-1830
Cerámico Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	1483
Cerámico Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	1738
Cerámico Sialon	1569
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Diamante	>10000

- Las superficies boronizadas al presentar superficies con alta dureza y coeficientes de fricción bajos contribuyen en la lucha contra los mecanismos de desgaste principales: adhesión, tribo-oxidación, abrasión y fatiga superficial por rodadura (4).
- La dureza de las superficies boronizadas se mantienen a altas temperaturas, incluso mayores a las del nitrurado (4).

- La compatibilidad del proceso enmarca una amplia variedad de aceros, en particular los aceros que se pueden endurecer o de trabajo en frío (8).
- El proceso de boronizado aumenta considerablemente la resistencia a la corrosión y la erosión de los materiales ferrosos en ácidos no-oxidantes diluidos y en medios alcalinos; por esta razón el proceso de boronizado es utilizado en varias aplicaciones industriales (9).
- Las superficies boronizadas presentan resistencia a la oxidación moderada (hasta 850 ° C) y son altamente resistentes al ataque de materiales fundidos (4).
- Las piezas boronizadas presentan un incremento en la vida a la fatiga y altos rendimientos bajo entornos oxidantes y corrosivos (4).

2.2.1.3 Desventajas del proceso de boronizado

- El proceso de boronizado presenta técnicas que implican una labor intensa, mayor cantidad de operación y mano de obra (10).
- El incremento en el volumen que resulta del proceso de boronizado en las piezas, va desde 5% a 25% del espesor de la capa. Por ejemplo 25 micras del material difundido se prevé un crecimiento de la pieza entre 1,25 a 6,25 micras. Este crecimiento depende en gran medida de los componentes del material base, sin embargo se mantiene constante para una variación dada de material y ciclo de tratamiento. Por lo que es necesario para piezas con tolerancias de precisión calcular la remoción con el fin de que no sea necesario remover la capa boronizada (4).
- Para la remoción parcial de la capa de boruro de piezas con tolerancias de extrema precisión es necesario un lapeado de la superficie con diamante, ya que las técnicas convencionales con granalla fracturan el recubrimiento. Por esta razón, el proceso de boronizado es usado principalmente para componentes con una gran área de sección transversal (10).
- La mayoría de los aceros presentan un incremento marginal en el límite de la resistencia a la fatiga de flexión y resistencia a la fatiga por corrosión (4).
- Las propiedades de fatiga por contacto para aceros aleados es menor en comparación con la cementación y la nitruración con cargas de contacto altas

(2000 N). Esta es la razón por la que en diseño de engranajes, el proceso de boronizado se limita a diseños que minimizan la carga transversal de los dientes del engranaje (10).

- Frecuentemente es necesario temprar y revenir las herramientas luego del proceso de boronizado, para lo cual se requiere un vacío o una atmósfera inerte con el fin de preservar la integridad de la capa de boro (4).

2.2.2 Proceso de Boronizado

El proceso de boronizado consta de dos tipos de reacción (11). Primeramente ocurre una reacción de nucleación que ocurre entre la superficie del componente base y el compuesto de boro; esta reacción de nucleación es función del tiempo y la temperatura y da origen a una capa delgada de boruro compacto. Posteriormente ocurre la reacción que es controlada por la difusión (4). El espesor total de la capa boronizada para una determinada temperatura se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$d = k\sqrt{t} \quad (\text{Ecuación 2.1}) \quad (4)$$

Donde d es el espesor o profundidad de la capa del proceso de boronizado; k es una constante que depende de la temperatura, así como la composición química del material al cual se va a difundir el compuesto de boro y el gradiente de concentración de la especie de endurecimiento, y t es el tiempo en segundos a una temperatura dada (4).

La difusividad del boro a 950°C (1740°F) es $1,82 \times 10^{-11}$ [m^2/s] para la capa boronizada y $1,53 \times 10^{-10}$ [m^2/s] para la zona de difusión, por lo tanto la zona de difusión que contiene boro se extiende 7 veces la profundidad del espesor de la capa boronizada en el substrato (12). De esta manera se puede decir que el crecimiento de la capa boronizada es debido a un gradiente de concentración que funciona como fuerza motriz para que ocurra la difusión controlada hacia el material substrato (4).

Para la difusión en aleaciones de hierro generalmente se obtienen espesores máximos aproximados de 130 [μm], esto depende directamente de las composiciones de las aleaciones y las configuraciones. Para aceros de herramienta con un contenido alto de carbono y/o alta aleación se obtiene una profundidad menor, en tanto que para aceros con bajo y medio contenido de carbono los espesores resultan ser mayores. Cuando la

profundidad del proceso de boronizado alcanza entre 320 y 350 [μm] no es necesario realizar un tratamiento térmico posterior (4).

2.2.3 Boronizado de materiales Ferrosos

2.2.3.1 Generalidades

El boronizado en materiales ferrosos resulta de la formación de una capa que puede contener una sola fase de boruro o doble fase con composiciones bien definidas. La capa que contiene una sola fase consiste en Fe_2B ; en tanto que la capa con doble fase consta de un grabado exterior oscuro que representa la fase FeB (Boruro de Hierro) y un grabado interior brillante que representa la capa Fe_2B (4). La formación de las capas con una sola fase o bien con dos fases depende directamente del diagrama de equilibrio Hierro-Boro, que se muestra en la figura 2.3.

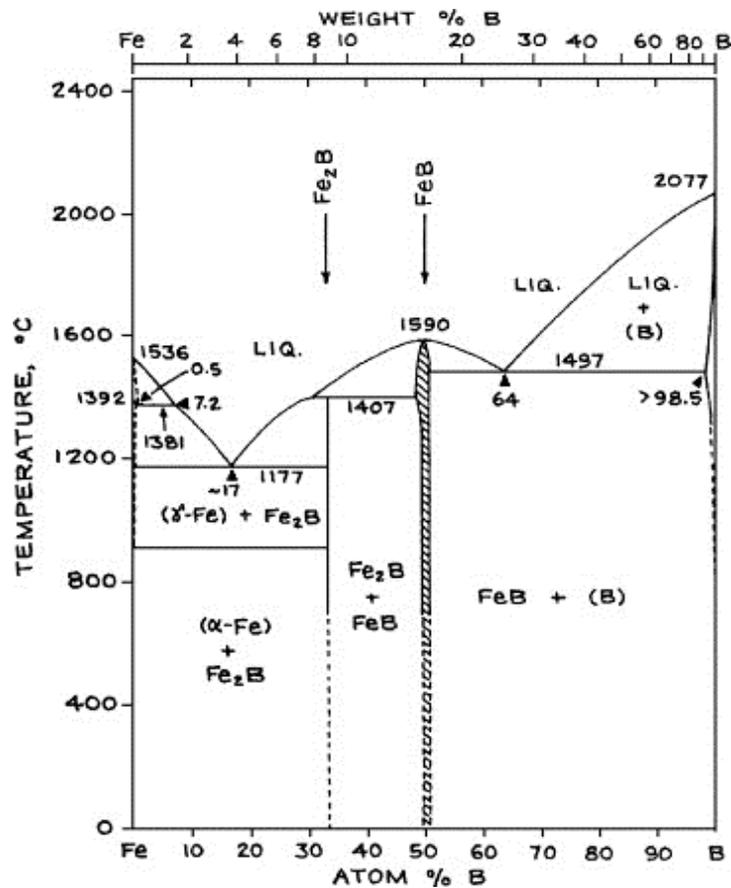


Figura 2.3 Diagrama de equilibrio Hierro-Boro (13)

2.2.3.2 Características de las capas FeB y Fe₂B

La formación de la capa de fase única Fe₂B que presenta una morfología de dientes de sierra (que en gran medida se debe a la dirección de difusión preferida); es más deseable que la capa de doble fase formada por FeB y Fe₂B. Esto se debe a que la fase de Boruro de hierro (FeB) presenta mayor fragilidad en comparación con la capa de Fe₂B (4).

Por otro lado debido a que la capa de doble fase compuesta por FeB y Fe₂B, se forma bajo tensiones residuales de tracción y compresión, respectivamente, es observable con frecuencia la formación de grietas en o dentro de la interfaz FeB/Fe₂B que pueden ocasionar descamación o desprendimiento al aplicar una tensión mecánica o incluso la separación cuando un componente es sometido a aislamientos térmicos o golpeteos mecánicos. Por lo tanto es recomendable reducir la formación de la capa rica en boro FeB (14).

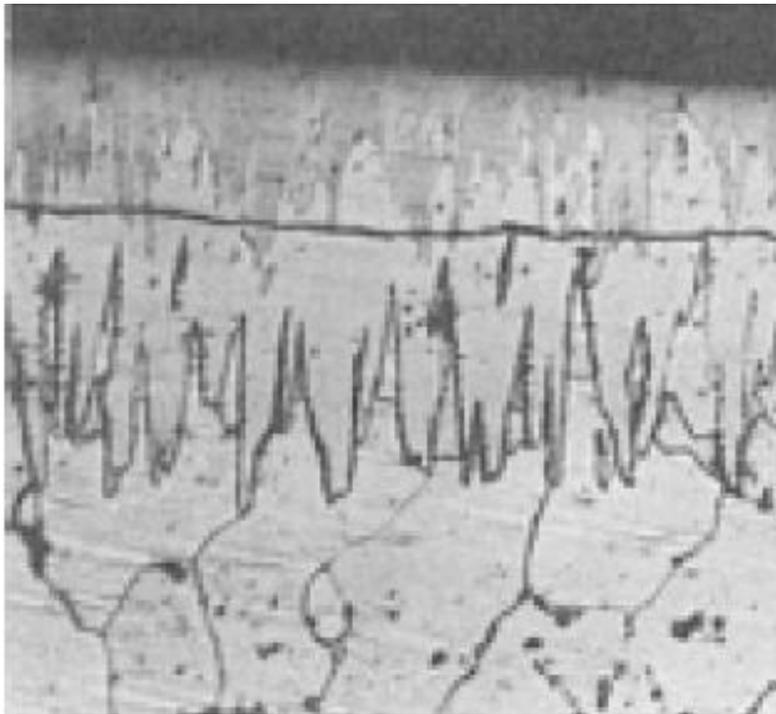


Figura 2.4 Morfología de capa de doble fase FeB y Fe₂B de boronizado para un acero de bajo contenido de carbono (4 horas de boronizado / 900° C) (14).

2.2.3.2.1 Propiedades de la fase FeB

La fase de Boruro de hierro (FeB) que se forma del proceso de boronizado para materiales ferrosos presenta las siguientes características:

- Microdureza entre 1937 y 2141 [HV]
- Módulo de elasticidad: 590 [GPa] (85×10^6 [psi])
- Densidad: $6,75 \text{ g/cm}^3$ ($0,224 \text{ lb/in}^3$)
- Coeficiente térmico de expansión: 23 ppm/°C (13 ppm/°F) en el rango de 200 a 600 °C (400 a 1100 °F)
- Composición con 16,23% en peso de boro
- Estructura de cristal ortorrómbica con 4 átomos de hierro y 4 átomos de boro por celda unitaria
- Parámetros de red: $a= 4,053 \text{ \AA}$, $b= 5,495 \text{ \AA}$ y $c=2,946 \text{ \AA}$

2.2.3.2.2 Propiedades de la fase Fe₂B

La fase de Fe₂B es más deseable que la fase FeB por ser menos frágil; las características que presenta esta fase son las siguientes:

- Microdureza entre 1835 y 2039 [HV]
- Módulo de elasticidad: 285-295 [GPa] (41×10^6 - 43×10^6 [psi])
- Densidad: $7,43 \text{ g/cm}^3$ ($0,268 \text{ lb/in}^3$)
- Coeficiente térmico de expansión: 7,65 ppm/°C (4,25 ppm/°F) en el rango de 200 a 600 °C (400 a 1100 °F) y 100 a 800 °C (200 a 1500 °F)
- Composición con 8, 83% en peso de boro
- Estructura tetragonal centrada en el cuerpo con 12 átomos por celda unitaria
- Parámetros de red: $a= 5,078 \text{ \AA}$, y $c=4,249 \text{ \AA}$

2.2.3.3 Materiales Ferrosos para boronizado

El boronizado puede llevarse a cabo en la mayoría de los materiales ferrosos como aceros estructurales, aceros para temple, aceros endurecidos y aceros inoxidable; así como también en aceros de fundiciones, fundiciones grises y dúctiles, Armco de hierro y

sinterizados de hierro y acero. Solamente existe excepción con los aceros con aleaciones de aluminio y aceros para rodamientos aleados con silicio (15).

Debido a que el proceso de boronizado se realiza en el intervalo austenítico, los aceros que se endurecen al aire pueden ser endurecidos y boronizados simultáneamente; por el contrario los aceros que son endurecidos gradualmente con agua no son recomendables luego del boronizado, ya que la capa de boro es muy sensible al choque térmico; de igual manera las partes que se encuentran resulfuradas y aceros con plomo, ya que tienen tendencia al agrietamiento. Los aceros nitrurados tampoco son recomendables puesto que tienen alta sensibilidad a la formación de fisuras (16).

2.2.3.4 Influencia de los materiales de aleación para el proceso de boronizado

Las propiedades mecánicas de las capas boronizadas dependen directamente de la composición y estructuras de las fases que se forman conjuntamente con el compuesto de boro y el sustrato. Como se observa en el apartado 2.3.3.2 la morfología de dientes de sierra es dominante para fases de boro con hierro puro, aceros con bajo contenido de carbono sin aleaciones y aceros de baja aleación. Sin embargo, a medida que los elementos de aleación y/o el contenido de carbono del acero de sustrato aumentan los dientes de sierra van suprimiéndose (17). Para aceros con alta aleación se forma una capa fina y sin relieves. En general los elementos aleantes del material sustrato retardan el espesor (o crecimiento) de la capa boronizada, debido a que éstos forman una barrera para la difusión. La figura 2.5 muestra los efectos que sufre el espesor por los elementos aleantes presentes en los aceros (18) (19).

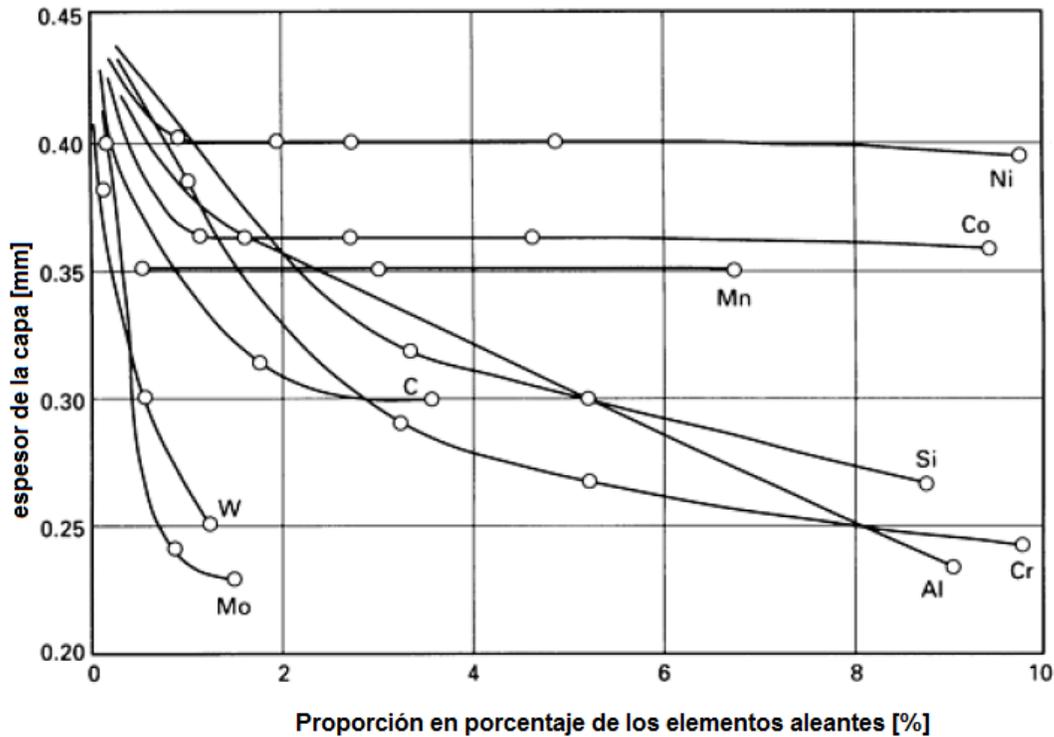


Figura 2.5 Efectos de los elementos aleantes en los aceros para el espesor de la capa boronizada (18) (19)

El carbón por su parte no se disuelve y tampoco se difunde significativamente en la capa que forma el proceso de boronizado. Durante el proceso de boronizado, el carbono se difunde a distancia de la capa de boronizado de la matriz y puede formar junto con el boro, boro-cementita $Fe_3(B, C)$ [más apropiadamente $Fe_3(B_{0,67}C_{0,33})$ para un acero de hierro con 0,08% de C], como una capa apartada de la matriz principal entre el substrato y Fe_2B (20) (21).

2.2.3.5 Tratamiento Térmico luego del proceso de boronizado

Las partes boronizadas pueden ser endurecidas en aire, aceite, baño de sales o con algún polímero. Siempre y cuando estos procesos se lleven a cabo en un ambiente protector libre de oxígeno o un baño de sal neutra, con la finalidad de no permitir que la capa de boro se desprenda del material substrato por difusión hacia el medio circundante (22).

2.2.3.6 Aplicaciones de la capa boronizada según su espesor

El espesor de la capa boronizada depende directamente del material substrato que se utiliza para el proceso de boronizado, el potencial del compuesto de boro, la temperatura de boronizado y el tiempo (4).

Así las capas delgadas entre 15 y 20 micras se utilizan para la protección contra el desgaste adhesivo (desprendimiento de viruta, estampado de metal con punzones y herramientas). En tanto que las capas gruesas son recomendadas para combatir el desgaste erosivo (extrusión de plástico y herramientas de presión para la industria cerámica) (4).

Los espesores de la capa boronizada comúnmente encontrados para aceros de baja aleación y bajo contenido de carbono oscilan entre 0,5mm y 0,25mm. Por otro lado para aceros con alta aleación esta profundidad es reducida entre 0,025 y 0,076 mm (4).

2.2.4 Técnicas Termoquímicas del proceso de boronizado

Las técnicas descritas en esta sección se centran en las técnicas utilizadas para boronizado de materiales féreos por las extensas investigaciones en este campo del proceso de boronizado (4). Entre las técnicas más comunes se encuentran: Empaquetamiento con boro, boronizado con pastas, boronizado líquido, boronizado por gas, boronizado por plasma y boronizado por lecho fluidizante.

2.2.4.1 Empaquetamiento con boro

El empaquetamiento o “pack boronizing” en inglés, con boro constituye una de las técnicas más utilizadas por su relativa facilidad de manipulación y seguridad. Esta técnica permite cambiar la mezcla de composición de polvos, la utilización de un equipo limitado y por lo tanto un ahorro económico en el desarrollo de esta técnica de boronizado (23).

La técnica consiste en el empaquetamiento de las partes templadas, limpias y lisas con una mezcla de polvos de boro contenida en una caja de acero resistente al calor que tiene entre 3 a 5 mm de espesor (0,1 a 0,2 in). En este proceso las superficies de las partes a boronizar deben estar cubiertas aproximadamente con una capa gruesa de 10 a 20 mm (0,4 a 0,8 in) con el compuesto de boro.

Los compuestos de boro utilizados para esta técnica pueden ser sustancias sólidas que producen boro, dispersantes y activadores. Entre las sustancias más usadas se encuentra el Carburo de boro (B_4C), Ferroboro y boro amorfo. El Carburo de Silicio (SiC) y la alúmina (Al_2O_3) sirven como dispersantes en este proceso y no toman parte en la reacción, sin embargo el Carburo de Silicio (SiC) sirve para controlar la cantidad de boro y evita que se hagan grumos del agente de boronizado (4).

En este proceso las partes contenidas en el recipiente son expuestas a temperaturas de boronizado en una caja u olla refractaria, denominada “retorta” y que está debidamente cerrada. El tamaño del contenedor no debe exceder el 60% del volumen de la cámara del horno. Teóricamente, el boronizado debe ser realizado de tal manera que las altas tensiones internas se alivian, y a su vez, se eliminan fisuras o desprendimientos. Con el proceso de empaquetamiento, el polvo puede ser reutilizado mezclando 20% a 50% en peso con polvo nuevo. En este caso, el polvo debe ser desechado después de 5 o 6 ciclos (4).

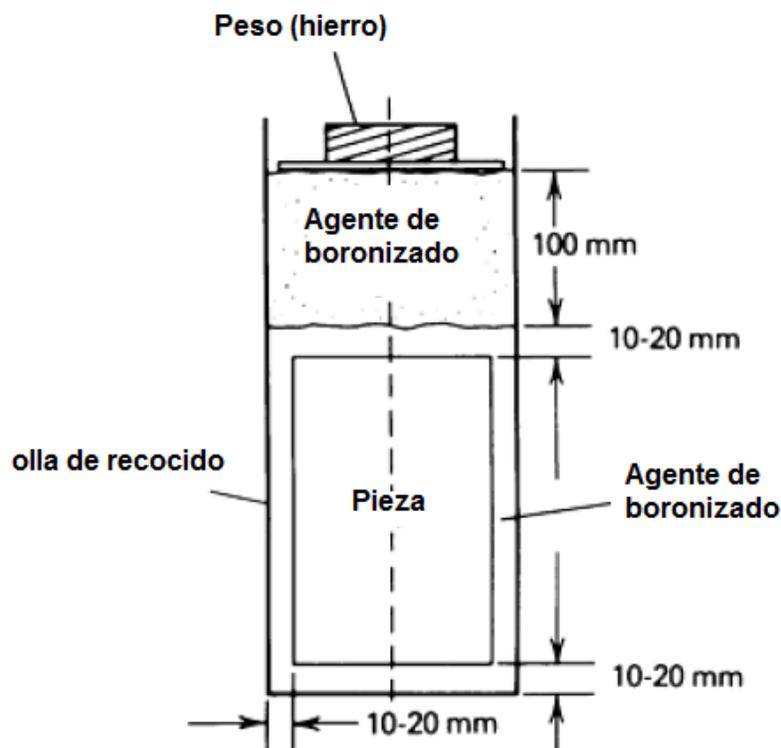


Figura 2.6 Diagrama del boronizado por empaquetamiento (4)

2.2.4.2 Boronizado con pastas

El boronizado con pastas es utilizado cuando el boronizado por empaquetamiento resulta difícil, con altos costos y mayor tiempo de consumo. En este proceso se utiliza una pasta de 45% de Carburo de Boro (B_4C) y 55% de criolita (Na_3AlF_6 , aditivo fundente) (24) ó una mezcla convencional de polvos para boronizado (B_4C -SiC-KBF₄), los cuales están conjuntamente con un buen agente de unión tal como nitrocelulosa disuelto en acetato de butilo, solución acuosa de metilcelulosa ó hidrolizados de silicato de etilo. En este proceso se aplican repetidamente en intervalos los compuestos descritos anteriormente ya sea por cepillado o pulverizado sobre las superficies de las piezas, hasta que éstas luego de secarlas presenten una capa de espesor de aproximadamente de 1 a 2 mm (0,04 a 0,08 pulgadas). Posteriormente los materiales tratados deben ser calentados por inducción (900°C por 4 horas), por resistencia o en un horno convencional (entre 800°C y 1000°C durante 5 horas) y alrededor de una atmósfera protectora (por ejemplo argón, NH_3 , ó N_2). Este proceso es utilizado generalmente para componentes grandes y aquellos procesos donde se requiere un recubrimiento parcial o selectivo de boronizado (11).

2.2.4.3 Boronizado líquido

El boronizado líquido puede llevarse a cabo por baño de sales no electrolítico y baño de sales electrolítica; sin embargo estas técnicas presenta desventajas tales como: la necesaria eliminación del exceso de sal y boro que no reaccionan luego del tratamiento, altos costos: 1) por el mantenimiento, ya que no se debe permitir que la viscosidad del baño aumente, 2) por el control de la emisión de gases corrosivos propios de esta técnica (4).

2.2.4.3.1 Boronizado líquido con baño de sales no electrolítico

Esta técnica es llevada a cabo mediante una masa fundida de bórax a la que se añade aproximadamente 30% en peso de B_4C ; a una temperatura entre 900°C y 950°C (25). Para obtener mejores resultados se puede sustituir B_4C hasta por encima de un 20% con ferro-aluminio que es un reductor más eficaz (4).

2.2.4.3.2 Boronizado líquido con baño de sales electrolítico

En este proceso el material ferroso es inmerso en bórax electrolítico fundido a 940 °C por cuatro horas y sobre él se coloca grafito, luego se hace pasar una corriente de aproximadamente 0,15 A/cm² (26). De esta manera el material ferroso actúa como cátodo y el grafito como ánodo; es importante citar que para obtener una capa uniforme se debe hacer girar el material durante el tratamiento.

Mediante este proceso se produce una fina capa para aceros con baja aleación con una alta densidad de corriente en poco tiempo; en tanto que para aceros de alta aleación se consigue un mayor grosor de la capa con menores densidades de corriente pero por más tiempo (27).

2.2.4.4 Boronizado por Gas

El proceso de boronizado por gas puede llevarse a cabo con: una mezcla de diborano (B₂H₆)-H₂, Boro halide-H₂ ó una mezcla de gases de N₂-H₂ en un proporciones 75:25 y compuestos orgánicos de boro tales como (CH₃)₃B y (C₂H₅)₃B.

Por su toxicidad, peligrosidad de manejo y altos costos esta técnica es utilizada generalmente para titanio y sus aleaciones (4).

2.2.4.5 Boronizado por plasma

En el proceso de boronizado por plasma se utilizan generalmente las mezclas de B₂H₆-H₂ y BCl₃-H₂-Ar (28). Este proceso (Figura 2.7.). Se utiliza generalmente para controlar la composición y la profundidad de la capa boronizada, de ahí que el potencial del compuesto de boro se puede mejorar en comparación con la técnica de empaquetamiento de boro. Así mismo es utilizado por la reducción en temperatura y tiempo del proceso de boronizado, por lo cual no es necesario un horno de temperaturas elevadas, obteniendo así un ahorro en energía y consumo de gas. Sin embargo este proceso es extremadamente tóxico por la atmósfera que emplea, por esta razón esta técnica no ha tenido aceptación comercial (4).

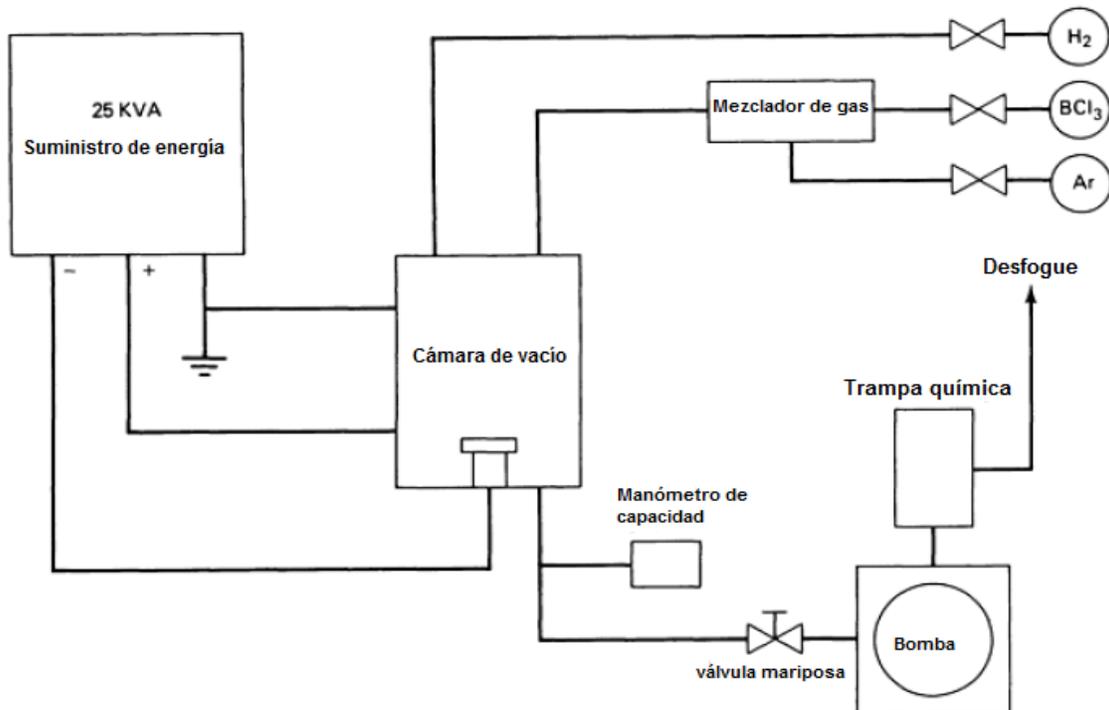


Figura 2.7 Diagrama del proceso de boronizado por plasma (4)

2.2.4.6 Boronizado por lecho fluidizante

El boronizado por lecho fluidizante (Figura 2.8) es una técnica innovadora en la industria del boronizado. Esta técnica utiliza una cama de partícula gruesa de Carburo de Silicio (SiC), un compuesto en polvo especial de boro como Ekabor y un gas libre de oxígeno de preferencia (N₂-H₂ ó Ar). En este proceso como la electricidad es usada como fuente de calor, la cama de carburo de silicio y compuesto de boro sirven como un medio de transferencia de calor rápido (4).

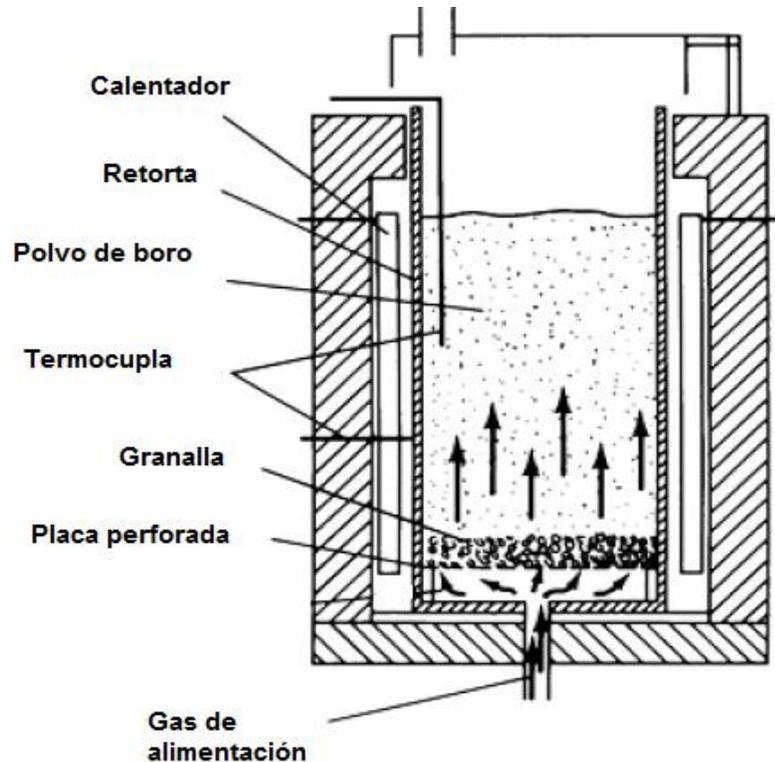


Figura 2.8 Diagrama del proceso de boronizado por lecho fluidizante (4)

Mediante esta técnica se pueden conseguir altas tasas de calentamiento y flujo, lo que representa un ciclo más corto de funcionamiento. Así mismo con este procedimiento se puede conseguir una uniformidad de temperatura en las piezas a tratar con bajo costos y flexibilidad de utilización de equipos. Por otro lado este proceso garantiza la reproducibilidad y tolerancias estrechas, debido a su acabado muy uniforme en reproducción masiva.

Sin embargo una importante desventaja que presenta esta técnica de boronización reside en el continuo lavado dentro de la retorta por el gas inerte, ocasionando compuestos enriquecidos con flúor. Para lo cual con la finalidad de evitar los problemas ambientales se sugiere un sistema absorbente con Carbonato de calcio (CaCO_3).

La presente tesis utiliza la técnica de lecho fluidizante descrita en 2.2.4.6 y empaquetamiento descrita en 2.2.4.1. Los compuestos varían con respecto a lo descrito en estos acápite, pero la técnica básicamente se reproduce. Se puede considerar la difusión de boro al substrato desde el estado gaseoso al sólido, por lo que el boronizado aquí se

puede considerar una técnica de CVD (chemical vapor deposition, o deposición química de vapor).

2.2.5 Aplicaciones industriales del proceso de boronizado

Actualmente el proceso de boronizado es utilizado en varias aplicaciones industriales, debido a sus numerosas ventajas en cuanto a propiedades de sus capas se refiere. Las principales aplicaciones del proceso de boronizado en varios aceros se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.7 Principales aplicaciones del proceso de boronizado en materiales ferrosos (9)
(15)

Material Substrato			Aplicaciones
AISI	BSI	DIN	
		St37	Pernos, boquillas, tubos transportadores, placas base, correedores, cuchillas, guías de roscas
1020	---	C15(Ck15)	Engranajes, ejes de bombas
1043	---	C45	Pines, guía de anillos, discos de pulido, tornillos
		St50-1	Insertos de fundición, boquillas, manijas
1138	---	45S20	Camisas de protección para ejes, mandriles
1042	---	Ck45	Elementos rotacionales, toberas para quemadores (petróleo), rodillos, tornillos, placas de puerta
		C45W3	Bisagras
W1	---	C60W3	Mandriles de sujeción, barras de guía
D3	---	X210Cr12	Herramientas de prensa, platos, mandriles, punzones, matrices
C2	---	115CrV3	Matriz para punzones, eyectores, guías, pines de inserción
		40CrMnMo7	Bisagras, matrices de flexión
H11	BH11	X38CrMoV51	Émbolos, cilindros de inyección, colada
H13	---	X40CrMoV51	Orificios, lingoteras, troqueles y matrices para discos de formación caliente
H10	---	X32CrMoV33	Matrices de moldeo por inyección, rellenos, superior e inferior troqueles y matrices para la conformación en caliente
D2	---	X155CrVMo12 1	Rodillos roscados, tallados y prensados; moldes y matrices
		105WCr6	Rodillos de grabado
D6	---	X210CrW12	Rodillos de enderezado
S1	~BS1	60WCrV7	Prensas, matrices, mandriles, camisas, anillos
D2	---	X165CrVMo12 1	Matrices, rodillos para laminado en frío
L6	BS224	56NiCrMoV7	Troqueles de extrusión, pernos, insertos de fundición, troqueles de forja, fraguas
		X45NiCrMo4	Cojinetes de presión y pines

O2	~BO2	90MnCrV8	Moldes, matrices de flexión, herramientas de prensas, rodillos de grabado, matrices, barras de guía, discos, punzones de perforación
E521 00		100Cr6	Bolas, rodillos, barras de guía, guías
		Ni36	Piezas de equipo para fundición de metales no ferrosos
		X50CrMnNiV2 29	Partes de herramientas que no se magnetizan
4140	708A42	42CrMo4	Prensa herramientas y troqueles, tornillos extrusores, rodillos, extrusores, válvulas de retención
4150	~708A42(C DSI5)	50CrMo4	Placas de boquillas de base
4317	---	17CrNiMo6	Los engranajes cónicos, tornillos y engranajes de las ruedas, ejes, componentes de cadena
5115	---	16MnCr5	Engranajes helicoidales, barras de guía
6152	---	50CrV4	Placas de empuje, dispositivos de sujeción, muelles de válvula, contactos de resorte
302	302S25 (EN58A)	X12CrNi188	Tornillos
316	~316S16 (EN58J)	X5CrNiMo181 0	Placas perforadas o ranuradas, piezas para la industria textil y del caucho
		G- X10CrNiMo18 9	Tapones de válvulas, piezas para la industria textil y química
410	410S21 (En56A)	X10Cr13	Componentes de la válvula, accesorios
420	~420S45(EN 56D)	X40Cr13	Componentes de válvulas, vástagos de émbolo, accesorios, guías, partes de plantas químicas
		X35CrMo17	Ejes y válvulas
Fundición gris y dúctil			Repuestos para maquinaria textil, moldes, mandriles, camisas

3 Método Experimental

3.1 Propuesta de desarrollo

3.1.1 Método

El objetivo de esta tesis es el desarrollo del proceso de boronización por la técnica de empaquetamiento de boro (Sección 2.2.4.1), la cual utiliza un horno para tratamientos térmicos, la inyección de un gas inerte y una retorta donde se colocará el compuesto con boro (Ekabor®2) y los materiales sustrato a tratar. Esta técnica se la utiliza por ser de menor complejidad en comparación con los otros procedimientos descritos con anterioridad en la sección 2.3.4.

Para empezar con el desarrollo del proceso de boronizado se debe implementar una retorta (cámara para producir la difusión del boro en las piezas de sustrato) al horno disponible en el laboratorio del Departamento de Química de la USFQ; para lo cual se debe diseñar y construir un prototipo de retorta que se ajuste a los requerimientos del desarrollo del proceso de boronizado, así como a las medidas del horno disponible en el laboratorio antes mencionado. El diseño y la construcción de este prototipo de retorta se detallan en la sección 3.2.1

Luego para realizar el proceso de boronizado se debe elegir los materiales que van a ser utilizados como sustrato, detallados en la sección 3.1.3. La elección de estos materiales está basada de acuerdo a la literatura del desarrollo del proceso, la disponibilidad de los mismos en el mercado ecuatoriano y las aplicaciones que puedan brindar en la industria.

Posteriormente para la realización del estudio se efectúan tres fases exploratorias, en las condiciones de tiempo y temperatura que se explican más adelante en este mismo documento en la sección 3.1.4. En resumen, Las fases 1 y 2 sirven como comprobación de realización del proceso de boronizado por empaquetamiento y la fase 3 se desarrolla como el estudio y optimización del proceso para algunos materiales utilizados con

frecuencia en la industria, con lo que se pretende establecer parámetros de tiempo y temperatura para estudios posteriores o aplicaciones industriales.

Una vez realizada la difusión, la microestructura es analizada y se mide la dureza y microdureza de las probetas considerando la temperatura y tiempo de exposición.

3.1.1.1 Proceso de boronización por empaquetamiento y lecho fluidizante

El proceso de boronizado por empaquetamiento y por lecho fluidizante de acuerdo a las especificaciones por la empresa manufacturera del polvo para difusión BORTEC, requiere una retorta, un horno controlable que soporte las temperaturas para el desarrollo del proceso, un tanque con gas inerte, las conexiones pertinentes hacia la retorta y un medio o compuesto en base a boro para que se difunda en el material sustrato.

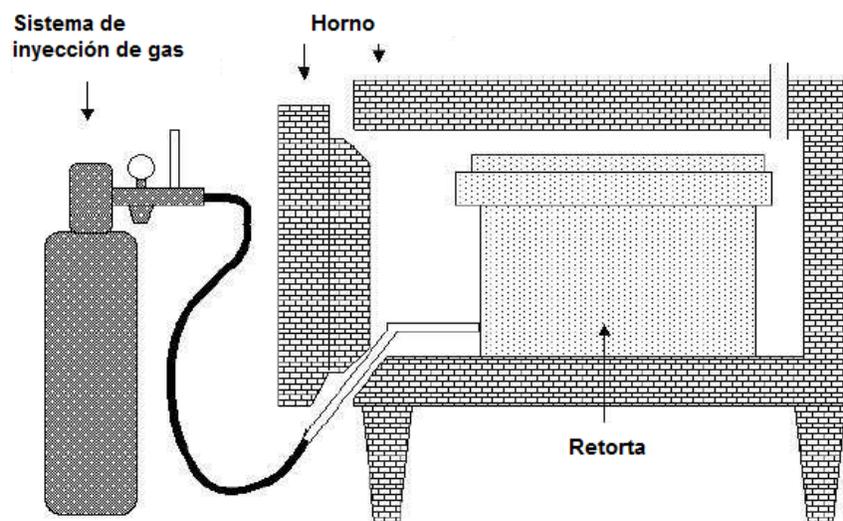


Figura 3.1 Esquema de proceso de boronizado (29)

3.1.2 Equipos y materiales para el desarrollo del proceso de boronizado

3.1.2.1 Compuesto de Boro (Ekabor®2) (30)

Como compuesto de alta concentración de boro se utilizó el compuesto Ekabor®2, producto que de acuerdo a la hoja de información del fabricante contiene una mezcla de carburo de silicio, boro y fluoruro.

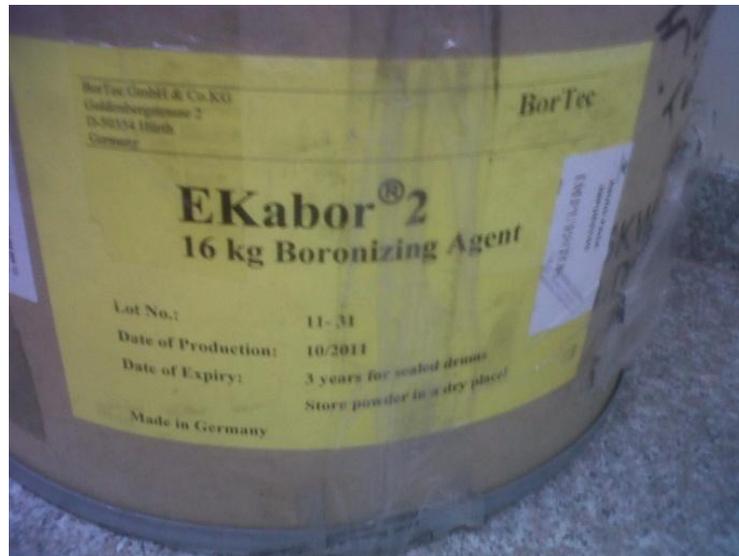


Figura 3.2 Compuesto de boro Ekabor®2

Este compuesto se vende comercialmente en forma de polvo de color negro oscuro con un olor característico y un tamaño de grano menor a los 1000[μm]. Por cuestiones de marcas registradas no se es posible conocer con exactitud la composición de Ekabor®2, en el ANEXO C se presenta la hoja de seguridad del material e información básica del producto entregada por la casa comercial Bortec.



Figura 3.3 Polvo Ekabor®2

3.1.2.2 Retorta

La retorta es una cámara sellada para producir una atmósfera rica en boro que permite la difusión del boro en las piezas de substrato. La retorta se introduce en el horno para alcanzar la temperatura deseada. La retorta posee conexiones de entrada y salida para el gas protector. El diseño de la retorta se detalla en la sección 3.2.1. En la siguiente imagen se presenta un esquema de retorta y los elementos que debe contener.

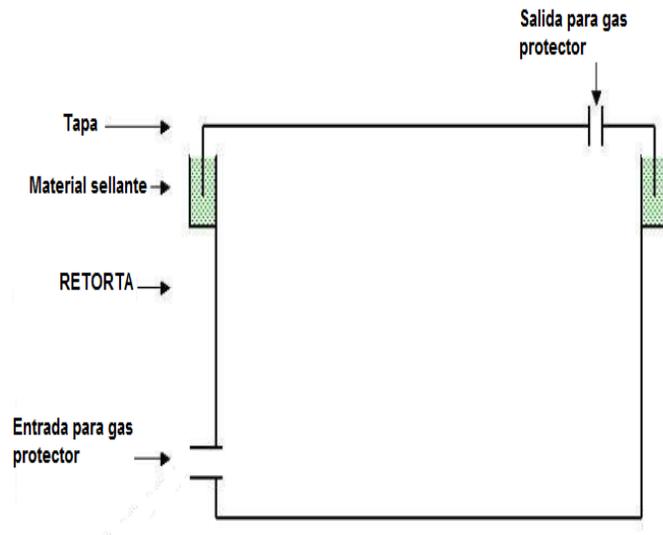


Figura 3.4 Esquema de retorta (29)

3.1.2.3 Horno

El horno utilizado para el desarrollo del proceso de boronizado es un horno de resistencia eléctrica digital Thermolyne de la casa comercial Thermo Scientific (1800 Watts). Es un horno digital controlable que posee un sensor de temperatura (termocupla) en su interior para verificación de temperatura de la cámara. Este horno se presenta en la siguiente figura.



Figura 3.5 Horno Thermo Scientific

El comportamiento de calentamiento del horno se reporta en la figura 3.6 hasta alcanzar la primera temperatura de experimentación (850°C). En la figura 3.6 se puede observar que el horno se estabiliza aproximadamente en 90 minutos.

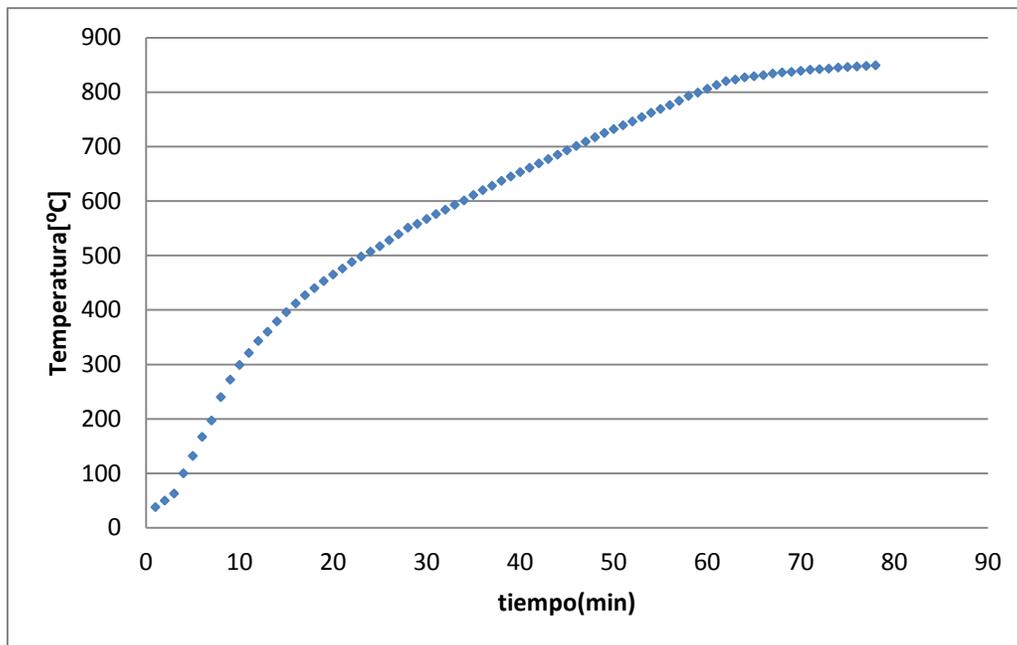


Figura 3.6 Temperatura vs Tiempo Horno Thermo Scientific

3.1.2.4 Gas Argón

El gas utilizado como protector del proceso es el argón (Ver hoja de seguridad ANEXO E). Este gas se utiliza para minimizar la presencia de oxígeno dentro de la retorta, ya que los compuestos oxigenados afectan al material base por oxidación que no es deseable para el desarrollo del proceso de boronizado.

Para la inyección del gas Argón se utilizó una válvula IO@xygen, con un manómetro de presión del tanque y un regulador de flujo. Se sugiere un flujo de máximo 3 litros/ min para el proceso. Se utilizó un flujo de 1 litro/ min en todos las fases experimentales.



Figura 3.7 Válvula de Argón IO@xygen

3.1.2.5 Carbonato de Calcio

El carbonato de calcio se utilizó para retener (absorber) los gases de fluorina que son acarreados durante el desarrollo del proceso de boronizado por el gas Argón;

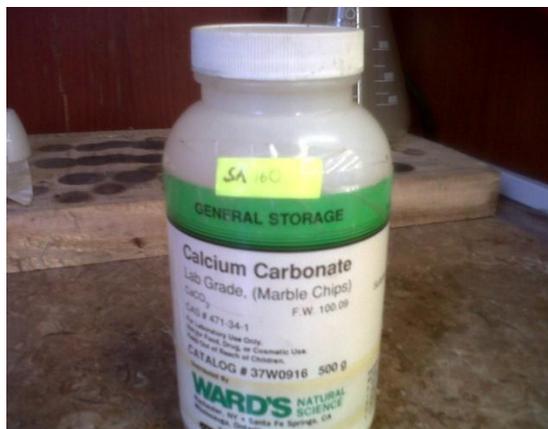


Figura 3.8 Carbonato de calcio

Siguiendo con lo descrito en la sección 2.3.4.6, se coloca Carbonato de Calcio como absorbente en un kitasato para que los gases expulsados sean considerablemente reducidos (Figura 3.8) (4).



Figura 3.9 Sistema de absorción para salida de gases

3.1.3 Selección de materiales para la aplicación del proceso de boronizado (materiales substrato)

Se seleccionaron materiales ferrosos que son compatibles o que presentan resultados en investigaciones anteriores. Así pues se emplean aceros de la casa comercial BOHLER por su disponibilidad en el mercado y la garantía que ofrece BOHLER en la composición química de sus productos. En la siguiente tabla se presentan los materiales a utilizarse como substrato para el desarrollo del presente proyecto:

Tabla 3.1 Aceros seleccionados para el desarrollo del proceso de boronizado (31)

Norma AISI	Equivalente Bohler	Composición
AISI 1018	E920	C 0.18% Si 0.25% Mn 0.70%
AISI 316L	A200	C 0.03% máx. Si 0.50% Mn 1.40% Cr 17% Mo 2.20% Ni 11.50%
AISI 4140	V320	C 0.41% Si 0.30% Mn 0.70% Cr 1.10% Mo 0.20%
AISI D3	K100	C 2.00% Si 0.25% Mn 0.35% Cr 11.5%
AISI O1	K460	C 0.95% Si 0.25% Mn 0.10% Cr 0.55% V 0.10% W 0.55%
Ni- Resist	-----	C 2,43% Si 2,58% Mn 0,956% Cr 1,99% Ni 11,54% Cu 6,79% Fe 73,33%

3.1.3.1 AISI 1018 (E920) Acero de Transmisión

Tipo de aleación: C 0,18 Si 0,25 Mn 0,70 %

Es un acero para cementación no aleado para piezas pequeñas exigidas principalmente al desgaste, donde la tenacidad del núcleo no es necesariamente importante; presenta además buena soldabilidad. Es utilizado generalmente en construcción de levas, uniones, bujes, pines, pivotes, partes prensadas o troqueladas, pernos grado 2, ejes de transmisión con baja exigencia al torque (31).

3.1.3.2 AISI316L (A200)

Tipo de aleación: C 0,03 máx. Si 0,50 Mn 1,40 Cr 17,00 Mo 2,20 Ni 11,50 %

Es un acero inoxidable austenítico-níquel-molibdeno con bajo contenido de carbón. Resistente a la corrosión intercrystalina hasta los 400⁰C. Es utilizado para tanques, tubos, griferías de la industria química, de papel, celulosa, industria fotográfica, tintorerías textiles de alta exigencia química, como también para instrumentos de medicina y cirugía. Este acero es utilizado en accesorios para la fabricación de jugos de fruta, licores y alcohol, donde no debe haber influencia en el sabor (31).

3.1.3.3 AISI4140 (V320)

Tipo de aleación: C 0,41 Si 0,30 Mn 0,70 Cr 1,10 Mo 0,20 %

Acero bonificado (templado y revenido) con aleación cromo-molibdeno de alta resistencia a la tracción y torsión en medianas y pequeñas secciones. Este acero es utilizado en construcción de partes y piezas de automotores, motoreductores, árboles de transmisión, ejes, bielas, pernos grado 6, tuercas, pines, émbolos, ejes de bombas, cañones para armas de cacería (31).

3.1.3.4 AISI D3 (K100)

Tipo de aleación: C 2.00% Si 0.2% Mn 0.3% Cr 11.5%

Acero al 12% de cromo de alta resistencia al desgaste y estabilidad dimensional en tratamiento térmico. Este acero es utilizado en matrices y punzones de corte y estampado. Conformación en frío. Cuchillas y cizallas para corte en frío (31).

La tabla 3.2 muestra las temperaturas y los tiempos para realizar tratamientos térmicos a este material, se presenta esta información ya que se realizaron tratamientos térmicos en las fases experimentales a los aceros de herramientas luego del proceso de boronizado.

Tabla 3.2 Instrucciones tratamientos térmicos AISI D3 (31)

Recocido	800-850 [°C]	Enfriamiento lento en el horno
Normalizado	650 [°C]	Enfriamiento en el aire
Temple	940-970 [°C](enf. aceite)	Tiempo de permanencia a temperatura de temple mínimo 20 minutos
Revenido	300 [°C]	Tiempo de permanencia en temperatura de revenido mínimo 1 hora

Para el tratamiento térmico del acero AISI D3 (K100) luego del proceso de boronizado, se sugiere el temple de las probetas a 940°C con 30 minutos de permanencia en el horno,

posteriormente se enfriará en aceite térmico a las probetas, para a continuación revenirlas a 300 °C por una hora. La figura 3.10 muestra un diagrama de tratamientos térmicos para AISI D3 (K100) (31).

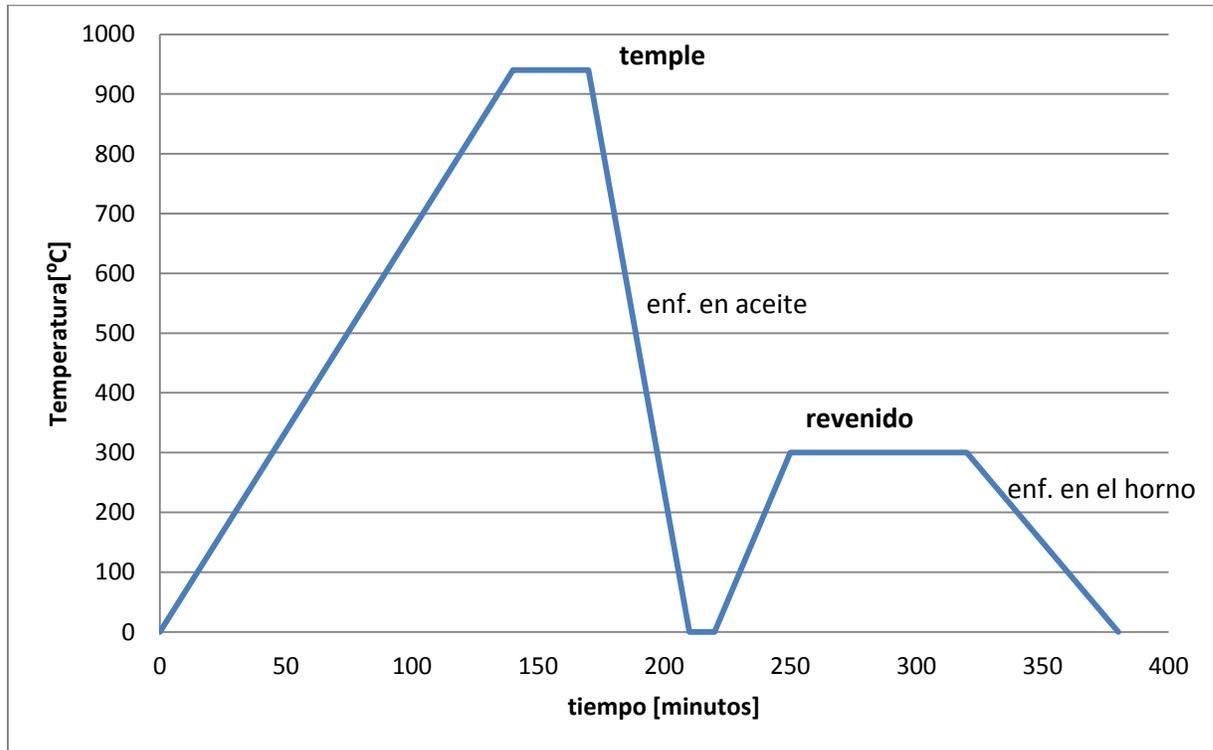


Figura 3.10 Diagrama tratamientos térmicos AISI D3 (K100)

3.1.3.5 AISI O1 (K460)

Tipo de aleación: C 0,95 Si 0,25 Mn 1,10 Cr 0,55 V 0,10 W 0,55 %

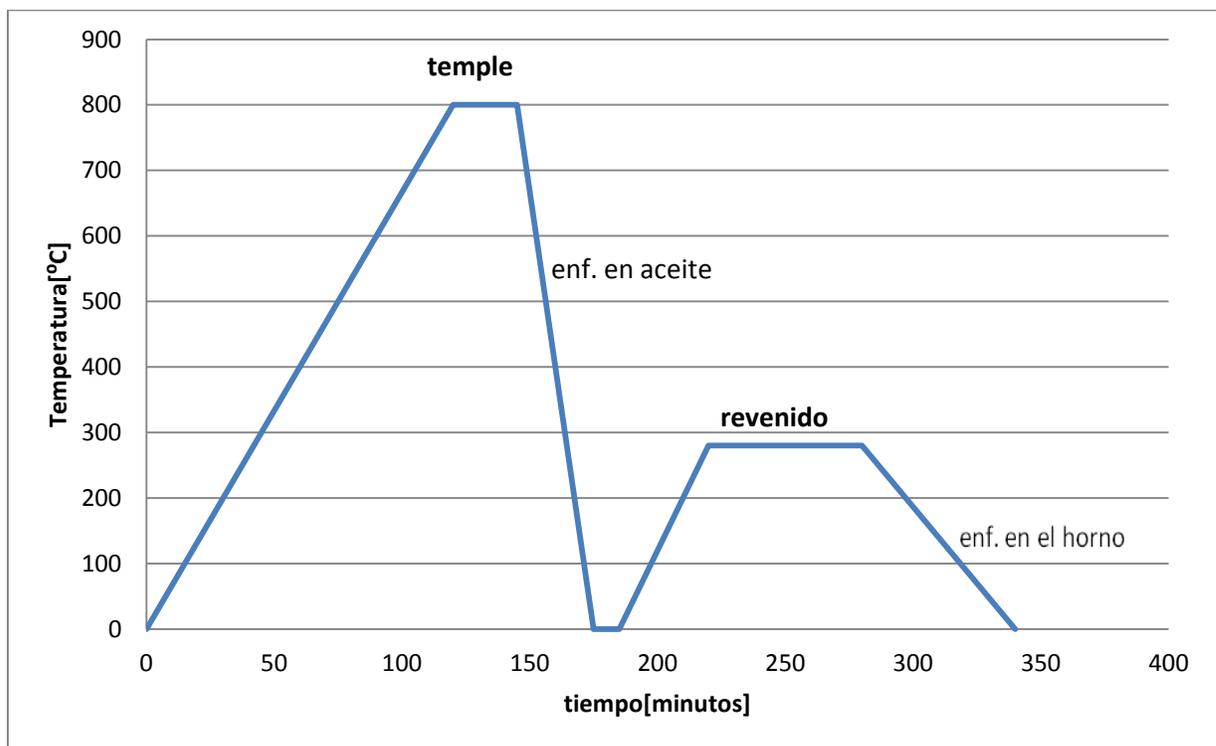
Acero de herramienta para trabajo en frío. Se caracteriza por su mínima variabilidad dimensional. Este acero es utilizado para herramientas de corte y en general elementos de matricería, útiles para roscar; herramientas para el trabajo de la madera; cuchillas industriales, principalmente para uso en la industria de la madera, del papel y de los metales; calibradores; moldes en la industria de los plásticos (31).

La tabla 3.3 muestra las temperaturas y los tiempos para realizar tratamientos térmicos a este material, se presenta esta información ya que se realizaron tratamientos térmicos en las fases experimentales a los aceros de herramientas luego del proceso de boronizado

Tabla 3.3 Temperaturas para tratamientos térmicos AISI O1 (31)

Recocido	710-750 [°C]	Enfriamiento lento en el horno
Normalizado	650 [°C]	Enfriamiento en el aire
Temple	780-820 [°C] (enf. agua)	Tiempo de permanencia a temperatura de temple mínimo 10 minutos
Revenido	280 [°C]	Tiempo de permanencia en temperatura de revenido mínimo 1 hora

Para el tratamiento térmico del acero AISI AO1 (K460) luego del proceso de boronizado, se realizará el temple de las probetas a 800°C con 30 minutos de permanencia en el horno posteriormente se enfriará en aceite térmico a las probetas, para consecutivamente revenirlas a 280 °C por una hora. La figura 3.11 muestra un diagrama de tratamientos térmicos para AISI AO1 (K460) (31).

**Figura 3.11** Diagrama tratamientos térmicos AISI AO1 (K460)

3.1.3.6 Ni-Resist

Las fundiciones de hierro austeníticas con alto contenido de Níquel presentan características favorables de resistencia a la corrosión (soluciones salina, agua de mar, ácidos débiles), protección contra el desgaste en partes que están en rozamiento, resistencia a la erosión, alta dureza y estabilidad a bajas temperaturas, propiedades magnéticas y eléctricas, resistencia al calor y buena maquinabilidad (32).

Este tipo de fundiciones son utilizadas para compresores, impellers de bombas, difusores, partes de turbina, partes de condensadores (32).

3.1.4 Fases experimentales

Para desarrollar el procedimiento de empaquetamiento de boro y lecho fluidizante se propuso la ejecución de tres fases experimentales, las cuales se desarrollaron de acuerdo a las necesidades durante la ejecución del proyecto. Los procedimientos se detallan más adelante con tiempos y temperaturas utilizadas, así como los materiales de sustrato utilizados.

3.1.4.1 Fase experimental 1

La fase inicial exploratoria se basa principalmente en la verificación de la factibilidad del proceso y comprobación del instrumental. Se realizaron pruebas en el rango de temperatura más bajo (850°C) y se inyectó gas argón cada media hora por cinco minutos cada vez para verificar la correcta salida del gas por las conexiones de entrada y salida de la retorta.

La tabla 3.4 muestra la descripción de la fase experimental 1, así como los materiales utilizados, el tiempo y la temperatura a la que fueron expuestos los materiales sustrato.

Tabla 3.4 Fase experimental 1

Descripción	Materiales	Tiempo	Temperatura
En este procedimiento exploratorio , se realizarán pruebas en el rango de temperatura más bajo y por corto tiempo a fin de probar el funcionamiento del instrumental. Cabe recalcar que para este procedimiento se permite a que el horno tenga un enfriamiento lento. No se realizarán tratamientos térmicos posteriores a las piezas	AISI 1018 AISI 316L AISI 4140 AISI D3 Ni- Resist	1 h	850 °C

3.1.4.2 Fase experimental 2

La tabla 3.5 muestra la descripción de la fase experimental 2, así como los materiales utilizados, el tiempo y la temperatura a la que fueron expuestos los materiales de sustrato.

Es importante citar que para esta fase se adicionó un material a los procedimientos (AISI O1), ya que para este punto del desarrollo del proceso de boronizado se encontró una aplicación industrial del tratamiento para pines de la empresa UMCO.

Tabla 3.5 Fase experimental 2

Descripción	Materiales	Tiempo	Temperatura
En esta fase se realizarán pruebas a 920 °C (que es el extremo más alto de la temperatura sugerida para esta técnica) y el tiempo dentro del horno de las piezas será de 5h. Cabe recalcar que para este procedimiento se permite a que el horno tenga un enfriamiento lento. Se realizarán tratamientos térmicos posteriores de temple y revenido a los aceros AISI D3 y AISI O1 para comparar durezas con los típicos tratamientos térmicos que se aplican a estos materiales	AISI 1018 AISI 316L AISI 4140 AISI D3 AISI O1 Pines AISI O1(UMCO) Ni- Resist	5 h	920 °C

3.1.4.3 Fase experimental 3

La tabla muestra la descripción de la fase experimental 3, así como los materiales utilizados, el tiempo y la temperatura a la que fueron expuestos los materiales sustrato. Es importante citar que para el desarrollo de esta fase, lo que se buscaba era probar y comparar los resultados obtenidos para una variación de tiempo a la misma temperatura del procedimiento exploratorio 2.

Tabla 3.6 Fase experimental 3

Descripción	Materiales	Tiempo	Temperatura
<p>En esta fase se realizarán pruebas acordes con los resultados de la fase experimental 2. Lo que se busca en esta fase es optimizar tiempos de permanencia en el horno para alcanzar una dureza satisfactoria, con una profundidad también satisfactoria, que sea de uso práctico para aplicar el tratamiento de en la industria de la manufactura; así mismo se busca que éste procedimiento sea de uso como base para investigaciones posteriores. Cabe recalcar que para este procedimiento se debe esperar a que el horno tenga un enfriamiento lento.</p>	<p>AISI 1018 AISI 316L AISI 4140 AISI D3 AISI O1 Ni- Resist</p>	<p>4h 3h</p>	<p>920 °C</p>

3.2 Desarrollo Experimental

3.2.1 Diseño y construcción de retorta

3.2.1.1 Factores de diseño

Para el diseño y construcción de la retorta se considera los factores del tamaño de la cavidad del horno provisto, el material y los procesos de manufactura.

3.2.1.1.1 Tamaño cavidad del horno

El tamaño de la cavidad del horno se muestra en la figura 3.12 Este horno satisface las necesidades para el desarrollo del proceso de boronizado y además es de fácil uso. El siguiente esquema muestra las medidas en milímetros del horno ThermoScientific del laboratorio de Química de la USFQ.

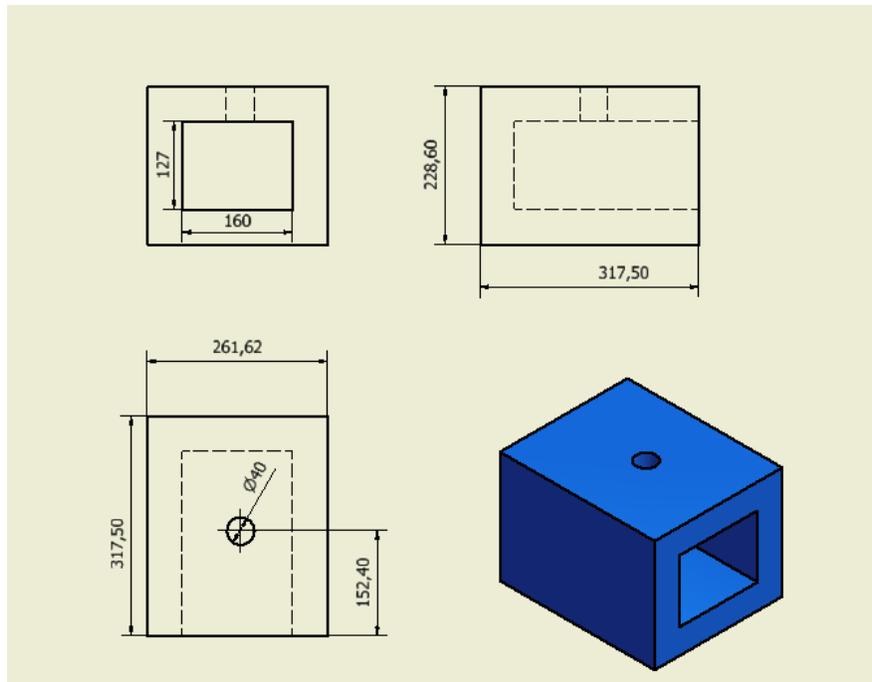


Figura 3.12 Medidas en milímetros del horno Thermo Scientific

3.2.1.1.2 Material

De acuerdo a los aceros disponibles en el mercado (Bohler) se elige el acero inoxidable A604 (AISI304) porque cumple con todas las características de resistencia a altas temperaturas, buena maquinabilidad y soldabilidad. El acero A604 es un acero inoxidable austenítico al cromo-níquel resistente a la corrosión, en especial a la corrosión producida por ácidos y soluciones alcalinas; este acero se lo utiliza generalmente para uso doméstico, equipos médicos, industria automotriz (31).

3.2.1.2 Diseño de retorta

El diseño de la retorta contempla implementar elementos que faciliten el proceso como inyectores, topes y agujeros con avellanados que faciliten la recirculación del gas protector. La retorta consta de una cámara con bridas (tubo), tapa inferior, tapa superior con bridas, dos tubos roscables que se conectan a la cámara por la parte superior, dos distribuidores con agujeros, tubo de distribuidor, topes de distribuidor y tope de cámara, tuercas y tornillos. Los tubos roscables son conectados a la cámara principal por la parte superior y ayudan a la inyección y desfogue del gas protector; las dos bases con agujeros avellanados sirven para distribuir de mejor manera el gas protector dentro de la cámara de

difusión; la tapa conjuntamente con la cámara hacen sello para que no existan fugas durante el proceso de boronización. Los diseños de retorta se muestran en la figura 3.13

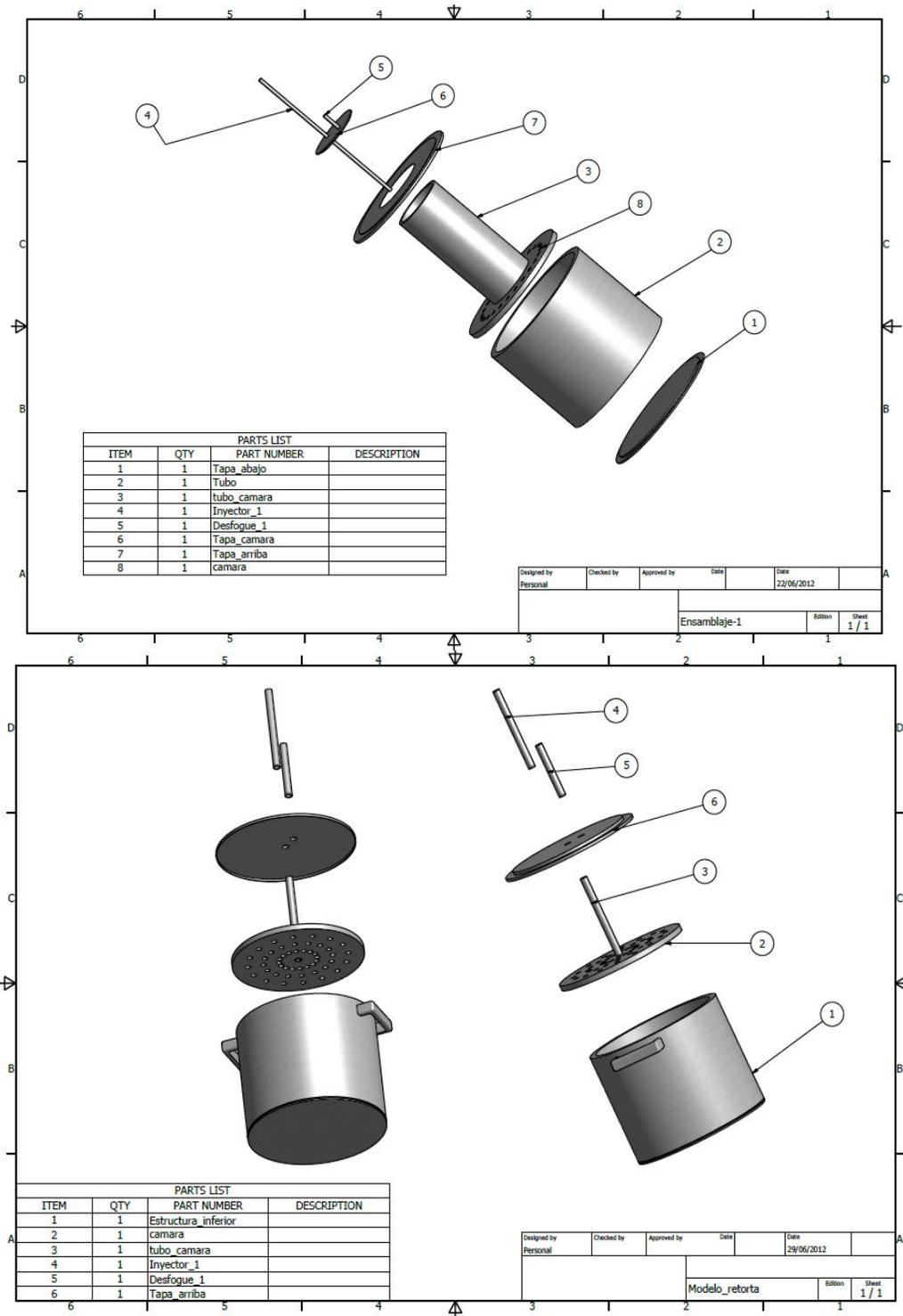


Figura 3.13 Modelaciones de Retorta

Finalmente se adoptó el diseño de retorta mostrado en la figura 3.15, este diseño se adjunta en el ANEXO A.

ESPECIFICACIONES

ALTIMA: 429[mm]
ANCHO: 155[mm]
PESO: 3,5[kg]

N°	Zona	Denominación	Plano, y/o Norma	Cant.	Material	Observación
8		Tuerca	ISO 7411	3	Acero AISI 304	M10x2
7		Perno	ISO 7411	3	Acero AISI 304	M10x2
6		Inyector y Destoque	USFQ.107	2	Acero AISI 304	
5		Tubo Distribuidor	USFQ.106	1	Acero AISI 304	
4		Tapa Principal	USFQ.105	1	Acero AISI 304	
3		Distribuidor Superior	USFQ.104	1	Acero AISI 304	
2		Distribuidor Inferior	USFQ.103	1	Acero AISI 304	
1		Camara	USFQ.102	1	Acero AISI 304	

Facultad de Ingeniería Mecánica		Dib: Daniel Iza Djs: Dr.A.Valarezo-D.Iza Rev: Msc. Lorena Bejarano	Escala: 1:3
RETORTA		USFQ 101	Fecha: 2012-12-10



Figura 3.14 Diseño final de retorta (Ver Anexo A)

3.2.2 Probetas

Para realizar las pruebas se determinó utilizar probetas que tuvieran la forma de media circunferencia, una geometría básica y que presenta superficies planas y curvas; con el fin de comparar la distribución del recubrimiento superficial de boro en diversos tipos de formas que las piezas a tratarse puedan tener. En la figura 3.15 se muestra el modelo de la probeta seleccionada para todos los materiales de substrato con sus respectivas medidas; exceptuando la fundición de níquel, la cual fue cortada directamente de una pieza de bomba.

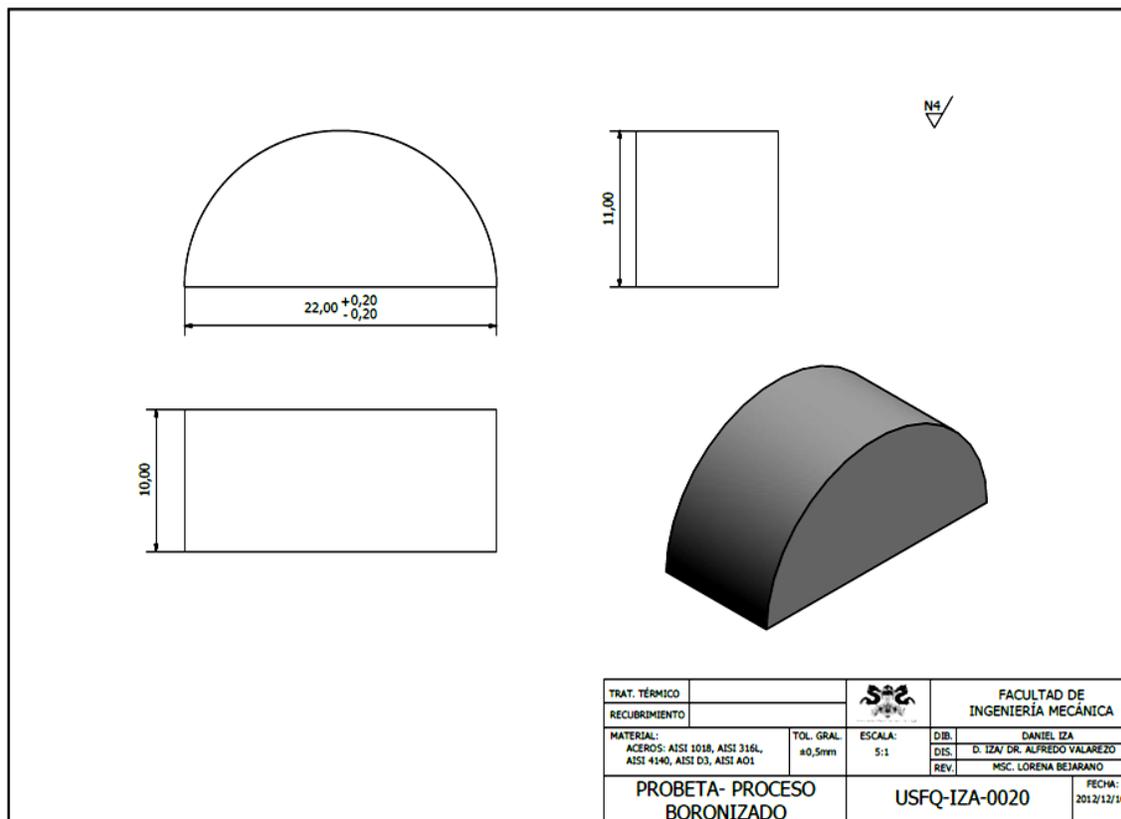


Figura 3.15 Dimensión y diseño de probetas

3.2.3 Procedimiento para la preparación de probetas para boronizado

Para la preparación del proceso de boronizado se sigue el siguiente procedimiento (Figura 3.16):

- Limpiar con un desengrasante las partes a tratar para que estén libres de aceite, grasa, fluidos de corte y óxido.
- Preparar las piezas a boronizar con un desbaste de la superficie de manera que las superficies sean planas y paralelas, para esto se utiliza una serie de lijas (240, 320, 600 y 1200 granos/ pulgada).
- Colocar una capa de óxido de Aluminio de granos gruesos que será colocado en la base de la retorta como primera capa para facilitar la distribución de gas.
- Colocar capa adicional de Ekabor®2 donde las piezas se van a asentar y apisonar
- Colocar los materiales a tratarse.
- Llenar capa adicional de Ekabor®2 para cubrir todas la superficies de las piezas a tratar y apisonar nuevamente.
- Cerrar la retorta con los pernos de seguridad e introducir en el horno.
- Colocar las conexiones de inyección y desfogue de gas protector (Argón).
- Encender el horno a la temperatura indicada para boronizado(Cuando se realizan tratamientos térmicos posteriores al proceso de boronizado es recomendable realizar dichos tratamientos con un gas protector para conservar la capa de boro difundida en el material tal como se describe en el apartado 2.2.3.5
- Enfriar la retorta en el horno luego del proceso



Figura 3.16 Procedimiento para la preparación de boronizado
(1) Limpieza y preparación, (2) Colocación capa óxido de aluminio, (3) Colocación capa Ekabor®2, (4) Colocación piezas, (5) Relleno capa Ekabor®2, (6) Cierre de retorta, (7) Encendido de horno y conexiones de gas, (8) Enfriamiento en horno y desmontaje de piezas

3.2.4 Ensayo de dureza

La dureza es una medida de la resistencia a la deformación plástica localizada de un material (33). Existen diferentes ensayos de dureza que se pueden realizar a los materiales, los cuales difieren en la forma del indentador, la carga aplicada para realizar el ensayo y luego la profundidad del endurecimiento que se va a medir. Para este caso en particular, al tratarse de endurecimiento superficial se considera el “Método de pruebas estándar para dureza Knoop y Vickers” que se describen en el procedimiento de la norma ASTM E-384 presentado en el ANEXO B-3.

. En la siguiente figura 3.17 se muestra la forma u geometría del indentador:

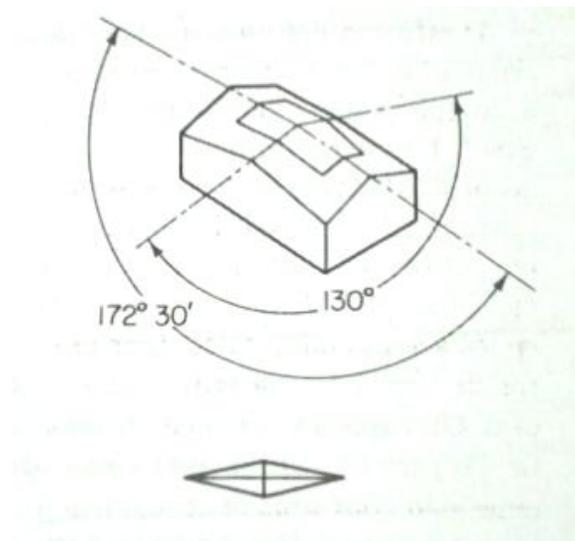


Figura 3.17 Geometría y forma del indentador Knoop (34)

Este tipo de ensayo utiliza cargas entre 1 y 1000 gramos, la marca resultante en la superficie se observa al microscopio y se mide (33). Esta medida es luego convertida en un número de dureza HKN mediante la siguiente expresión:

$$HKN = \frac{L}{A_p} = \frac{L}{l^2 C} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

A_p = Área formada por la indentación en mm^2

L = Carga en kilogramos = 0,2 [Kg] (Carga utilizada para mediciones)

$C = Constante = 0,07028$

$$l = \frac{l_u}{1000} = \text{Longitud en mm de la diagonal principal}$$

$l_u = \text{Longitud de la diagonal principal en unidades} * fa_u$

$fa_u = \text{Factor de amplitud ocular para } 40x = 0,2129(\text{lente utilizado para mediciones})$

3.2.4.1 Equipo para ensayo de microdureza

Para las mediciones de microdureza Knoop (KHN) se utiliza el microdurómetro Tukon provisto por el laboratorio de metalografía de la Escuela Politécnica del Ejército (Figura 3.18).

El microdurómetro Tukon funciona con la aplicación de fuerza hidráulica para aplicar la carga. Este microdurómetro cuenta con microscopio que contiene una regla graduada que permite medir la longitud de la diagonal de la indentación.

Para obtener los resultados se realizaron siete mediciones en las probetas eliminando el valor menor y mayor para obtener un resultado consistente con el promedio de las restantes medidas.



Figura 3.18 Microdurómetro Tukon

3.2.4.2 Procedimiento del ensayo de microdureza

- Calibrar la carga necesaria en el microdurómetro (200g)
- Situar y fijar la muestra sobre la mesa del microdurómetro
- Enfocar un punto de referencia con el microscopio donde se va a realizar la indentación en la probeta
- Desplazar la mesa hasta que la probeta se coloque debajo del indentador.
- Desplazar la mesa de forma vertical hasta que la superficie de la probeta esté separado del indentador un milímetro.
- Aplicar la carga y esperar diez segundos mientras se realiza la indentación.
- Retirar la carga y desplazar la mesa de forma vertical para separar la probeta del indentador.
- Desplazar la mesa hasta colocar el lente del microscopio por encima de la superficie de la probeta donde se realizó la indentación
- Enfocar el objetivo de las indentaciones con el lente de 10x y verificar a presencia de las indentaciones.
- Colocar el lente de 40x para realizar las mediciones de la diagonal mayor de la indentación con la ayuda de la regla incorporada en el microdurómetro
- Transformar el valor obtenido de las mediciones a un valor microdureza Knoop (KHN) mediante la ecuación 3.2.

3.2.5 Ensayo Metalográfico

El ensayo metalográfico es la obtención y valoración de micrografías, que son imágenes de la estructura interna de los materiales, este tipo de ensayo se describe de acuerdo a la norma ASTM E-407. Las probetas del material a ensayar se rectifican y se pulen con la finalidad de eliminar rugosidades para observar de mejor manera la estructura de los materiales. Posteriormente se debe atacar al material químicamente para develar la estructura de grano y las características internas del material (35).

Para el presente proyecto se utiliza un análisis metalográfico con la finalidad de medir la penetración de la capa boronizada.

3.2.5.1 Preparación de las probetas metalográficas

3.2.5.1.1 Montaje de probetas

Las probetas seleccionadas se montan con resina epóxica, la cual se obtiene al mezclar resina poliéster con octoato de cobalto y meti-etil cetona. Las probetas previamente identificadas son colocadas sobre una hoja de papel con el molde, donde se vierte el contenido de la resina epóxica; luego se espera a que la resina se endurezca para posteriormente pulirla. La dimensión del montaje es de 25 mm diámetro y 15 mm de espesor como se muestra en la figura 3.19.



Figura 3.19 Montaje de probetas

3.2.5.1.2 Desbaste de muestras

Luego de montar las probetas en la muestra metalográfica, se debe realizar un desbaste para obtener una superficie uniforme y plana en las probetas; para lo cual se utiliza la máquina desbastadora proporcionada por la Escuela Politécnica Nacional (Figura 3.20) que utiliza un disco giratorio con un abrasivo de 80 granos/ pulgada.



Figura 3.20 Máquina Desbastadora

3.2.5.1.3 Pulido grueso de muestras

Para mejorar la superficie desbastada se utiliza el banco de pulido proporcionada por la Escuela Politécnica Nacional (Figura 3.21) donde se pulen las muestras con una serie de lijas (240, 320, 400 y 600 granos/ pulgada). La muestra debe ser deslizada en una sola dirección con la finalidad de obtener líneas en una sola dirección, por cada avance de lija se debe girar la muestra noventa grados para eliminar las líneas de las lijas anteriores.



Figura 3.21 Banco de pulido grueso

3.2.5.1.4 Pulido fino de muestras

Luego de pulir las muestras en el banco de pulido con todas las lijas; éstas deben ser pulidas en el banco de pulido fino (Figura 3.22), el cual ayuda a que la superficie a ser analizada no contenga rayones o marcas y tenga un aspecto brillante. Este banco de pulido consta de un fino paño y el pulido se obtiene con alúmina (óxido de aluminio) de una micra.



Figura 3.22 Banco de pulido fino

3.2.5.1.5 Ataque químico de muestras

Con la finalidad que la microestructura de los distintos materiales se revele en el análisis metalográfico se procede a atacar las muestras químicamente. Así pues para los aceros comunes se utiliza Nital a 3% (ácido Nítrico en Alcohol etílico) de acuerdo al apartado 74a de la tabla 2 de la norma ASTM E-407 (ANEXO B-4) y para el acero inoxidable austenítico se utiliza Marble (10 g de CuSO_4 en 50 ml de H_2O y 50 ml de HCl) de acuerdo al apartado 25 de la tabla 2 de la norma ASTM E-407 (ANEXO B-4).

3.2.5.2 Equipo para ensayo metalográfico

Para el análisis metalográfico de las muestras se utiliza el microscopio óptico MEIJI Modelo. IM 7200 (Figura 3.23), proporcionado por el laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional.

El microscopio en cuestión, cuenta con un lente ocular de 10x y objetivos de 10x, 20x y 50 x. A este microscopio se le ha adaptado una cámara INFINITY 1, la cual está conectada a un ordenador y por medio del software Infinite Analyze se puede obtener las imágenes de las microestructuras y las mediciones de la penetración del boronizado en los distintos materiales.



Figura 3.23 Microscopio Metalográfico

3.2.6 Ensayo de tintas penetrantes

El ensayo de tintas penetrantes es parte de los ensayos no destructivos que se emplean para señalar fallas en los materiales tales como: grietas, arrugas, poros y fallos de aglomeración que con frecuencia aparecen en la superficie de las piezas (35). Este tipo de ensayo se describe de acuerdo al procedimiento de la figura 2 de la norma ASTM E-165(ANEXO B-2).

Para el presente proyecto se aplica este ensayo con la finalidad de verificar que los materiales luego de realizado el proceso de boronizado no presenten ningún tipo de fractura o fisuras que se pueden ocasionar por la variación de temperaturas luego de la aplicación de tratamientos térmicos.

3.2.6.1 Material usado para ensayo de tintas penetrantes

Para la realización de este ensayo se utiliza el kit de tintas penetrantes ARDROX de la casa comercial Chemetall: Ardrox 9PR5 disolvente eliminador, Ardrox 996 P líquido penetrante rojo, y Ardrox 9D1B revelador húmedo.



Figura 3.24 Kit de tintas penetrantes Ardrox de Chemetall

3.2.6.2 Procedimiento para ensayo de tintas penetrantes

- Limpiar previamente los materiales a ensayar
- Aplicar el disolvente Ardrox 9PR5 en un paño y limpiar todas las superficies de las piezas a ensayar y dejar secar.
- Rociar el líquido penetrante Ardrox 996 P sobre todas las superficies que se quiera ensayar a una distancia de un metro y esperar diez minutos.
- Limpiar nuevamente todas las superficies con el paño humedecido con el disolvente Ardrox 9PR5
- Aplicar el revelador Ardrox 9D1B a una distancia de un metro sobre todas las superficies ensayadas y esperar cinco minutos.
- Verificar si hay algún indicio de falla o fisura en los materiales ensayados.

4 Resultados Experimentales y Discusión

4.1 Mediciones microdureza

Para las mediciones de microdureza se presentan los resultados obtenidos de la diagonal principal de la indentación, y su equivalencia en Número Knoop (KHN) de acuerdo a la ecuación 3.2. Luego se presenta la equivalencia en escala Rockwell C de acuerdo a la Tabla 1 de la norma ASTM E140 (ANEXO B-1) y la gráfica de tendencia con una regresión logarítmica como se muestra en ANEXO G.

Los resultados se presentan para todos los materiales en estado de suministro, 5 horas de boronizado, 4 horas de boronizado y 3 horas de boronizado con una temperatura constante de boronización de 920° C. A continuación se presenta un ejemplo del procedimiento para el material AISI 1018(E920).

Tabla 4.1 Mediciones para AISI 1018(E920) en estado de suministro

AISI 1018(E920) SUMINISTRO			
MEDICIÓN	longitud diagonal principal (lu)	KHN	HRC
1	615	166,0	7,3
2	601	173,8	9,0
3	603	172,7	8,8
4	605	171,5	8,5
5	582	185,4	11,3
PROMEDIO	601,2	173,9	9,0
DESV. ESTÁNDAR	12,0	7,1	1,4

Tabla 4.2 Mediciones para AISI 1018(E920) para 5 horas de boronizado

AISI 1018(E920)- 5 HORAS DE BORONIZADO			
MEDICIÓN	longitud diagonal principal (lu)	KHN	HRC
1	209	1437,3	84,6
2	248	1020,8	72,3
3	239	1099,1	75,0
4	235	1136,9	76,2
5	246	1037,5	72,9
PROMEDIO	235,4	1146,3	76,5
DESV. ESTÁNDAR	15,7	169,3	4,9

Tabla 4.3 Mediciones para AISI 1018(E920) para 4 horas de boronizado

AISI 1018(E920)-4 HORAS DE BORONIZADO			
MEDICIÓN	longitud diagonal principal (lu)	KHN	HRC
1	249	1012,6	72,0
2	240	1090,0	74,7
3	228	1207,8	78,3
4	223	1262,5	79,9
5	221	1285,5	80,6
PROMEDIO	232,2	1171,7	77,3
DESV. ESTÁNDAR	11,9	116,7	3,6

Tabla 4.4 Mediciones para AISI 1018(E920) para 3 horas de boronizado

AISI 1018(E920)-3 HORAS DE BORONIZADO			
MEDICIÓN	longitud diagonal principal (lu)	KHN	HRC
1	230	1186,8	77,7
2	234	1146,6	76,5
3	230	1186,8	77,7
4	241	1081,0	74,4
5	242	1072,1	74,1
PROMEDIO	235,4	1134,7	76,1
DESV. ESTÁNDAR	5,8	55,7	1,8

De esta manera se obtiene la siguiente tabla de comparaciones para todos los materiales para microdureza Knoop y dureza Rockwell C. Los valores para literatura se obtienen del manual de Bohler para aceros (31); el valor de suministro para material AISI 316L se obtiene de la página matweb.com (36) y el valor de dureza de literatura para el material Ni-Resist no es conocido. En este análisis se muestra además una gráfica que recoge los resultados de la tabla con los promedios y desviaciones realizadas para cada material y para todos los experimentos realizados.

Tabla 4.5 Tabla de comparaciones de mediciones (Microdureza Knoop)

TABLA DE COMPARACIONES										
MATERIAL	LITERATURA[HBS]	LITERATURA [KNOOP]	PROMEDIO SUMINISTRO [KNOOP]	DESV. ESTÁNDAR SUMINISTRO [KNOOP]	PROMEDIO 5 HORAS BORONIZADO [KNOOP]	DESV. ESTÁNDAR 5 HORAS BORONIZADO [KNOOP]	PROMEDIO 4 HORAS BORONIZADO[KNOOP]	DESV. ESTÁNDAR 4 HORAS BORONIZADO [KNOOP]	PROMEDIO 3 HORAS BORONIZADO[KNOOP]	DESV. ESTÁNDAR 3 HORAS BORONIZADO [KNOOP]
AISI1018(E920)	170	185,33	173,9	7,1	1146,3	169,3	1171,7	116,7	1124,2	47,8
AISI316L(A200)	-----	212	192,7	26,8	1372,4	95,7	1536,1	150,2	1617,9	72,8
AISI4140(V320)	241	251	260,8	31,0	1000,9	67,0	1004,0	201,9	1084,1	54,4
AISI D3(K100)	248	272	242,4	30,8	1367,2	95,1	1357,5	64,6	1413,8	39,5
AISI AO1(K460)	225	240	237,4	7,3	1169,9	52,3	1126,9	110,7	1111,8	25,5
Ni-Resist	-----	----	155,9	15,2	803,6	138,6	749,2	140,2	981,8	88,4

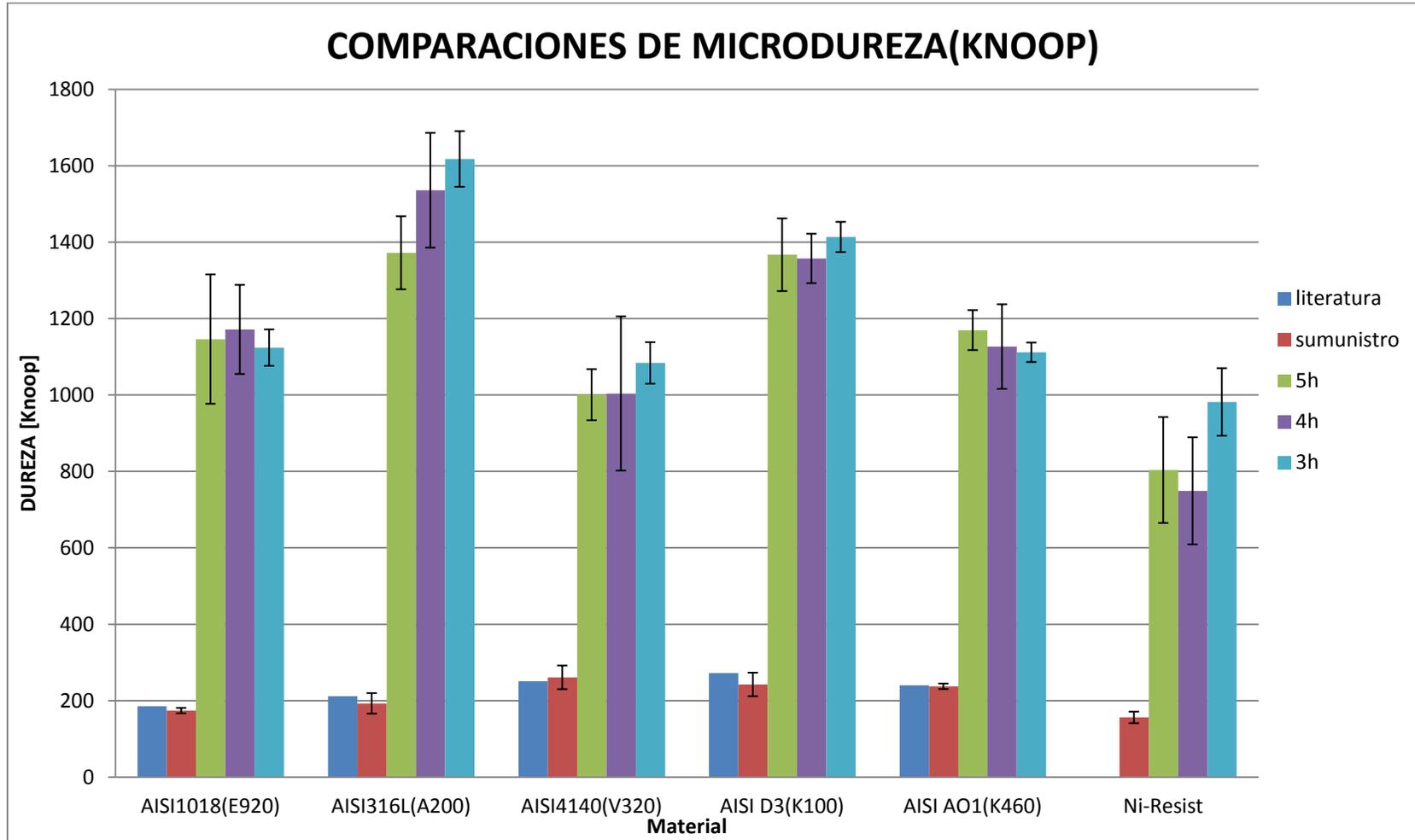


Figura 4.1 Gráfico de barras de las diferentes medidas de microdureza en escala Knoop para los distintos materiales del proceso de boronizado

Tabla 4.6 Tabla de comparaciones de mediciones (Dureza Rockwell C)

TABLA DE COMPARACIONES										
MATERIAL	LITERATURA[HBS]	LITERATURA [HRC]	PROMEDIO SUMINISTRO [HRC]	DESV. ESTÁNDAR SUMINISTRO [HRC]	PROMEDIO 5 HORAS BORONIZADO [HRC]	DESV. ESTÁNDAR 5 HORAS BORONIZADO [HRC]	PROMEDIO 4 HORAS BORONIZADO[HRC]	DESV. ESTÁNDAR 4 HORAS BORONIZADO [HRC]	PROMEDIO 3 HORAS BORONIZADO[HRC]	DESV. ESTÁNDAR 3 HORAS BORONIZADO [KNOOP]
AISI1018(E920)	170	11,3*	9,0*	1,4	76,5	4,9	77,3	3,6	75,8	1,5
AISI316L(A200)	-----	16,1*	12,7*	5,3	82,9	2,5	86,9	3,7	88,8	1,6
AISI4140(V320)	241	22,9	23,5	4,1	71,6	2,4	71,7	6,7	74,5	1,8
AISI D3(K100)	248	24,1	20,9	4,5	82,8	2,5	82,5	1,7	84,0	1,0
AISI AO1(K460)	225	20,2	20,1	1,1	77,2	1,6	75,9	3,7	75,4	0,8
Ni-Resist	-----	----	5,1*	3,5	63,8	6,4	61,3	6,2	70,9	3,1

*No existen valores menores a 20 [HRC] para dureza Rockwell C; sin embargo, por cuestiones didácticas y para mostrar el aumento de dureza se utilizan estos valores

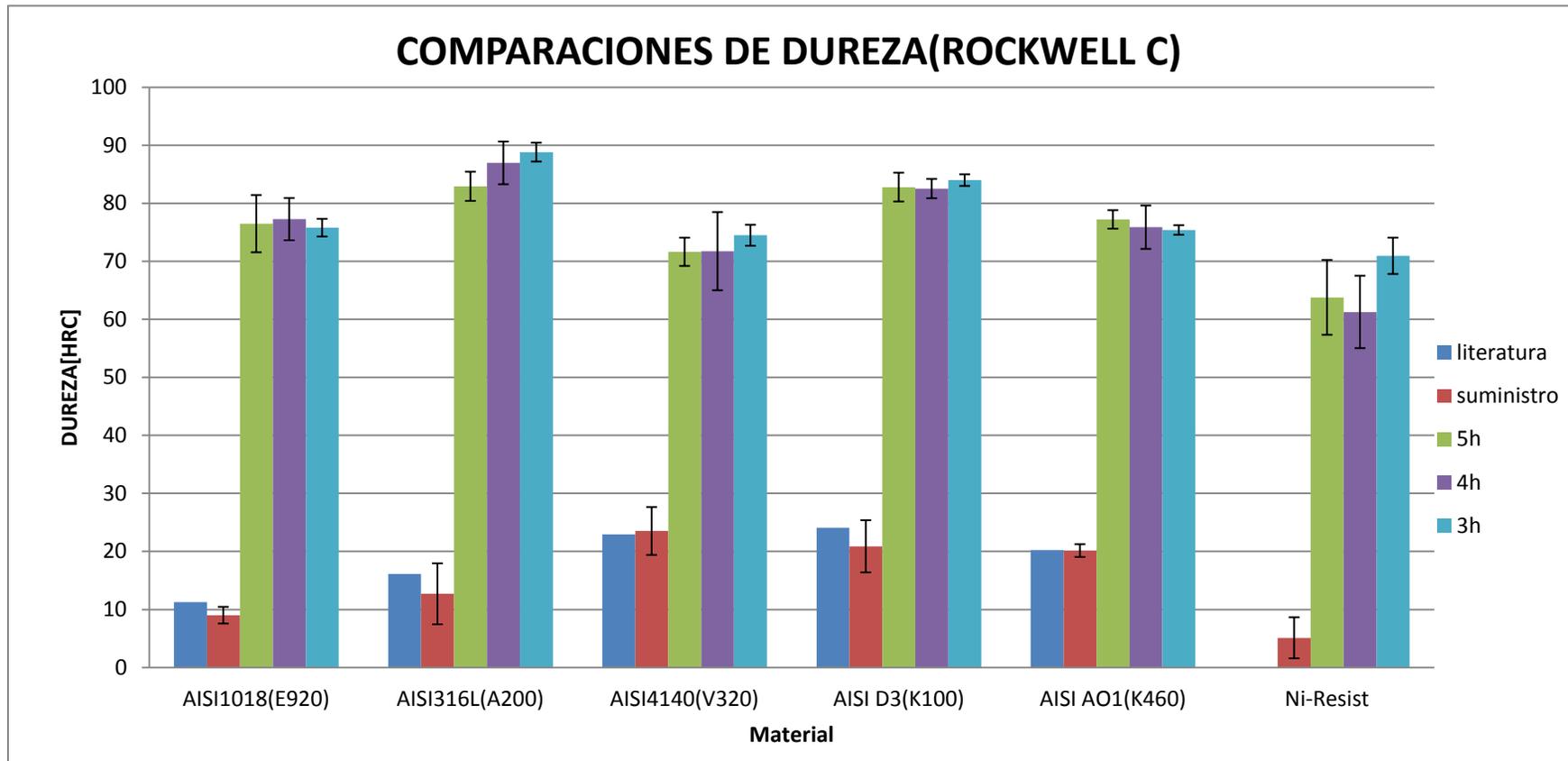


Figura 4.2 Gráfico de barras de las diferentes medidas en escala Rockwell C para los distintos materiales del proceso de boronizado

*No existen valores menores a 20 [HRC] para dureza Rockwell C; sin embargo, por cuestiones didácticas y para mostrar el aumento de dureza se utilizan estos valores

4.2 Comparación de microdurezas superficiales y en sustrato para AISI D3 (K100) K100 Y AO1 (K460) con Tratamientos Térmicos comunes de estos aceros.

Con la finalidad de comparar los cambios que sufren los materiales de herramienta (AISI D3 (K100) y AISI AO1 (K460)) con el proceso de boronizado en su superficie y su sustrato; se realizan mediciones bajo diversas condiciones para comparar las durezas obtenidas con el proceso de boronizado. Así pues se compara las mediciones de dureza en estado de suministro, medición de superficie para cinco horas de boronizado, medición de sustrato para cinco horas de boronizado, medición de superficie para cinco horas de boronizado con temple y revenido, medición de sustrato para cinco horas de boronizado con temple y revenido y medición para temple y revenido (sin boronizado) de los dos materiales.

4.2.1 Material AISI D3 (K100)

Las tablas desde la 4.7 hasta la 4.12 muestran los resultados de dureza para el material AISI D3 (K100) sometido a distintos tratamientos tanto en la superficie del material como el sustrato.

Tabla 4.7 Tabla de mediciones del acero AISI D3 (K100) para suministro

AISI D3 (K100) SUMINISTRO	
MEDICIÓN	KHN
1	210,6
2	224,4
3	226,1
4	272,5
5	278,3
PROMEDIO	242,4
DESV. ESTÁNDAR	30,8

Tabla 4.8 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C

AISI D3 (K100) SUPERFICIE (5 horas boronizado)	
MEDICIÓN	KHN
1	1358,2
2	1494,0
3	1251,3
4	1309,1
5	1423,7
PROMEDIO	1367,2
DESV. ESTÁNDAR	95,1

Tabla 4.9 Tabla de mediciones en sustrato del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C

AISI D3 (K100) SUBSTRATO (5 horas boronizado)	
MEDICIÓN	KHN
1	322,83
2	280,62
3	284,22
4	331,79
5	296,71
PROMEDIO	303,23
DESV. ESTÁNDAR	23,0

Tabla 4.10 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido

AISI D3 (K100) SUPERFICIE (5 horas boronizado/ Temple y Revenido)	
MEDICIÓN	KHN
1	900,8
2	1063,2
3	996,6
4	1029,1
5	830,2
PROMEDIO	964,0
DESV. ESTÁNDAR	96,2

Tabla 4.11 Tabla de mediciones en sustrato del acero AISI D3 (K100) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido

AISI D3 (K100) SUBSTRATO (5 horas boronizado/ Temple y Revenido)	
MEDICIÓN	KHN
1	746,5
2	707,0
3	741,4
4	731,3
5	693,0
PROMEDIO	723,8
DESV. ESTÁNDAR	23,0

Tabla 4.12 Tabla de mediciones superficial del acero AISI D3 (K100) con tratamiento térmico de temple y revenido (SIN BORONIZADO)

AISI D3 (K100) SUPERFICIE (Temple y Revenido) SIN BORONIZADO	
MEDICIÓN	KHN
1	707,0
2	693,0
3	726,4
4	716,6
5	679,4
PROMEDIO	704,5
DESV. ESTÁNDAR	18,7

En la figura 4.3 y 4.4 se comparan los resultados obtenidos de micordureza y dureza para el acero AISID3 (K100) sometido a diferentes tratamientos. Se compara además las mediciones en la superficie del material y el sustrato

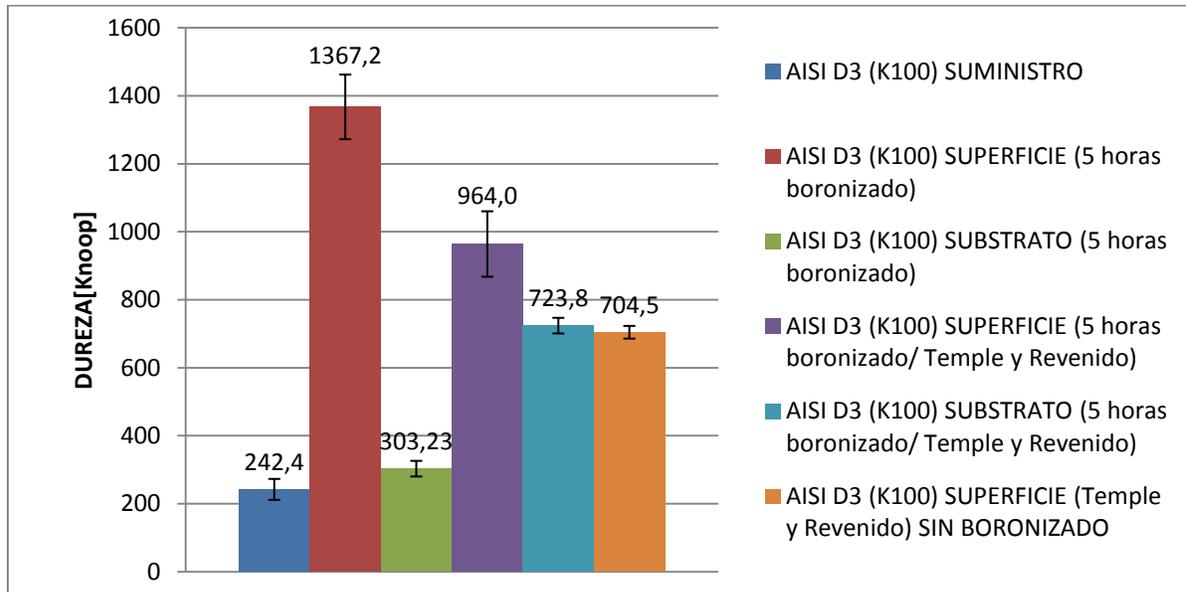


Figura 4.3 Comparaciones de mediciones de microdureza Knoop superficiales y substrato para acero AISI D3 (K100) con distintos tratamientos

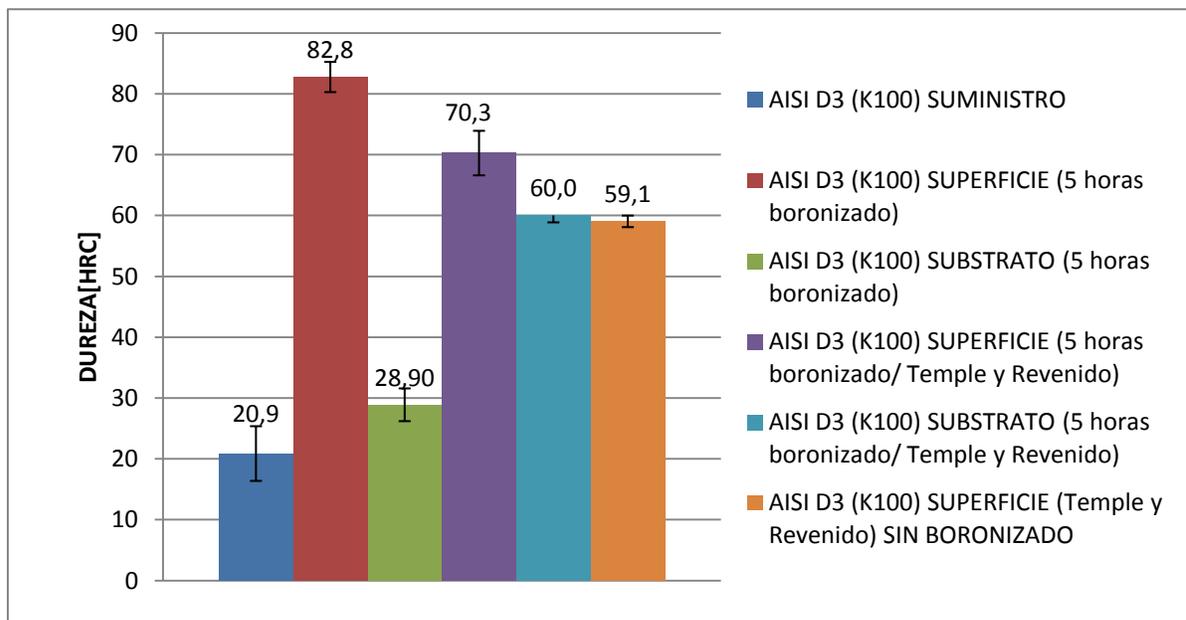


Figura 4.4 Comparaciones de mediciones de dureza Rockwell C superficiales y substrato para acero AISI D3 (K100) con distintos tratamientos

4.2.2 Material AISI AO1 (K460)

Las tablas desde la 4.13 hasta la 4.18 muestran los resultados de dureza para el material AISI AO1 (K460) sometido a distintos tratamientos tanto en la superficie del material como el sustrato.

Tabla 4.13 Tabla de mediciones en sustrato del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C

K460 SUMINISTRO	
MEDICIÓN	KHN
1	246,2
2	226,9
3	239,5
4	234,0
5	240,4
PROMEDIO	237,4
DESV. ESTÁNDAR	7,3

Tabla 4.14 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C

K460 SUPERFICIE (5 horas boronizado)	
MEDICIÓN	KHN
1	1229,2
2	1156,5
3	1218,4
4	1136,9
5	1108,4
PROMEDIO	1169,9
DESV. ESTÁNDAR	52,3

Tabla 4.15 Tabla de mediciones en sustrato del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C

K460 SUBSTRATO (5 horas boronizado)	
MEDICIÓN	KHN
1	310,0
2	298,0
3	291,6
4	278,3
5	310,0
PROMEDIO	297,6
DESV. ESTÁNDAR	13,4

Tabla 4.16 Tabla de mediciones superficiales del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido

K460 SUPERFICIE (5 horas boronizado/ Temple y Revenido)	
MEDICIÓN	KHN
1	1004,5
2	958,0
3	1136,9
4	1054,6
5	1099,1
PROMEDIO	1050,6
DESV. ESTÁNDAR	71,6

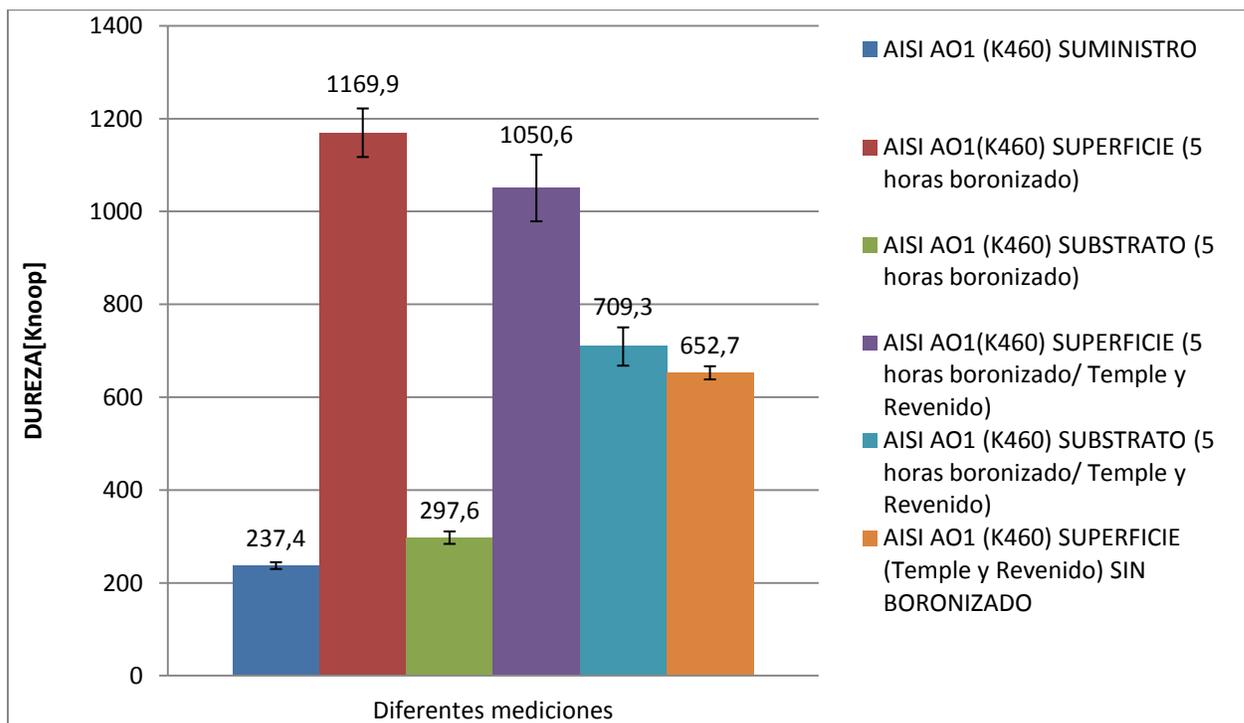
Tabla 4.17 Tabla de mediciones en sustrato del acero AISI AO1 (K460) para 5 horas de boronizado a 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido

K460 SUBSTRATO (5 horas boronizado/ Temple y Revenido)	
MEDICIÓN	KHN
1	767,6
2	670,5
3	693,0
4	679,4
5	736,3
PROMEDIO	709,3
DESV. ESTÁNDAR	41,2

Tabla 4.18 Tabla de mediciones superficial del acero AISI AO1 (K460) con tratamiento térmico de temple y revenido

AISI D3 (K460) SUPERFICIE (Temple y Revenido) SIN BORONIZADO	
MEDICIÓN	KHN
1	653,3
2	636,8
3	674,9
4	645,0
5	653,3
PROMEDIO	652,7
DESV. ESTÁNDAR	14,2

En la figura 4.5 y 4.6 se comparan los resultados obtenidos de microdureza y dureza para el acero AISID3 (K100) sometido a diferentes tratamientos. Se compara además las mediciones en la superficie del material y el substrato

**Figura 4.5** Comparaciones de mediciones de microdureza Knoop superficiales y substrato para acero AISI AO1 (K460) con distintos tratamientos

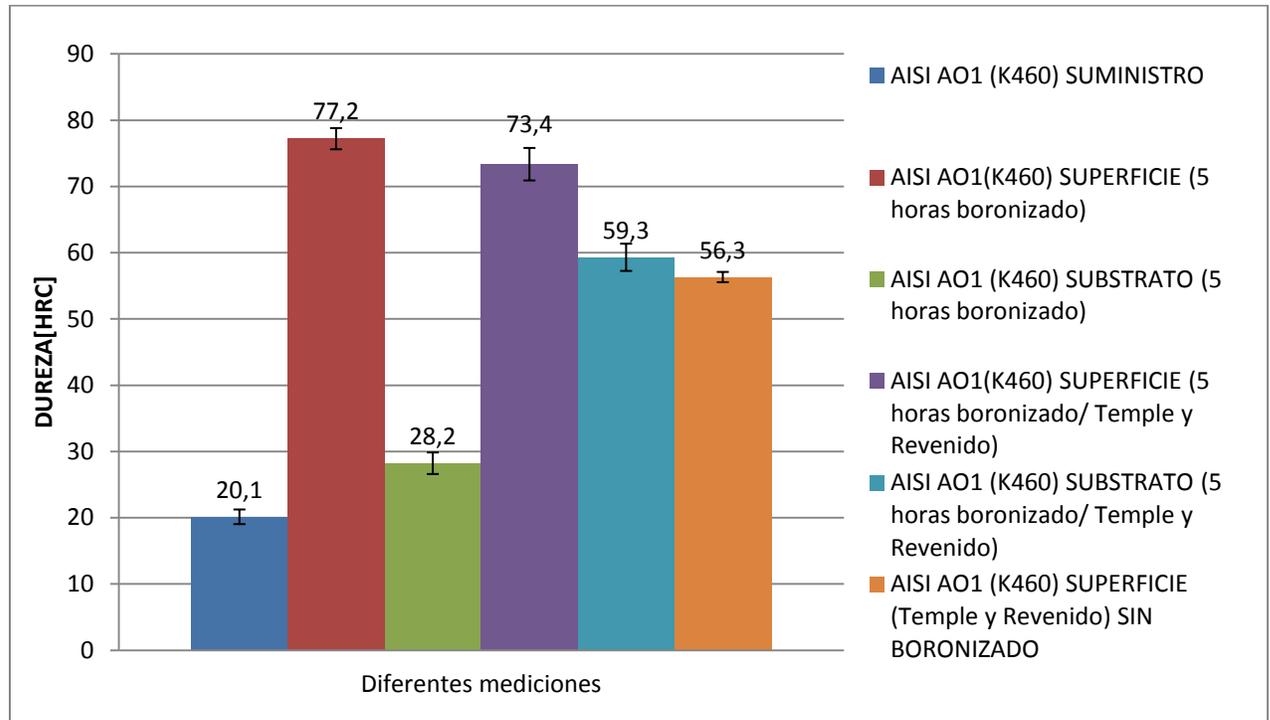


Figura 4.6 Comparaciones de mediciones de dureza Rockwell C superficiales y substrato para acero AISI AO1 (K460) con distintos tratamientos

4.3 Metalografías

Para el ensayo metalográfico se utilizan las probetas de la fase experimental 1 (1 hora de boronizado 850°C) y la fase experimental 2 (5 horas de boronizado 920°C); para el material AISI O1, se presentan metalografías para 5 horas, 4 horas de boronizado a 920 °C, con la finalidad de comparar y determinar un tiempo para una profundidad de difusión adecuada.

Así mismo para este ensayo se realizan mediciones en la metalografía de la arista transversal (parte vertical de la probeta montada) y la metalografía de la arista longitudinal (parte horizontal de la probeta montada) como se muestra en la figura 4.1. , con la finalidad de mostrar y comparar uniformidad de la capa boronizada.

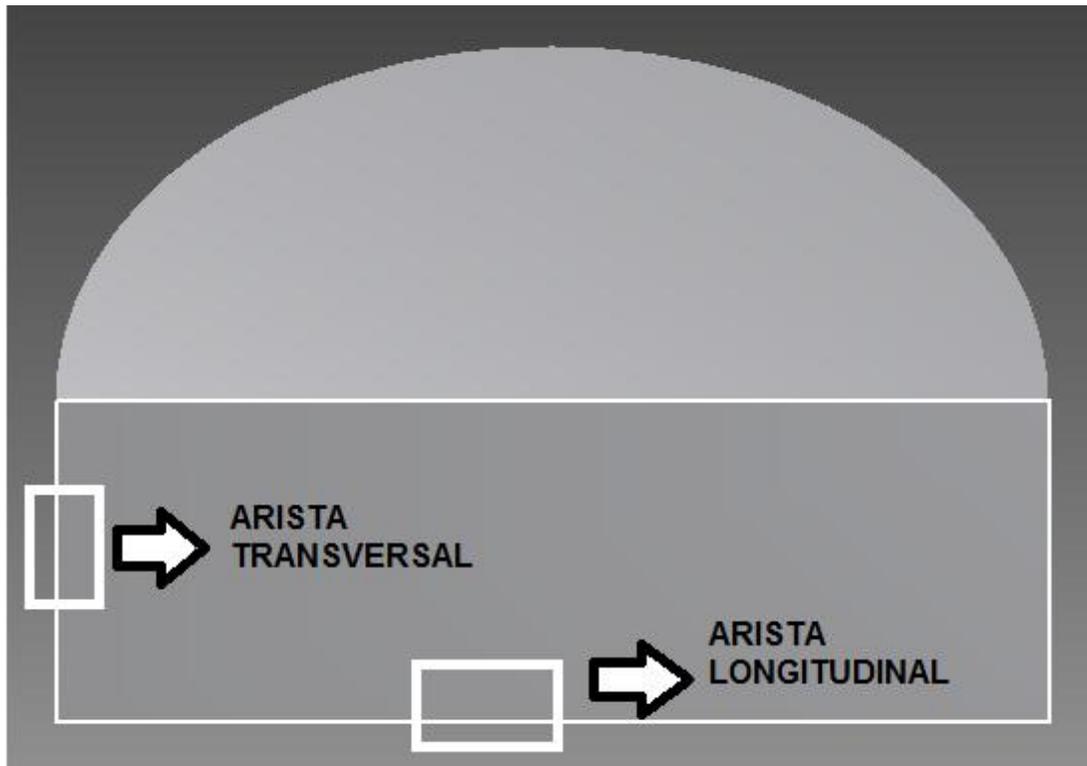


Figura 4.7 Secciones de la probeta montada para análisis metalográfico

4.3.1 AISI 1018 (E920)

4.3.1.1 Metalografías AISI 1018(E920), 1 hora de boronizado 850°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI 1018(E920) con una hora de boronizado, muestran una microestructura del material con una matriz ferrítica en su mayoría y con pequeños rasgos de matriz perlítica. Así mismo se puede observar para las dos metalografías, la presencia de dientes de sierra propios del proceso boronización.

Las mediciones realizadas a la capa boronizada indican que en su mayoría es una capa uniforme tanto en la arista transversal como en la arista longitudinal con un promedio de 34,10 μm de penetración transversal y promedio de 34 μm de penetración longitudinal.

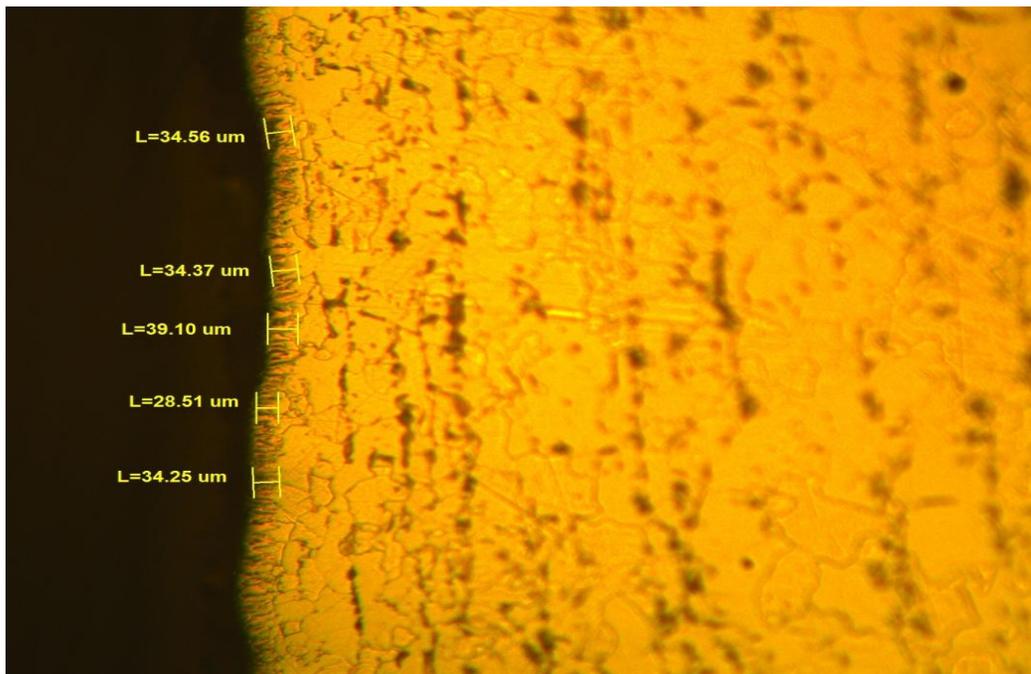


Figura 4.8 Metalografía arista transversal material AISI1018 (E920), 1 hora de boronizado (850°C) 200x

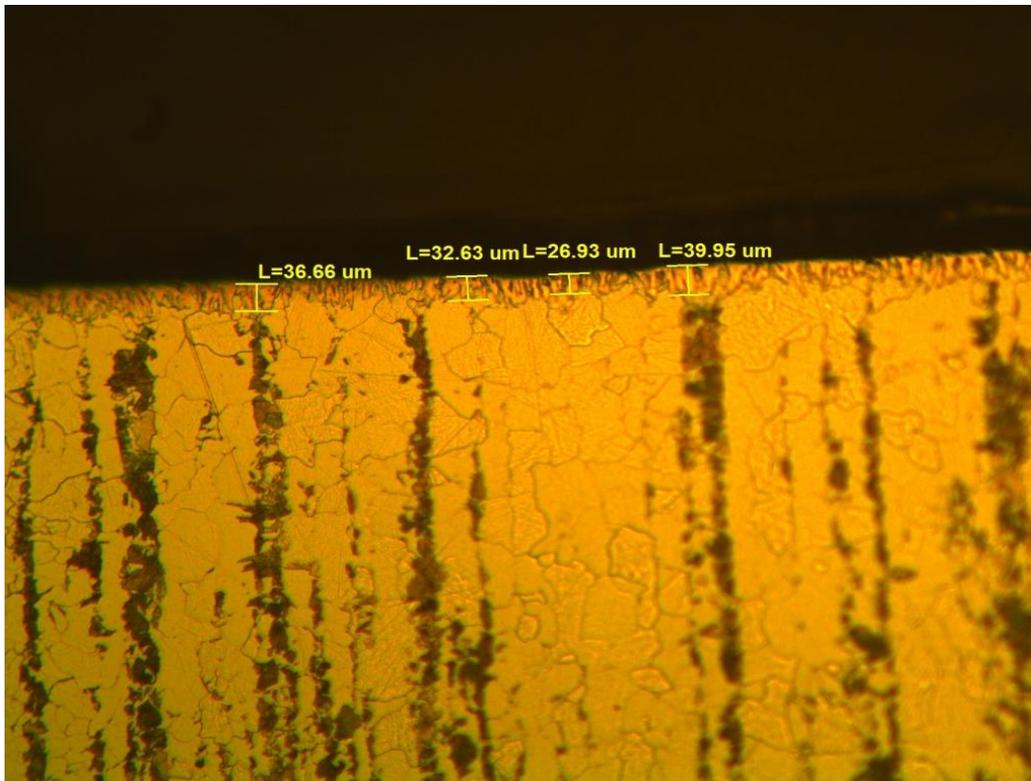


Figura 4.9 Metalografía arista longitudinal material AISI1018 (E920), 1 hora de boronizado (850°C) 200x

Tabla 4.19 Tabla de medición de espesores AISI 1018(E920) con una hora de boronizado

MEDICIÓN	Espesor capa boronizada transversal(um)	Espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	34,56	36,66
2	34,37	32,63
3	39,1	26,93
4	28,51	39,95
PROMEDIO	34,135	34,0425
DESV. ESTÁNDAR	4,3	5,6

4.3.1.2 Metalografías AISI 1018(E920), 5 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI 1018(E920) con cinco horas de boronizado, muestran una microestructura del material con una matriz ferrítica y perlítica. Así mismo se puede observar para las metalografías, la presencia de dientes de sierra propios del proceso boronización con más densidad incluso que lo obtenido con una hora de difusión. Las mediciones realizadas a la capa boronizada indican que hay un

incremento en la dimensión de la capa en la arista longitudinal en comparación con la arista transversal; el promedio de todas las mediciones muestran una capa 123,618 μm de penetración en la arista transversal de la capa boronizada y promedio de 148,29 μm de penetración en la arista longitudinal.

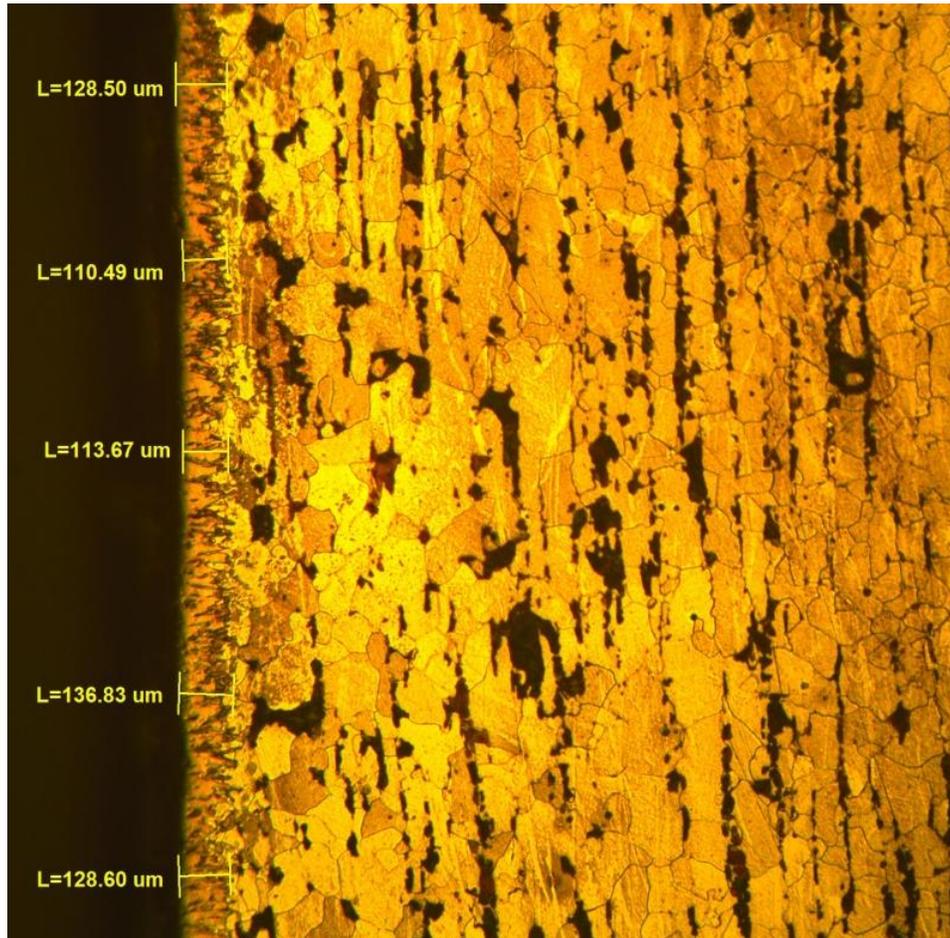


Figura 4.10 Metalografía arista transversal material AISI1018 (E920), 5 horas de boronizado (920°C) 100x

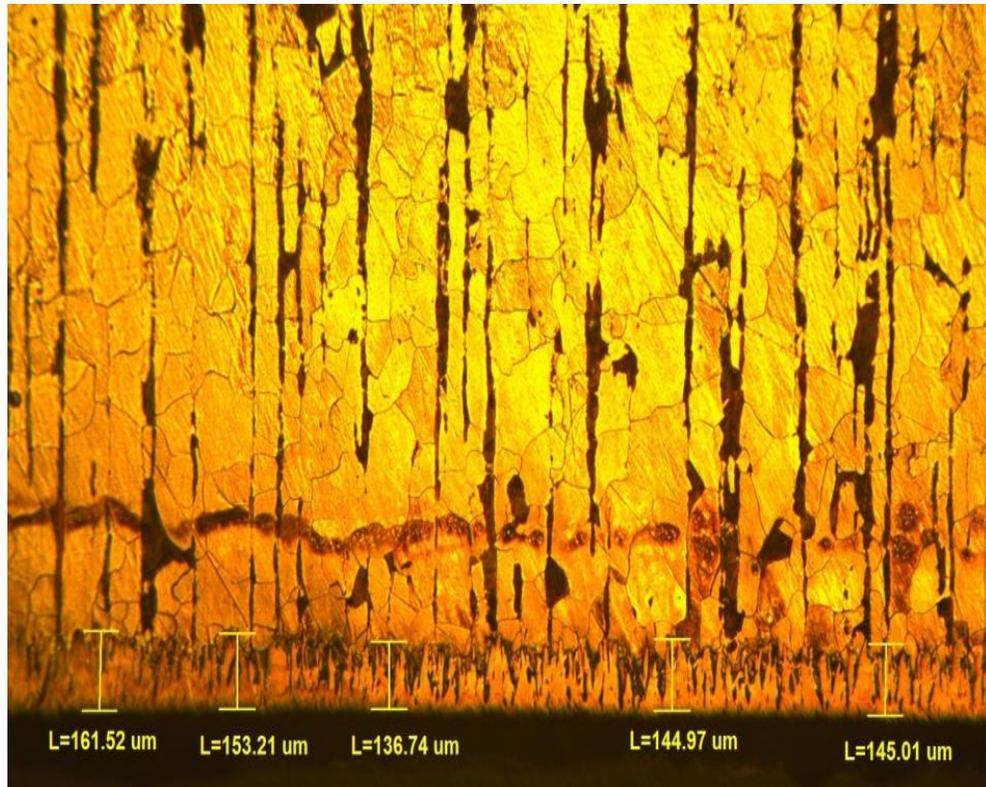


Figura 4.11 Metalografía arista longitudinal material AISI1018 (E920), 5 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.20 Tabla de medición de espesores AISI 1018(E920) con cinco horas de boronizado

MEDICIÓN	Espesor capa boronizada transversal(um)	Espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	128,5	161,52
2	110,49	153,21
3	113,67	136,74
	136,83	144,97
4	128,6	145,01
PROMEDIO	123,618	148,29
DESV. ESTÁNDAR	11,1	9,4

Debido a los resultados presentados se establece que el proceso de boronizado para AISI 1018 puede ser realizado a 920°C con una permanencia de 5 horas para obtener una profundidad mayor de boronizado.

4.3.2 AISI 316L (A200)

4.3.2.1 Metalografías AISI 316L (A200), 1 hora de boronizado 850°C

La metalografía transversal del acero inoxidable austenítico AISI 316L (A200) muestra la microestructura del material con una matriz presumiblemente ferrítica, por el contrario la metalografía longitudinal no se encuentra bien preparada y no muestra la microestructura del material. Las dos metalografías muestran la difusión del compuesto de boro utilizado en este proceso y aunque no presentan la forma característica de dientes de sierra es evidente la presencia de una capa difundida hacia el material base. Las mediciones realizadas a la capa boronizada indican uniformidad a lo largo de las dos aristas con un promedio de 14,50 μm de penetración.

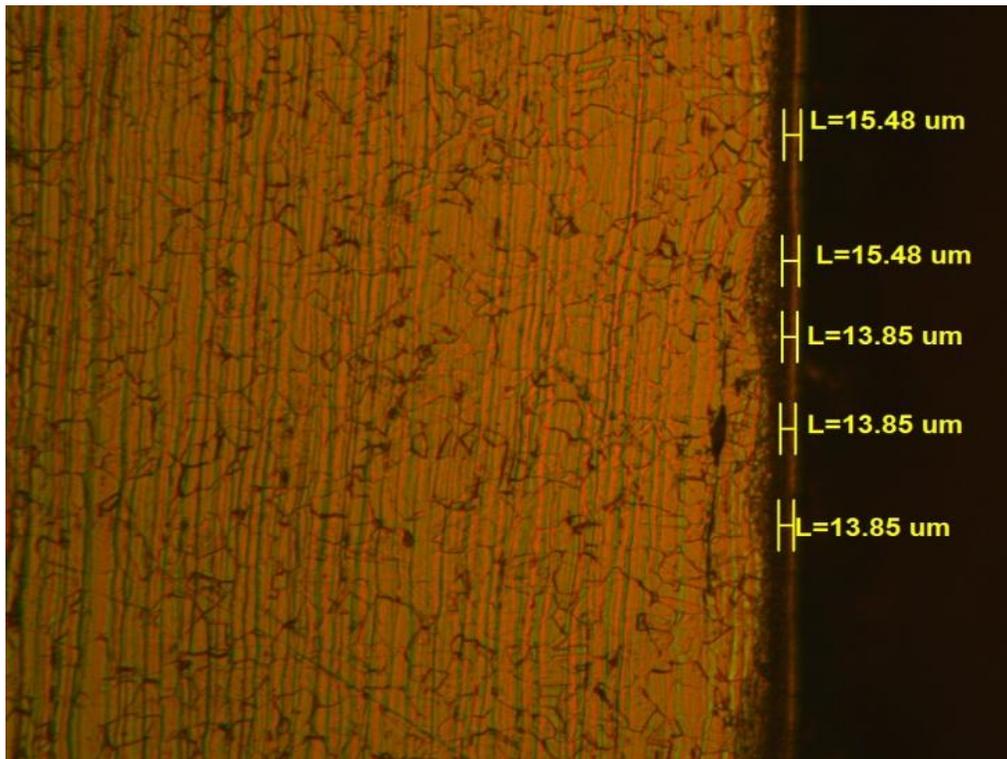


Figura 4.12 Metalografía arista transversal material AISI 316L (A200), 1 hora de boronizado (850°C) 200x

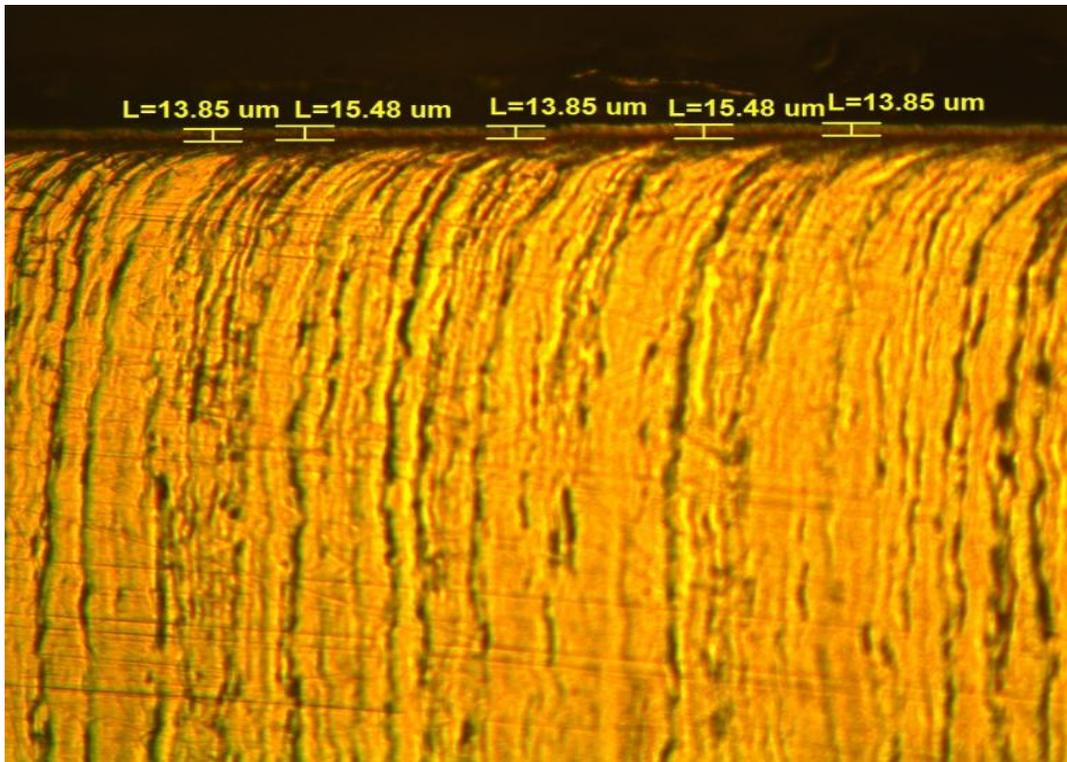


Figura 4.13 Metalografía arista longitudinal material AISI 316L (A200), 1 hora de boronizado (850°C) 200x

Tabla 4.21 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con una hora de boronizado

AISI 316L(A200)		
MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	15,48	13,85
2	15,48	15,48
3	13,85	13,85
4	13,85	15,48
5	13,85	13,85
PROMEDIO	14,502	14,502
DESV. ESTÁNDAR	0,9	0,9

4.3.2.2 Metalografías AISI 316L (A200), 5 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI 316L (A200) con cinco horas de boronizado, no muestran claramente su microestructura. Sin embargo se puede apreciar en las metalografías la capa de boro difundida hacia el material base. Así mismo al igual que en el anterior resultado la capa no presenta la característica de dientes de sierra, en general es una capa uniforme en las dos secciones presentadas con un promedio de 19 μm de penetración en la arista transversal y 17 μm en la arista longitudinal.

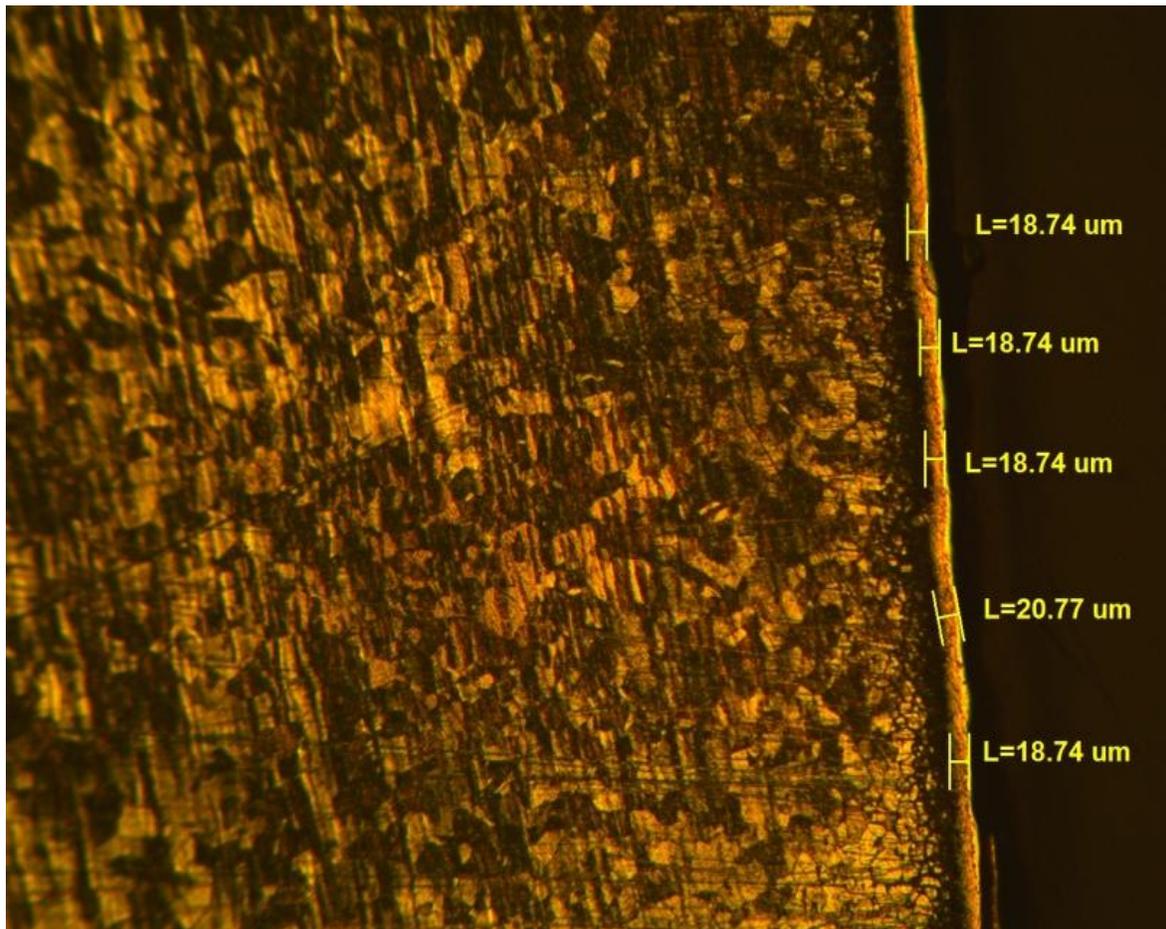


Figura 4.14 Metalografía arista longitudinal material AISI 316L (A200), 5 horas de boronizado (920°C) 200x

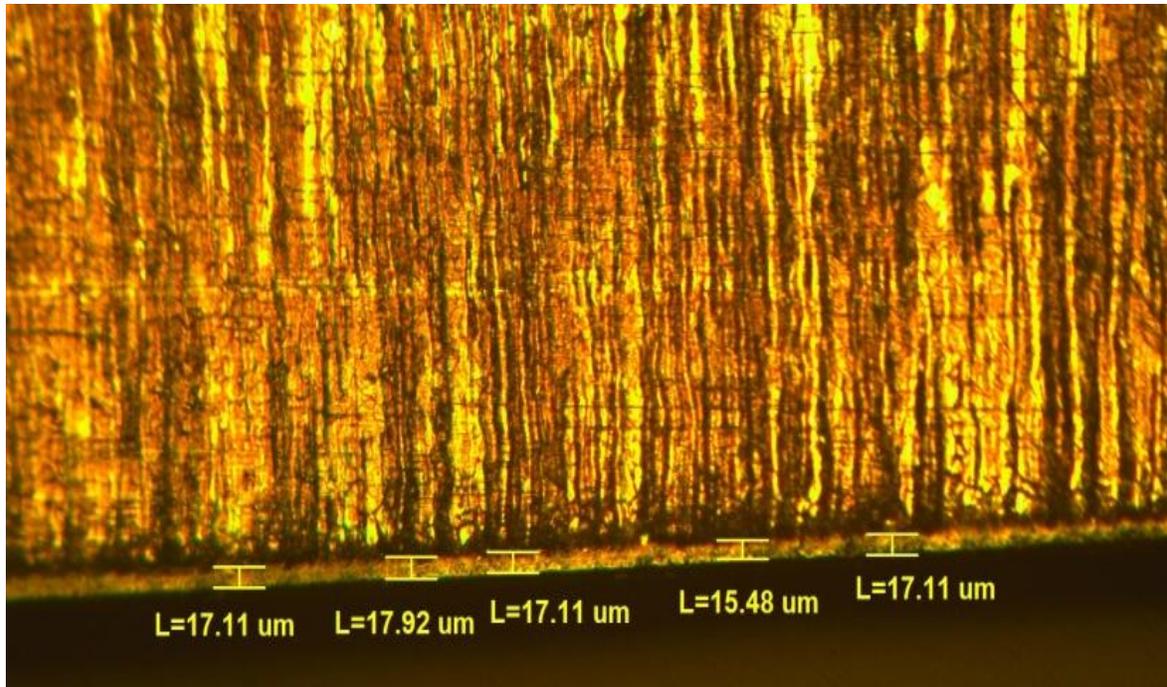


Figura 4.15 Metalografía arista longitudinal material AISI 316L (A200), 5 horas de boronizado (920°C) 200x

Tabla 4.22 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con cinco horas de boronizado

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	18,74	17,11
2	18,74	17,92
3	18,74	17,11
4	20,77	15,48
5	18,74	17,11
PROMEDIO	19,146	16,946
DESV. ESTÁNDAR	0,9	0,9

Es importante anotar que a pesar de la diferencia de tiempo de difusión no se logra una profundidad significativa con el resultado de una hora de boronizado descrito anteriormente para este material, esto se debe en gran medida a los componentes que posee el material base. Debido a los resultados presentados se establece que el proceso de

boronizado para AISI 316L puede ser realizado a 920°C con una permanencia de 5 horas para obtener una mayor profundidad de capa boronizada.

4.3.3 AISI 4140 (V320)

4.3.3.1 Metalografías AISI 4140 (V320), 1 hora de boronizado 850°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI 4140 con una hora de boronizado, muestra una matriz ferrítica con rasgos de matriz perlítica en su microestructura. Se observa además que la capa de boro se difunde hacia el material base con la característica morfología de dientes de sierra. La capa de boro en general es uniforme con un promedio en la arista transversal de 43,47 μm y promedio en la arista longitudinal de 43,54 μm , lo cual advierte homogeneidad en ambas orientaciones.

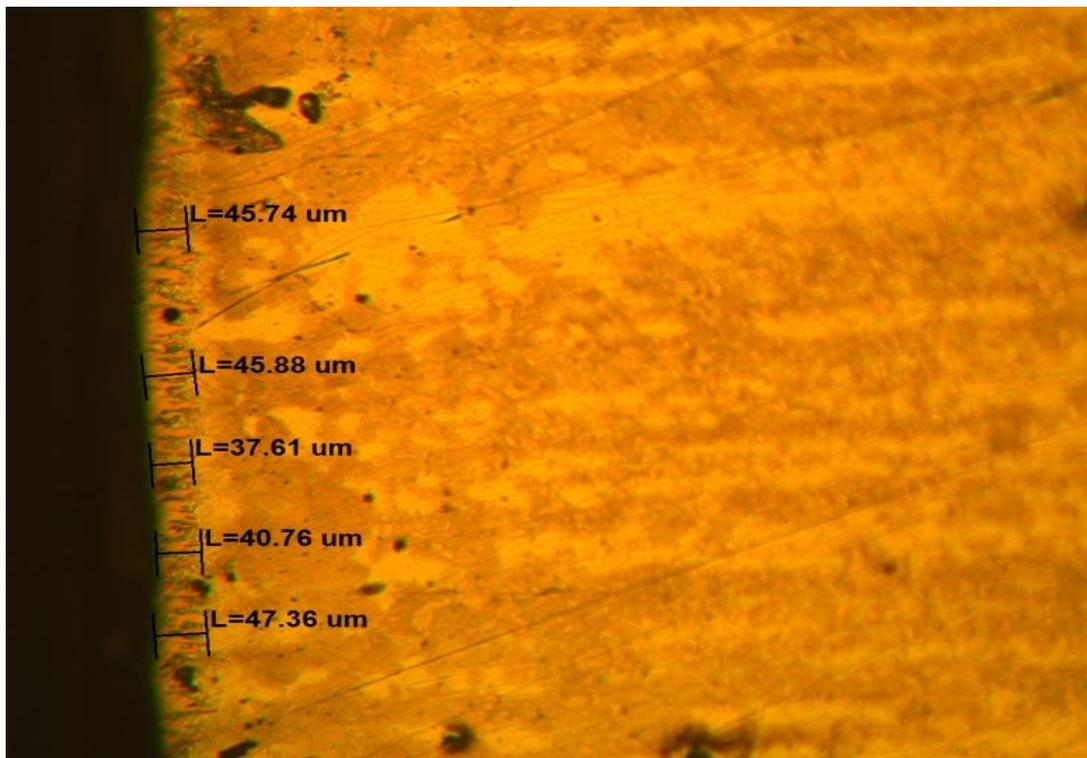


Figura 4.16 Metalografía arista transversal material AISI 4140(V320), 1 hora de boronizado (850°C) 200x

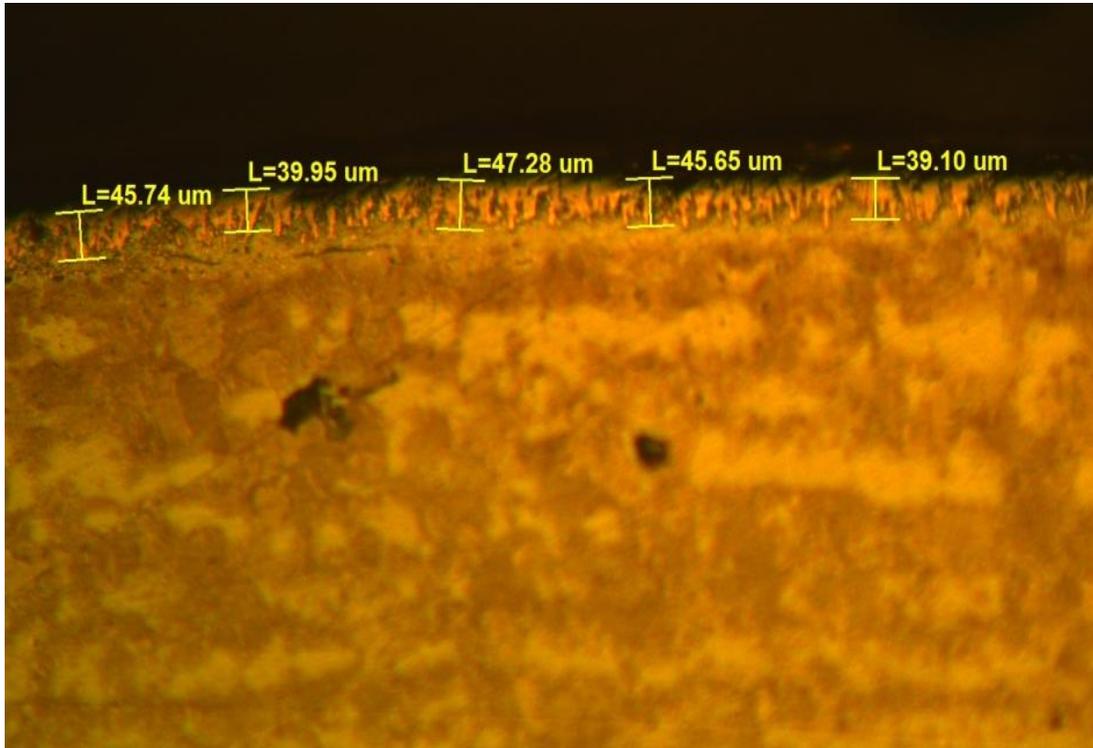


Figura 4.17 Metalografía arista longitudinal material AISI 4140(V320), 1 hora de boronizado (850°C) 200x

Tabla 4.23 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con una hora de boronizado

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	45,74	45,74
2	45,88	39,95
3	37,61	47,28
4	40,76	45,65
5	47,36	39,1
PROMEDIO	43,47	43,54
DESV. ESTÁNDAR	4,1	3,7

4.3.3.2 Metalografías AISI 4140 (V320), 5 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI 4140 con cinco horas de boronizado, muestra una matriz ferrítica en su mayoría en su microestructura. Se observa además que la capa de boro se difunde en el material base con la característica morfología de dientes de sierra. La capa de boro en general es uniforme con un promedio de penetración en arista transversal de 42,58 μm y promedio de penetración en arista longitudinal de 41,74 μm .

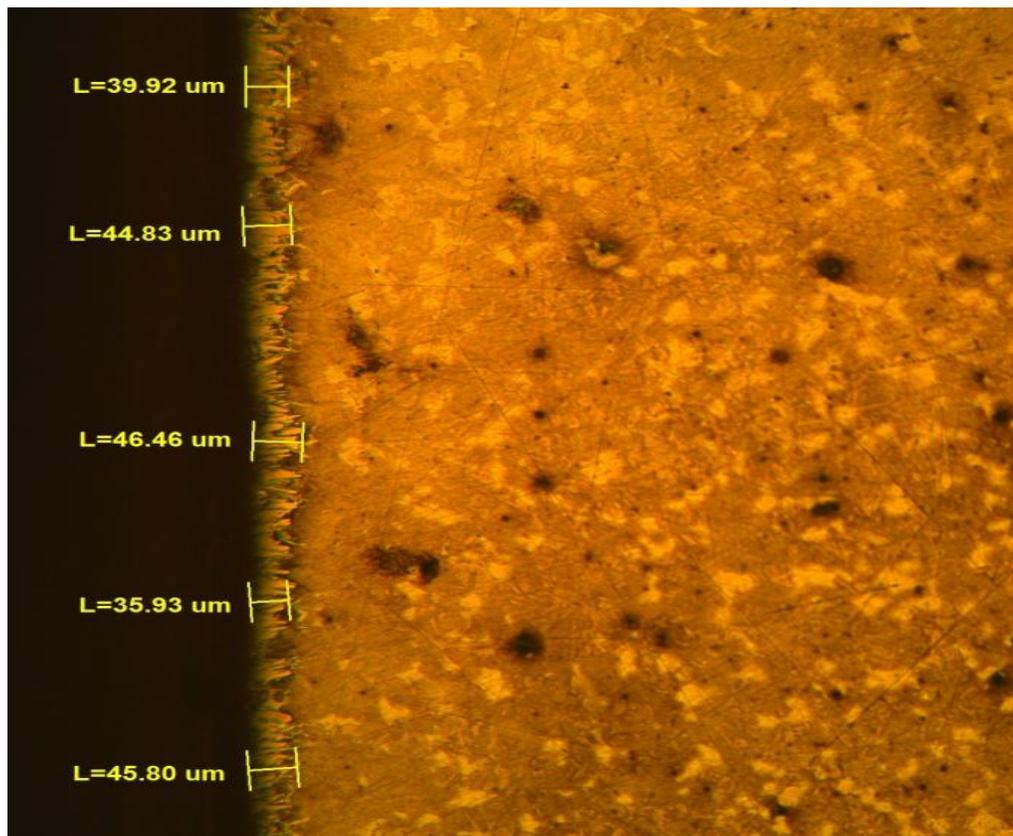


Figura 4.18 Metalografía arista transversal material AISI 4140(V320), 5 horas de boronizado (920°C) 200x

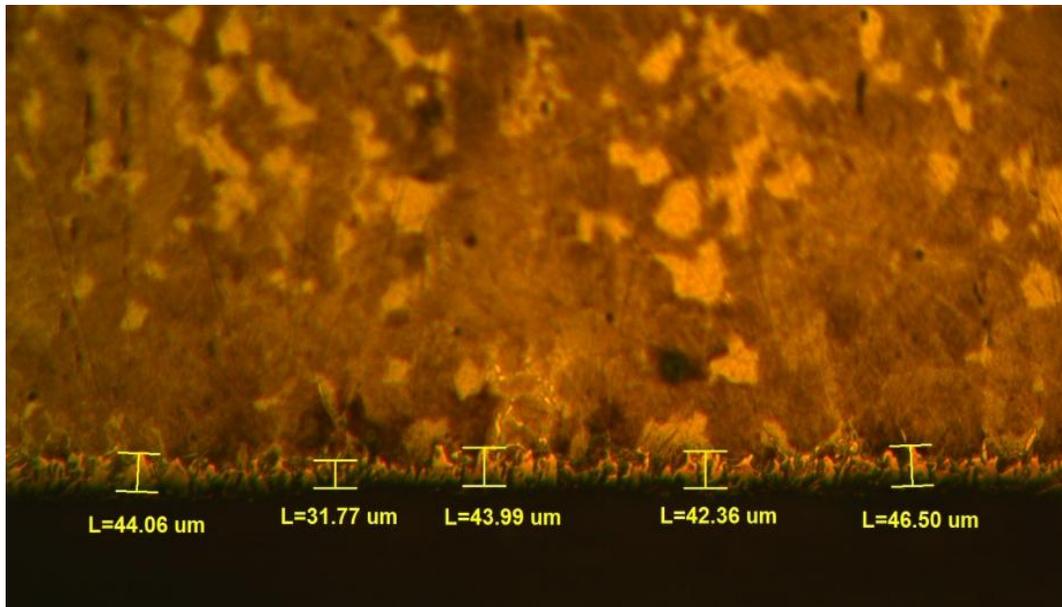


Figura 4.19 Metalografía arista longitudinal material AISI 4140(V320), 5 horas de boronizado (920°C) 200x

Tabla 4.24 Tabla de medición de espesores AISI 316L (A200) con cinco horas de boronizado

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	39,92	44,06
2	44,83	31,77
3	46,46	43,99
4	35,93	42,36
5	45,8	46,5
PROMEDIO	42,588	41,74
DESV. ESTÁNDAR	4,5	5,8

Es importante anotar que a pesar de la diferencia de tiempo de difusión de boro no se logra incrementar la profundidad del boronizado comparando la difusión de una hora y cinco horas para este material, esto puede responder a una saturación del compuesto que se forma en la superficie que impide la difusión. La presencia de los elementos aleantes del acero reduce la velocidad de la difusión y la transformación de especies. Se establece que el proceso de boronizado para AISI V320 puede ser realizado a 920°C con una permanencia de 1 hora para obtener una profundidad de boronizado significativa.

4.3.4 Fundición de hierro con aleación de Níquel

Las metalografías de las aristas transversal y longitudinal de la fundición de níquel para una hora de boronizado no presentan claramente su microestructura, incluso para altas magnificaciones. No existe una capa de boro claramente identificable. Sin embargo, es importante anotar que la difusión de boro en carbono es reducida de acuerdo a la cantidad de carbono presente en el material (Sección 2.3.3.4) y se prevé que el boro se difunda apartadamente en el carbono formando boro-cementita $Fe_3(B, C)$.

4.3.4.1 Metalografías Fundición de Níquel, 1 hora de boronizado 850°C

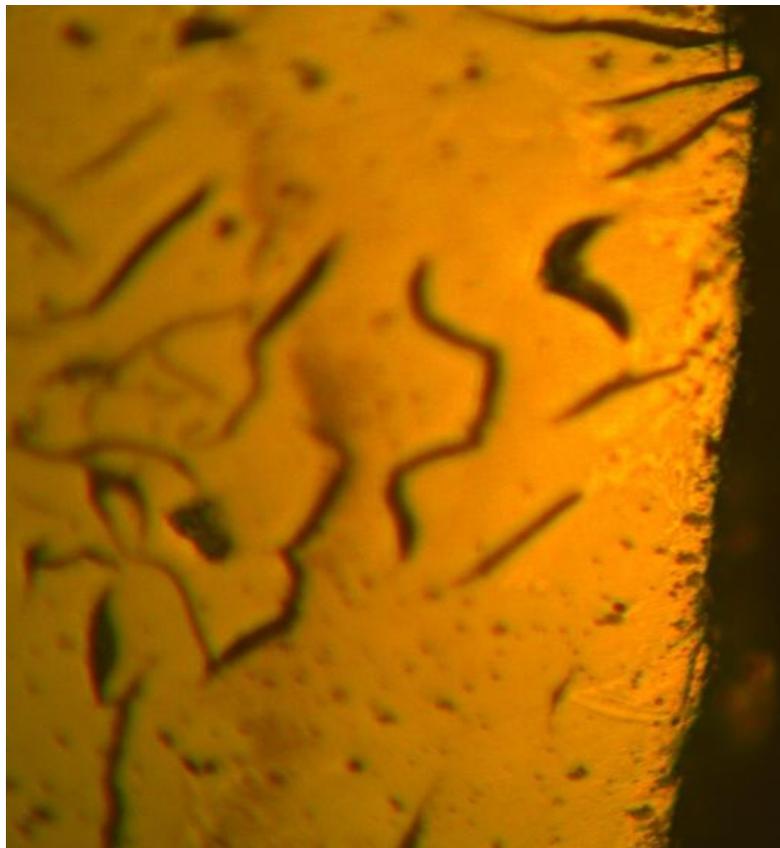


Figura 4.20 Metalografía arista transversal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 1 hora de boronizado (850°C) 500x



Figura 4.21 Metalografía arista longitudinal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 1 hora de boronizado (850°C) 500x

4.3.4.2 Metalografías Fundición de hierro con aleación de Níquel, 5 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal de la fundición de hierro con aleación níquel para cinco horas de boronizado presenta la microestructura básica de una fundición con grafito en forma de hojuelas. En las metalografías no se puede observar una capa de boro alrededor de los límites del material substrato, sin embargo se prevé que el boro se difunda hacia el material base en forma de boro-cementita $Fe_3(B, C)$ (Sección 2.3.3.4). Existe una zona que evidencia difusión. La técnica de microscopía óptica no permite caracterizar las mismas. Se recomienda observar la región con microscopio electrónico de barrido.

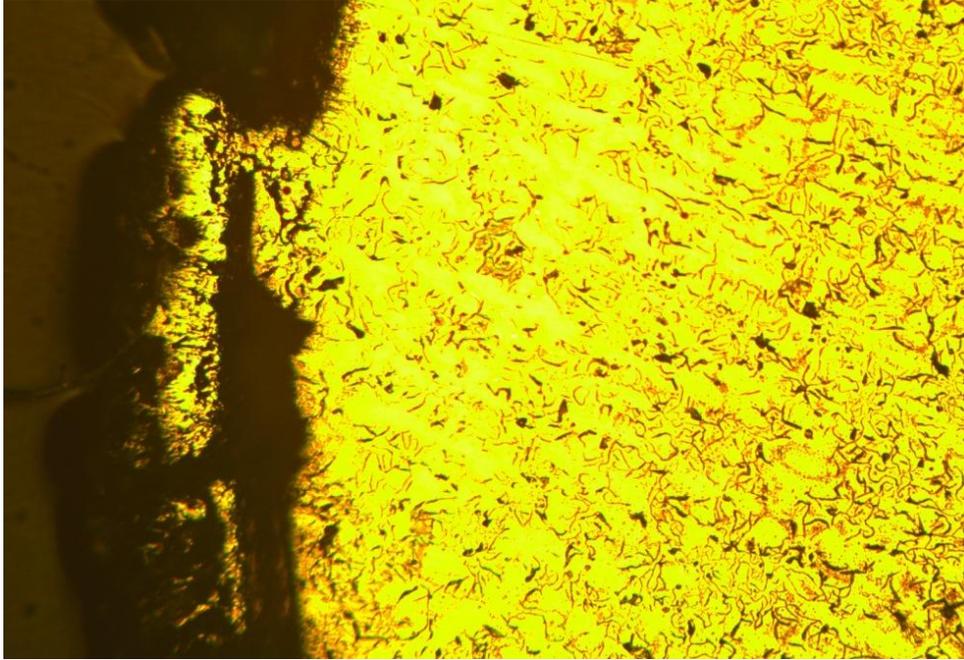


Figura 4.22 Metalografía arista transversal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 5 horas de boronizado (920°C) 100x

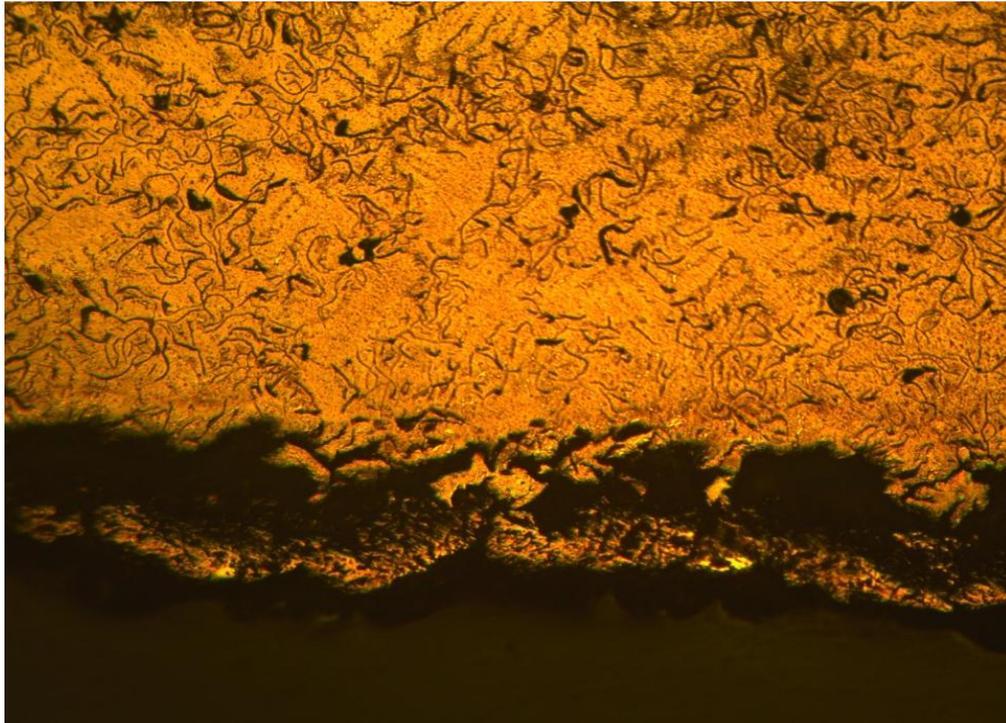


Figura 4.23 Metalografía arista longitudinal material Fundición de hierro con aleación de Níquel, 5 horas de boronizado (920°C) 100x

4.3.5 AISI D3 (K100)

4.3.5.1 Metalografías AISI D3 (K100), 1 hora de boronizado 850°C

. Es importante notar que para los resultados obtenidos a alta magnificación se observa que la difusión no es considerable. Se observa la formación de la morfología de dientes de sierra. La capa de boro presenta un promedio de 8,42 μm para la metalografía transversal y 6,31 μm para la metalografía longitudinal. Relativamente se puede comentar que la capa no presenta una uniformidad a lo largo de la superficie; aunque la medición puede estar afectada por la inexactitud y/o falta de apreciación en el proceso de medición

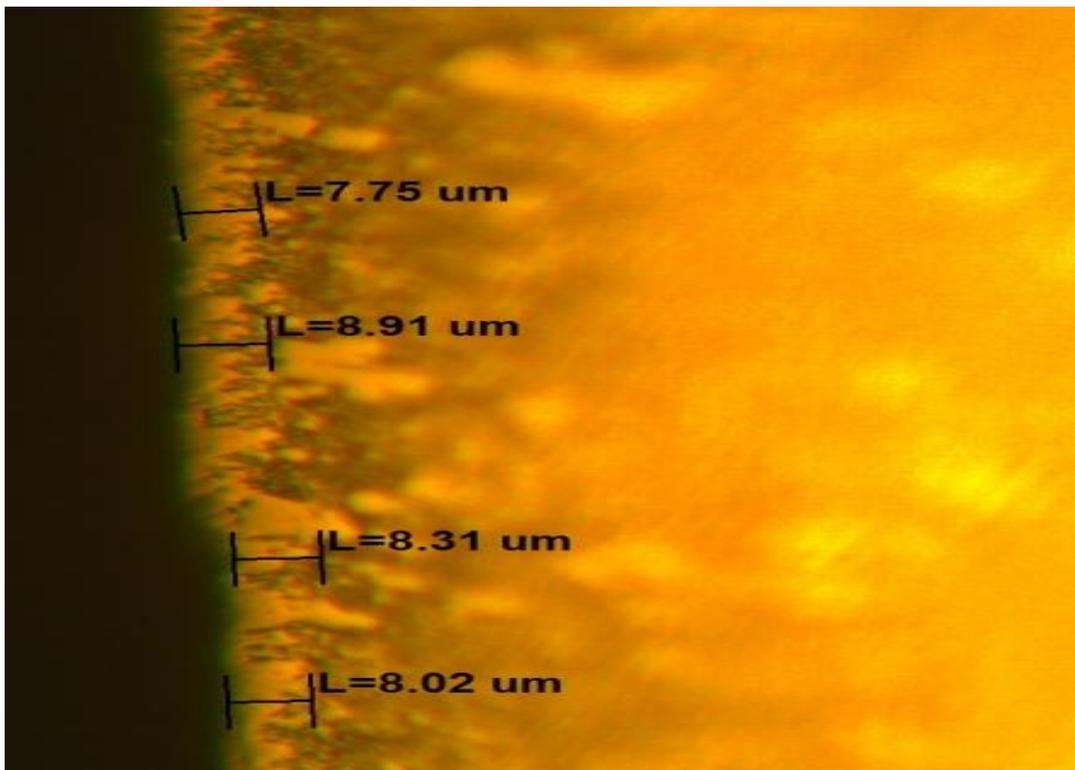


Figura 4.24 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 1 hora de boronizado (850°C) 500x

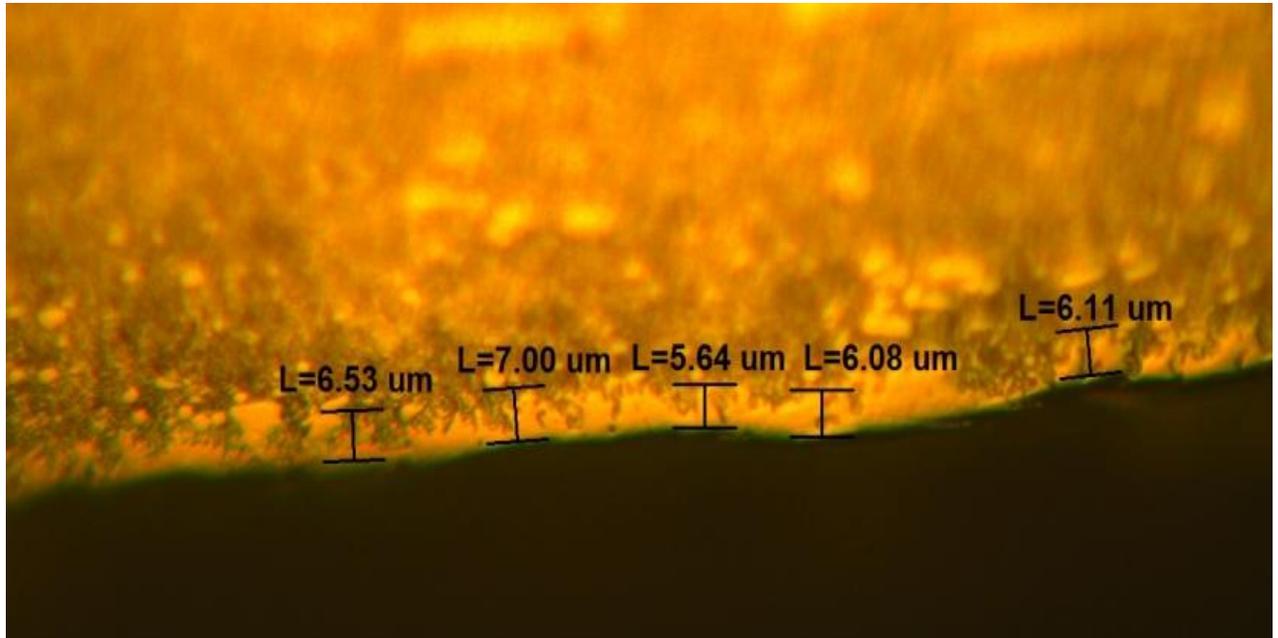


Figura 4.25 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 1 hora de boronizado (850°C) 500x

Tabla 4.25 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con una hora de boronizado (850°C)

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	7,75	6,53
2	8,91	7
3	8,31	5,64
4	8,02	6,08
PROMEDIO	8,2475	6,31
DESV. ESTÁNDAR	0,5	0,6

4.3.5.2 Metalografías AISI D3 (K100), 3 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI D3 (K100) con tres horas de boronizado, que la magnificación no permite diferenciar la presencia de perlita y ferrita en la microestructura del material base. Se observa además la morfología de dientes de sierra. Los resultados muestran que la difusión es distinta para la sección transversal y longitudinal. Por un lado se tiene un promedio de 29,70 μm para la metalografía de arista transversal y 31,95 μm para la metalografía de arista longitudinal.

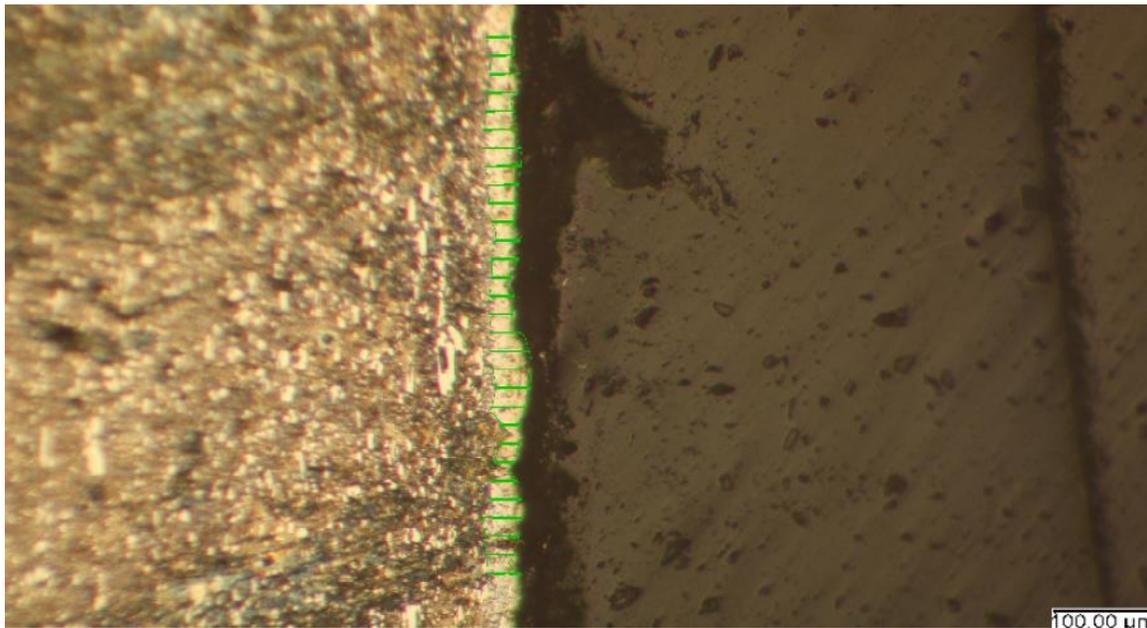


Figura 4.26 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 3 horas de boronizado (920°C) 100x

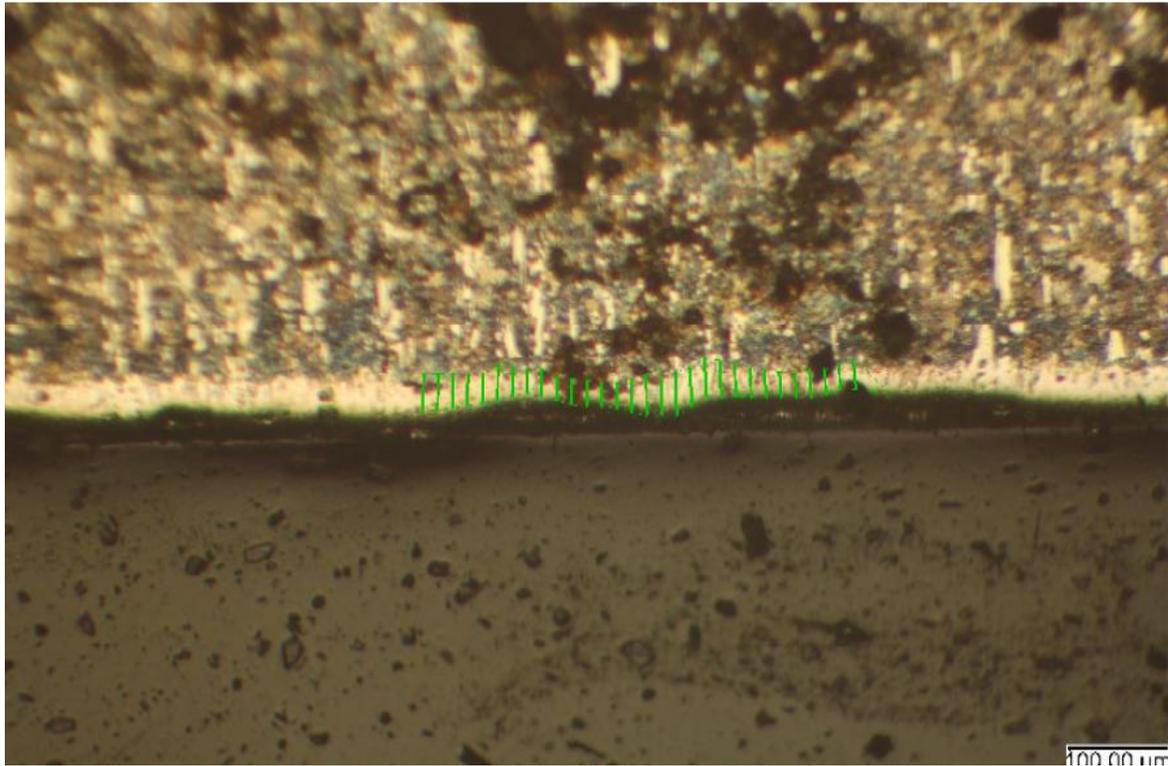


Figura 4.27 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 3 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.26 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con tres horas de boronizado (920°C)

AISI D3(K100)		
MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	29,17	31,1
2	30,55	36,42
3	29,7	29,69
4	31,09	33,9
5	28,02	28,66
PROMEDIO	29,706	31,95
DESV. ESTÁNDAR	1,2	3,2

4.3.5.3 Metalografías AISI D3 (K100), 4 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI D3 (K100) con cuatro horas de boronizado no permiten diferenciar claramente la presencia de ferrita y perlita propia del material base. Se observa además la capa difundida de boro en el material substrato, aunque no presenta la morfología característica de dientes de sierra para el proceso de boronizado, se observa la difusión de boro claramente en forma de una fina capa. En general el recubrimiento superficial presenta mayor densidad en la arista transversal con un promedio de 55,28 μm , en comparación con la arista longitudinal que presenta un promedio de 42,28 μm .

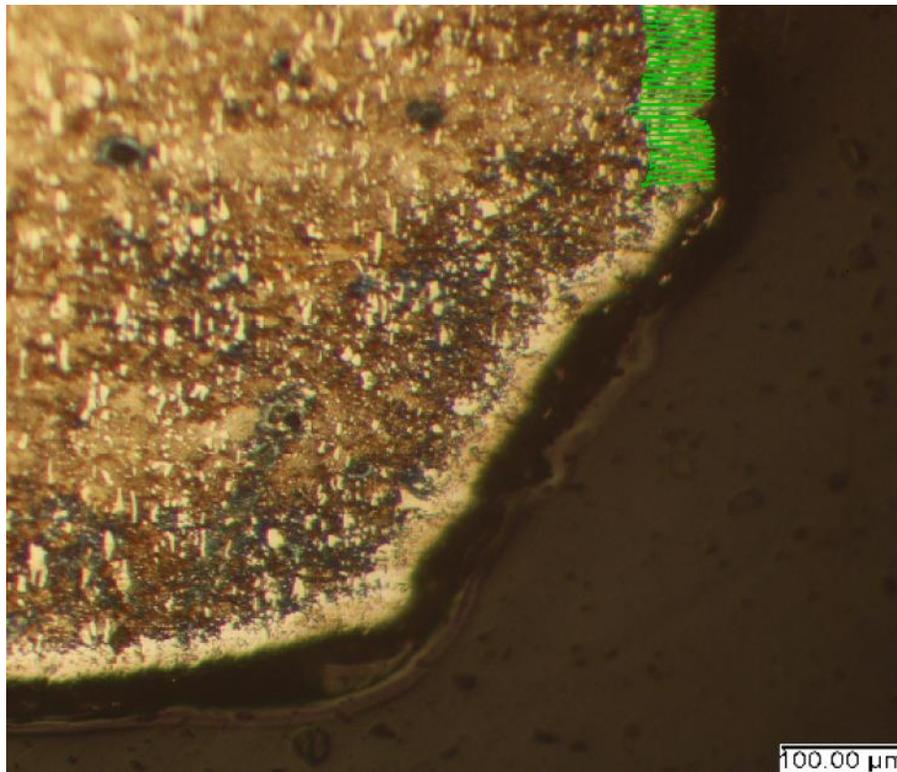


Figura 4.28 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 4 horas de boronizado (920°C) 100x

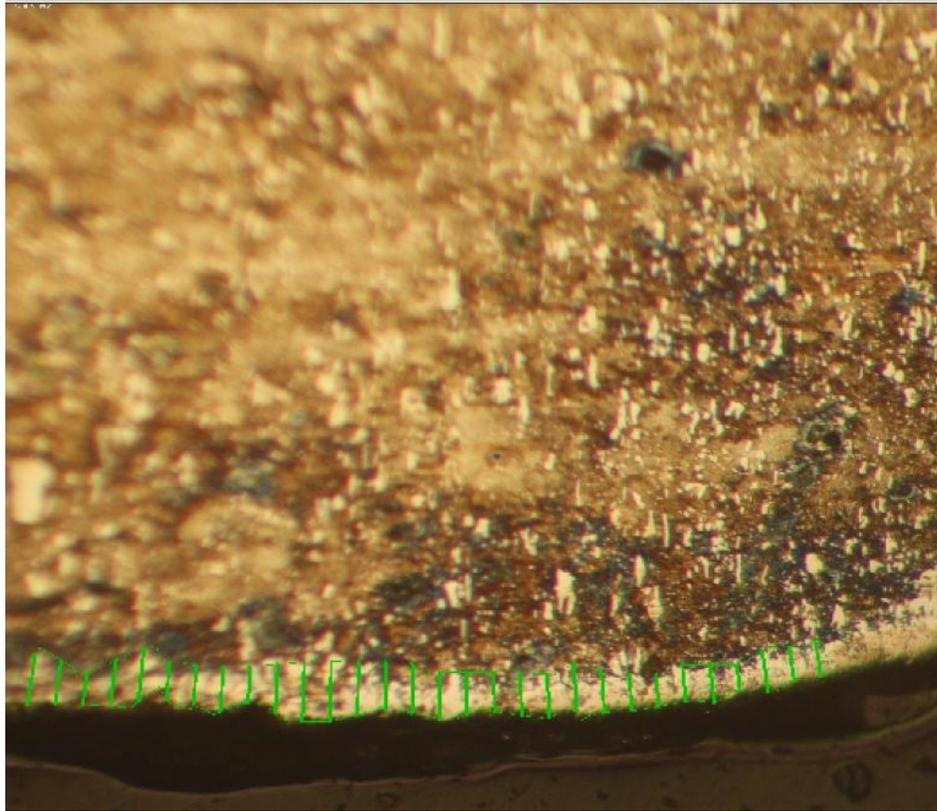


Figura 4.29 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 4 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.27 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cuatro horas de boronizado (920°C)

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	56,18	43,99
2	55,6	41,47
3	54,73	41,49
4	53,85	42,92
5	56,06	41,55
PROMEDIO	55,284	42,28
DESV. ESTÁNDAR	1,0	1,1

4.3.5.4 Metalografías AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado no muestran la microestructura de ferrita y perlita propia del material base. La capa de boro difundida en el material es notoria y presenta la morfología de dientes de sierra. Se observa además una mayor difusión en la parte transversal con un promedio de 60,31 μm ; en comparación con la parte longitudinal que presenta una capa de boro difundida con un promedio de 47,39 μm .

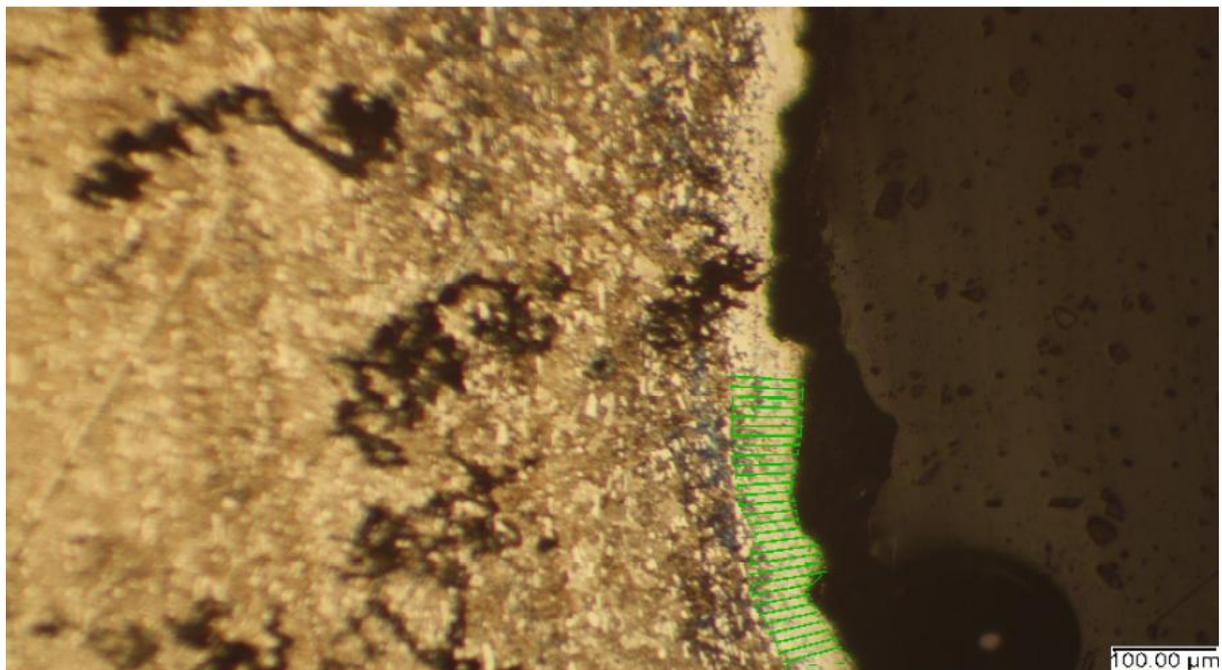


Figura 4.30 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado (920°C) 100x

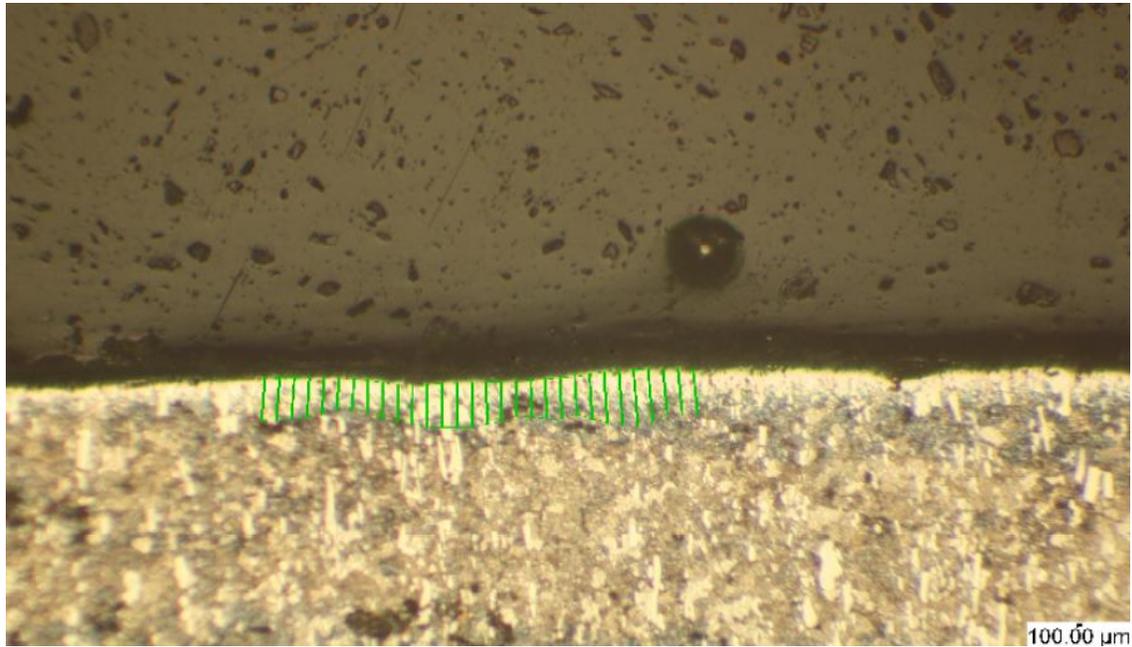


Figura 4.31 Metalografía arista longitudinal material AISI (K100), 5 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.28 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado (920°C)

AISI D3(K100)		
MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	62,77	47,44
2	60,57	45,67
3	58,36	44,27
4	60,34	48,48
5	59,53	51,07
PROMEDIO	60,31	47,39
DESV. ESTÁNDAR	1,6	2,6

4.3.5.5 Metalografías AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido en atmósfera inerte de Argón.

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI D3 con cinco horas de boronizado y tratamiento térmico de temple y revenido, no muestran una microestructura del material base con matriz ferrítica y bainítica propia del material base y del

tratamiento térmico aplicado. La capa de boro difundida en el material es notoria y presenta la morfología de dientes de sierra. Se observa en general una capa uniforme alrededor de las muestras con promedio transversal de penetración de $37,50 \mu\text{m}$ y promedio longitudinal de $31,25 \mu\text{m}$.

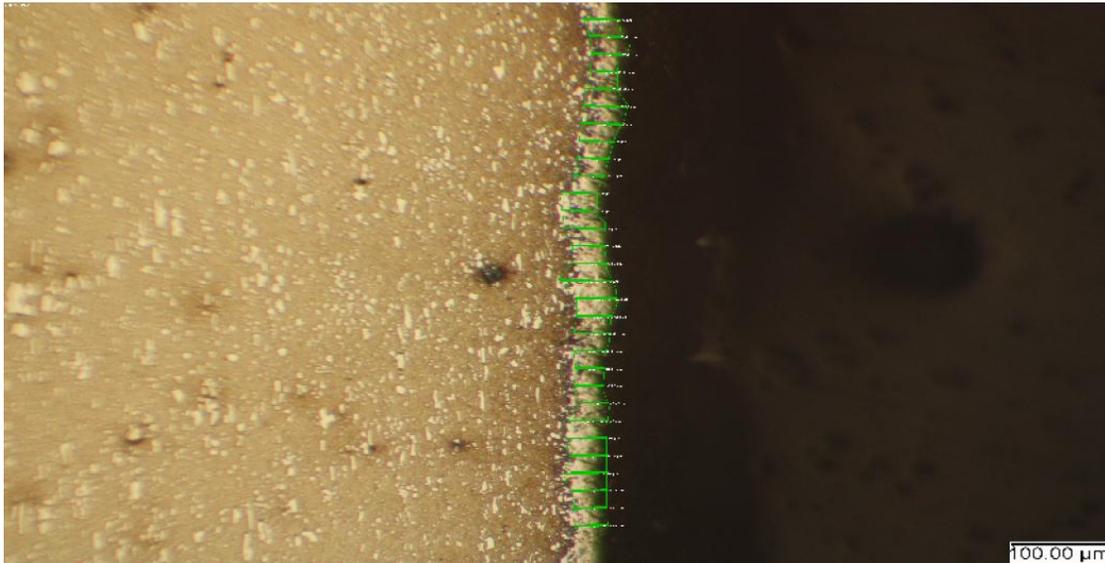


Figura 4.32 Metalografía arista transversal material AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x

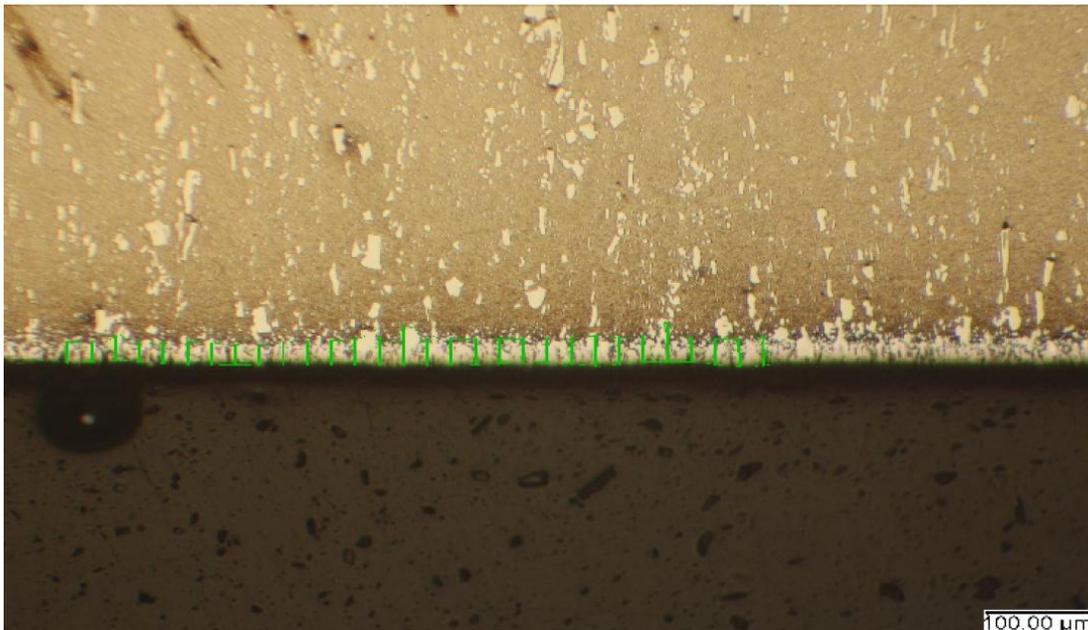


Figura 4.33 Metalografía arista longitudinal material AISI D3 (K100), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x

Tabla 4.29 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado (920°C) y tratamiento térmico de temple y revenido

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	38,39	29,97
2	37,04	30,53
3	37,01	32,21
4	37,82	31,65
5	37,27	31,93
PROMEDIO	37,506	31,258
DESV. ESTÁNDAR	0,6	1,0

Es importante comparar los resultados obtenidos con éstas metalografías y las metalografías de 5 horas de boronizado sin temple y revenido (Sección 4.3.5.4). Se observa claramente con los resultados obtenidos que la capa de boro se reduce considerablemente al realizar los tratamientos térmicos. Se prevé que durante la realización de los tratamientos térmicos la capa de boro se difundió hacia el medio circundante, a pesar de haberlos realizado con un gas protector para conservar la penetración de la capa de boro.

4.3.6 AISI AO1 (K460)

4.3.6.1 Metalografías AISI AO1 (K460), 3 horas de boronizado 920°C

Las metalografías de las aristas transversal y longitudinal del acero AISI AO1 (K460) con tres horas de boronizado, muestran una metalografía con matriz perlítica en general y breves rasgos de matriz ferrítica en su microestructura. Se puede observar una capa de boro notoria que se difunde a lo largo del material base y aunque no presenta la morfología de dientes de sierra, presenta una uniformidad en sus medidas con un promedio transversal de 50,55 μm y promedio de 64,62 μm en la parte longitudinal.

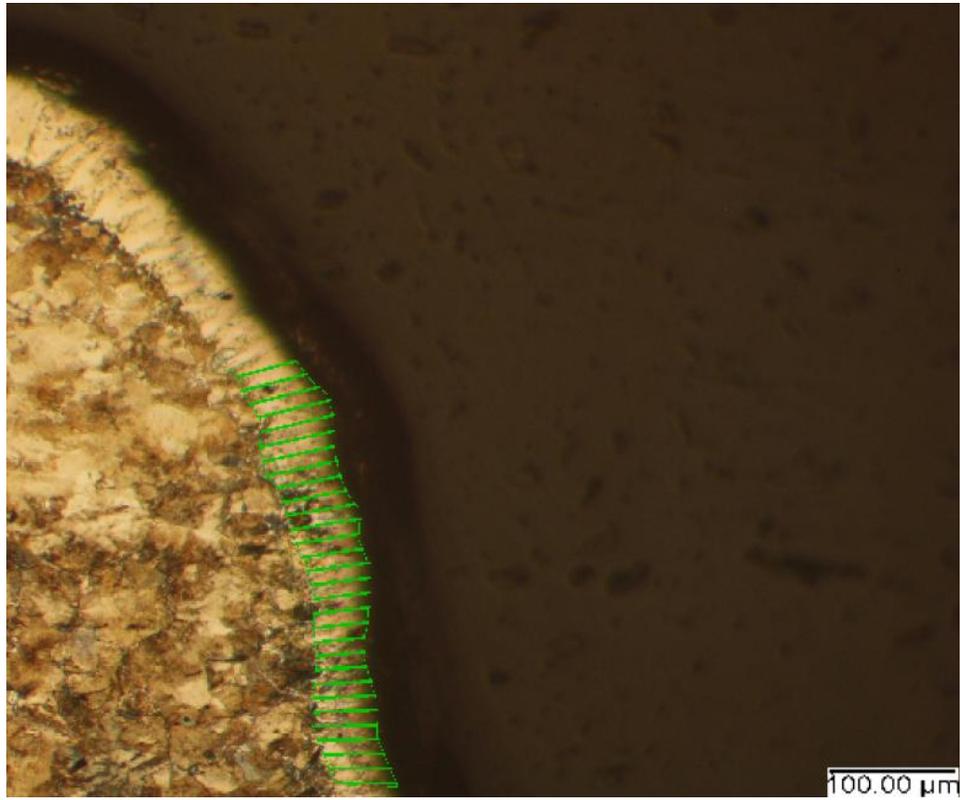


Figura 4.34 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 3 horas de boronizado (920°C) 100x

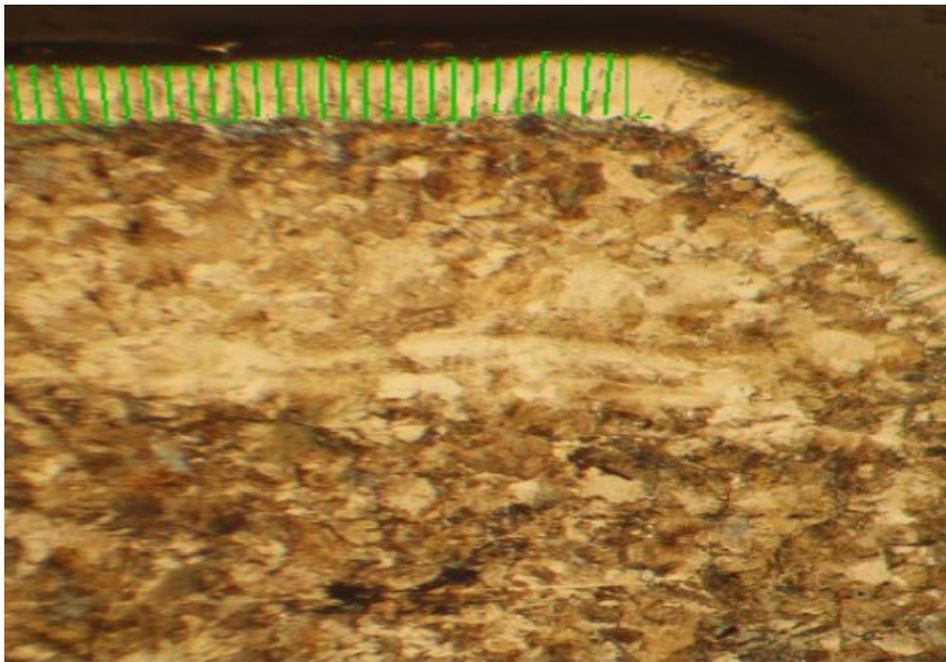


Figura 4.35 Metalografía arista longitudinal material AISI AO1 (K460), 3 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.30 Tabla de medición de espesores AISI AO1 (K460) con tres horas de boronizado (920°C)

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	50,05	64,67
2	51,38	64,65
3	50,76	64,62
4	51,29	63,62
5	49,3	65,58
PROMEDIO	50,556	64,628
DESV. ESTÁNDAR	0,9	0,7

4.3.6.2 Metalografías AISI AO1 (K460), 4 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI AO1 (K460) con cuatro horas de boronizado, muestra una microestructura con matriz perlítica en su mayoría. Se observa además notoriamente la capa difundida de boro en el material substrato a lo largo de la arista transversal y longitudinal, presenta la morfología característica de dientes de sierra para el proceso de boronizado. En general el recubrimiento presenta uniformidad a lo largo de la superficie tanto transversal como longitudinal. Los resultados muestran que existe un promedio de 63,38 μm para la arista transversal y 67,808 μm para la arista longitudinal.

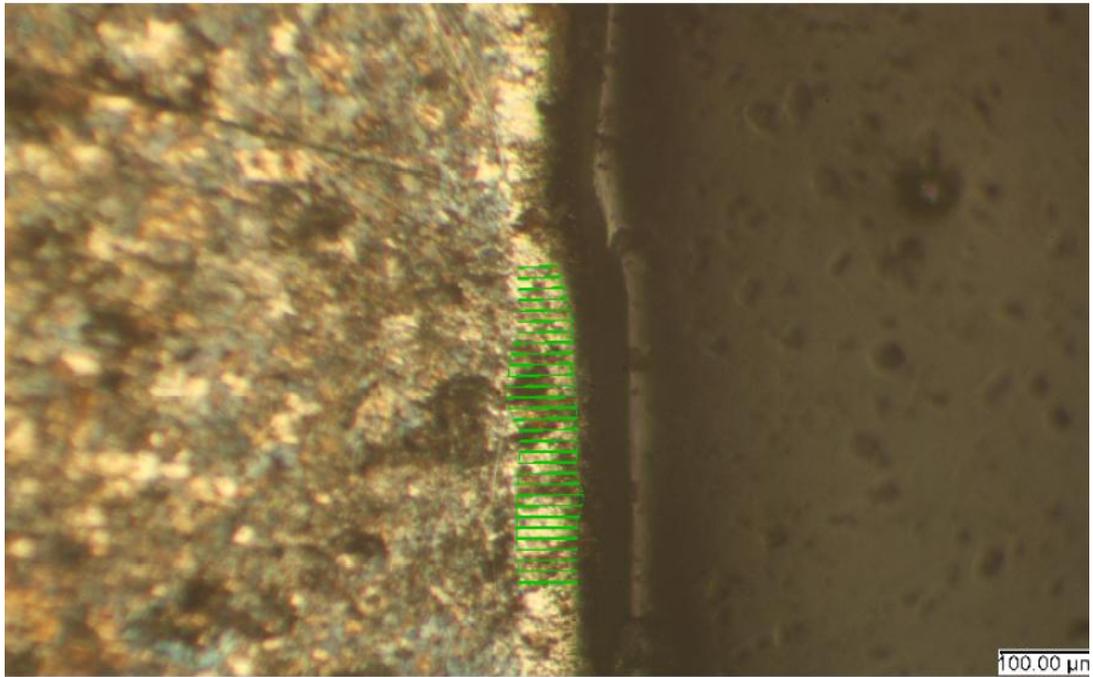


Figura 4.36 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 4 horas de boronizado (920°C) 100x

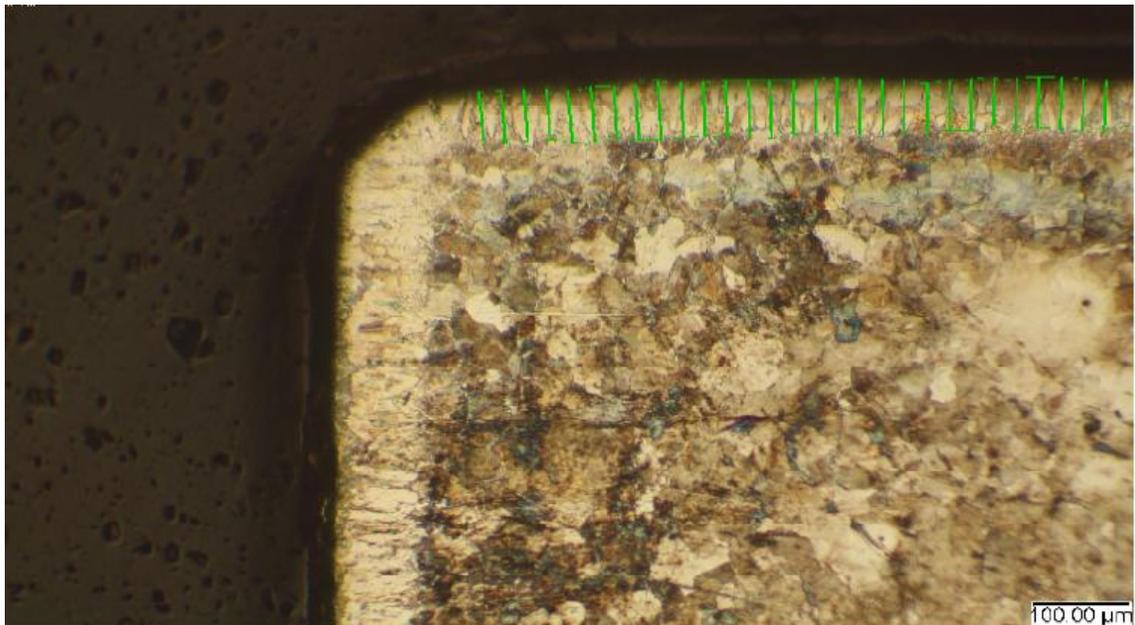


Figura 4.37 Metalografía arista longitudinal material AISI (K460), 4 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.31 Tabla de medición de espesores AISI AO1 (K460) con cuatro horas de boronizado (920°C)

AISI AO1(K460)		
MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	63,07	66,58
2	63,87	66,56
3	63,88	69,02
4	62,76	66,52
5	63,32	70,36
PROMEDIO	63,38	67,808
DESV. ESTÁNDAR	0,5	1,8

4.3.6.3 Metalografías AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado 920°C

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI AO1 (K460) con cinco horas de boronizado, muestra una microestructura del material con matriz perlítica. La difusión de la capa boronizada se muestra claramente y presenta uniformidad lo largo de la superficie transversal y longitudinal. Los resultados muestran que la capa transversal posee una penetración promedio de 50,75 μm y la capa longitudinal una penetración promedio de 57,6 μm .

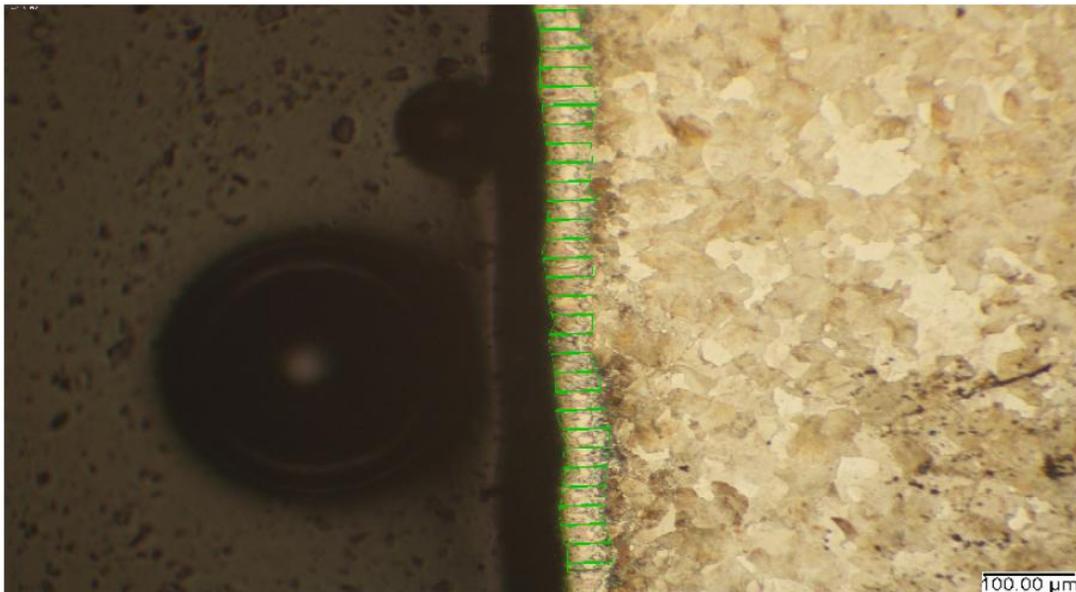


Figura 4.38 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) 100x

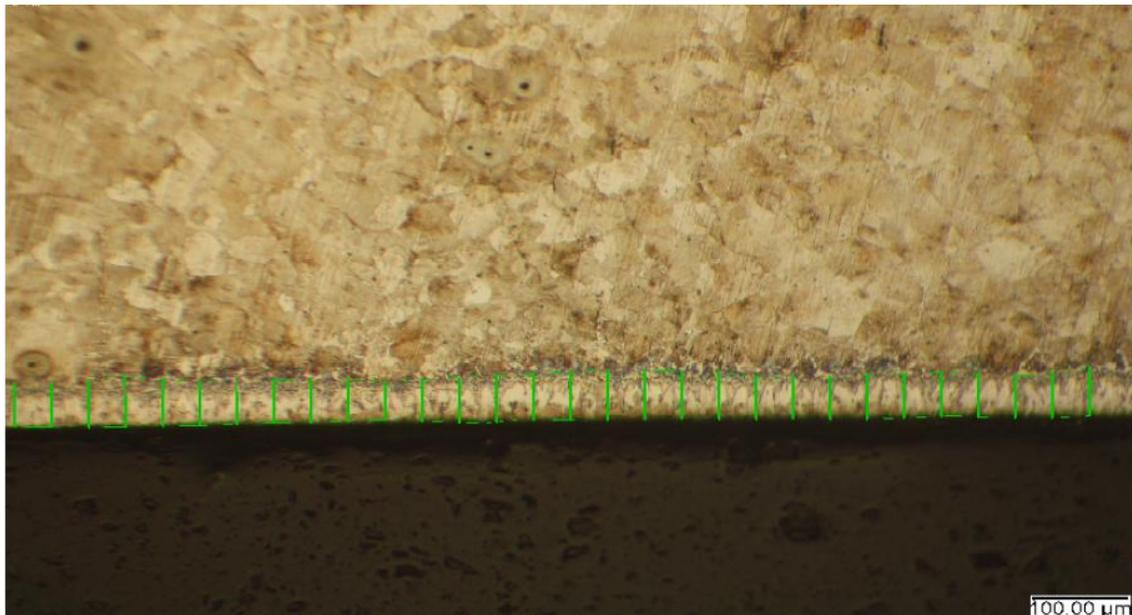


Figura 4.39 Metalografía arista longitudinal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) 100x

Tabla 4.32 Tabla de medición de espesores AISI AO1 (K460) con cinco horas de boronizado

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada radial(um)
1	52,44	56,04
2	48,78	56,59
3	49,63	59,11
4	51,3	57,43
5	51,6	58,83
PROMEDIO	50,75	57,6
DESV. ESTÁNDAR	1,5	1,3

4.3.6.4 Metalografías AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado 920°C con tratamiento térmico de temple y revenido en atmósfera inerte de Argón.

Las metalografías transversal y longitudinal del acero AISI AO1 con cinco horas de boronizado y tratamiento térmico de temple y revenido, no muestran una microestructura del material base con matriz bainítica esperada para el tratamiento térmico aplicado al material base. La capa de boro difundida en el material es notoria y no presenta la

morfología de dientes de sierra. Se observa en general una capa uniforme alrededor de las muestras con promedio transversal de penetración de $69,26 \mu\text{m}$ y promedio longitudinal de $59,39 \mu\text{m}$.

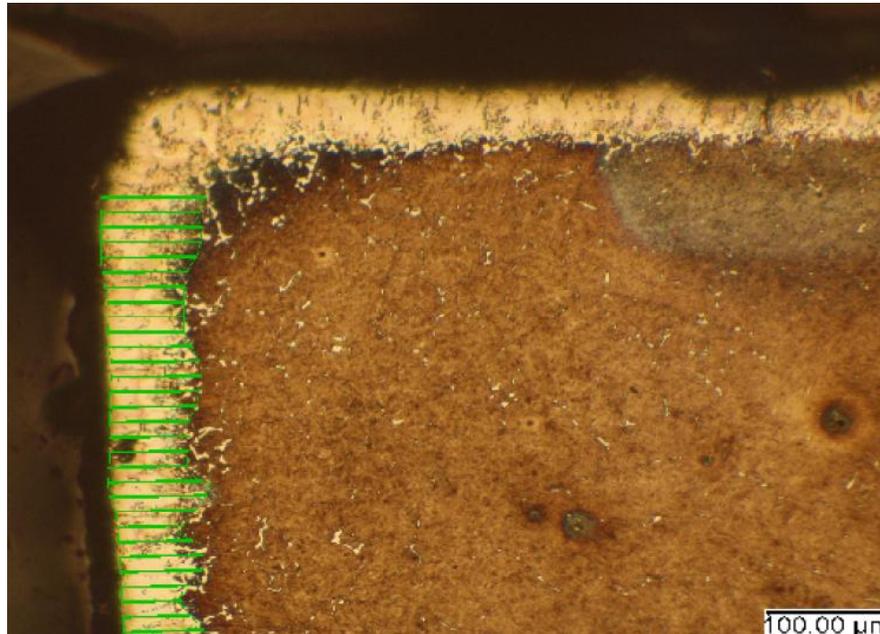


Figura 4.40 Metalografía arista transversal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x

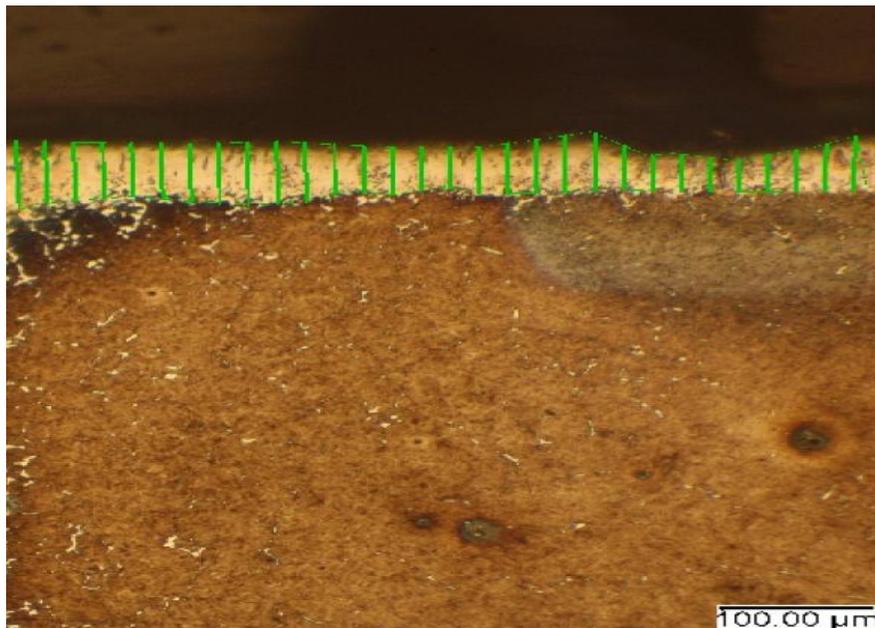


Figura 4.41 Metalografía arista longitudinal material AISI AO1 (K460), 5 horas de boronizado (920°C) con tratamiento térmico de temple y revenido 100x

Tabla 4.33 Tabla de medición de espesores AISI D3 (K100) con cinco horas de boronizado (920°C) y tratamiento térmico de temple y revenido

MEDICIÓN	espesor capa boronizada transversal(um)	espesor capa boronizada longitudinal(um)
1	70,87	62,49
2	70,04	57,71
3	69,5	58,82
4	68,67	62,46
5	67,26	55,47
PROMEDIO	69,268	59,39
DESV. ESTÁNDAR	1,4	3,1

Es importante comparar los resultados obtenidos con éstas metalografías y las metalografías de 5 horas de boronizado del material AISI AO1 sin temple y revenido (Sección 4.3.6.3). La capa del proceso se reduce considerablemente debido a los tratamientos térmicos aplicados. Otra vez al igual que en el anterior material se prevé que durante la realización de los tratamientos térmicos la capa de boro se difundió hacia el medio circundante, a pesar de haberlos realizado con un gas protector para conservar la penetración de la capa de boro.

4.4 Tintas penetrantes

Luego de realizar el ensayo de tintas penetrantes de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.2.6.2 a los siguientes materiales: (Figura 4.42):

- 1: AISI AO1 (K460) con 5 horas de boronizado
- 2: AISI AO1 (K460) con 5 horas de boronizado y temple (UMCO)
- 3: AISI D3 (K100) con 5 horas de boronizado/ temple y revenido
- 4: AISI AO1 (K460) con 5 horas de boronizado / temple y revenido
- 5: AISI D3 (K100) temple y revenido
- 6: AISI AO1 (K460) temple y revenido

Se puede observar en la figura 4.42 que los materiales no presentan ninguna muestra de fisura o agrietamiento en ninguna de las superficies, ya que al aplicar el develador las superficies no muestran ningún indicio de problemas ocasionados por la variación de temperatura durante los procesos de calentamiento y enfriamiento.



Figura 4.42 Resultado de ensayo de tintas penetrantes

4.5 Discusión

4.5.1 Discusión mediciones microdureza

- De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar en la figura 4.1 y 4.2 que la mayor dureza medida corresponde al material AISI 316L (A200) con aproximadamente 1700[KHN] (88[HRC]), a pesar de no presentar la morfología característica de dientes de sierra, esta capa se presume es más dura que la de los otros materiales por la composición de los elementos aleantes del material. Se recomienda utilizar microscopia electrónica de barrido para determinar la composición química de la capa y de esta manera conocer el origen del aumento de dureza.
- En la figura 4.1 y 4.2 se puede observar además una similitud entre las medidas de dureza consultadas en literatura y las medidas de dureza realizadas para el suministro en los varios tipos de acero.
- Así mismo en las figuras 4.1 y 4.2 se observa uniformidad en las mediciones al aplicar el proceso de boronizado con desviaciones aceptables como se puede constatar. Sin embargo, se puede discutir que la desviación mostrada para Ni-Resist no es muy aceptable, lo que se atribuye a un mal montaje del material debido a que el suministro fue cortado de una pieza de bomba que no tenía las superficies planas y paralelas como se describe en el procedimiento de preparación de probetas para medición por lo que dificultó las mediciones.
- Se puede constatar un aumento de dureza en todos los materiales tratados con boronizado de acuerdo a los resultados presentados entre 6 y 7 veces la dureza original. Para AISI 1018 (E920) se obtiene un incremento en la dureza aproximado de seis veces en comparación con el suministro, para AISI 316L(A200) se obtiene un incremento en la dureza de siete veces en comparación con el material de suministro, para AISI 4140 (V320) se observa un incremento en la dureza de cinco veces en comparación con el suministro, para AISI D3 se observa un incremento en la dureza de siete veces en comparación con el

- suministro, para AISI AO1(K460) se encontró un incremento de seis veces en comparación con el suministro y finalmente para N-Resist se obtiene el menor de los incrementos en la dureza, de tres veces en comparación con el suministro.
- En la figura 4.3 y 4.4 se presentan los resultados de microdureza para distintos tratamientos de los aceros AISI D3 (K100) y AISI AO1 (K460), se puede observar como en ambos casos el material en suministro incrementa la dureza en la superficie luego de aplicar el proceso de boronizado, sin embargo el substrato del mismo material no aumenta su dureza considerablemente y se atribuye dicho aumento a la variación de temperatura realizada durante el proceso de boronizado. Así mismo se puede observar como la dureza superficial disminuye al aplicar tratamiento térmico de temple y revenido luego del boronizado, se presume esta disminución se debe a que durante la realización de los tratamientos la capa difundida de boro se reduce en el material (acortamiento de la superficie boronizada) y por lo tanto la medición de dureza sensa el substrato y no la capa boronizada.
 - Es importante evidenciar que tanto para AISI D3 (K100) y AISI AO1 (K460) se obtiene mayor medida de dureza en la superficie con el proceso de boronizado en comparación con la dureza que se obtiene al aplicar un tratamiento térmico común (temple y revenido).
 - Las mediciones de dureza pueden ser inferidas por el aparato de medida y la preparación de las probetas para la medición. En este punto es importante anotar que dado que el compuesto para el desarrollo de boronizado es oscuro, no se podía observar claramente la huella impregnada por el indentador en el material por lo que se debía pulir la superficie y en este punto se desconoce la afectación que sufría la superficie boronizada para una correcta medición.

4.5.2 Discusión metalografías

- Las metalografías deben evidenciar el aumento de penetración de la capa boronizada en el material base para una temperatura dada conforme aumenta el tiempo de exposición; tal como describe la ley de difusión de Fick. Sin embargo para los aceros de herramienta en que esta tesis centro su estudio (AISI D3 (K100) y AISI AO1 (K460)) se puede comentar que los resultados obtenidos no son lo suficientemente significativos como para verificar los resultados aplicando la ley de Fick al proceso, tal como se muestra en la figura 4.43 y la figura 4.44.
- La figura 4.43 muestra que es evidente el incremento de espesor en la capa boronizada en la sección transversal y longitudinal para AISI D3 (K100) conforme aumenta el tiempo de exposición.
- La figura 4.44 muestra que para AISI AO1 (K460) existe un incremento en el espesor comparando tres y cuatro horas de exposición, tanto en la parte transversal como en la longitudinal. Sin embargo el resultado de cinco horas no muestra el incremento debido a que esta probeta al ser pulida, la capa boronizada se redujo en el material (acortamiento de la superficie boronizada).

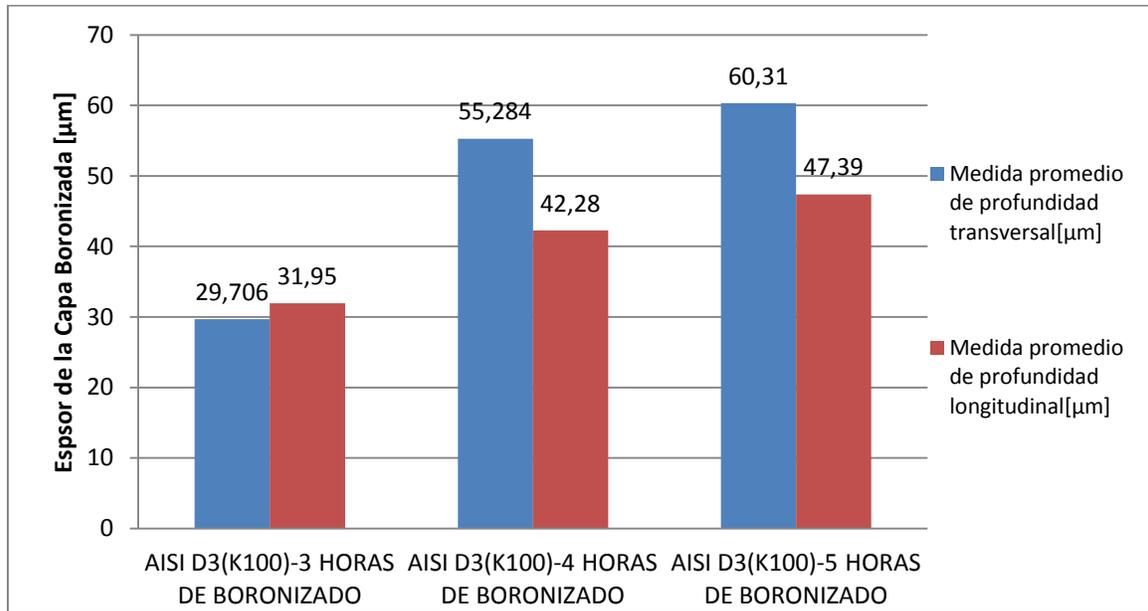


Figura 4.43 Espesores medidos de la capa boronizada para acero AISI D3 (K100) a diferentes tiempos de exposición

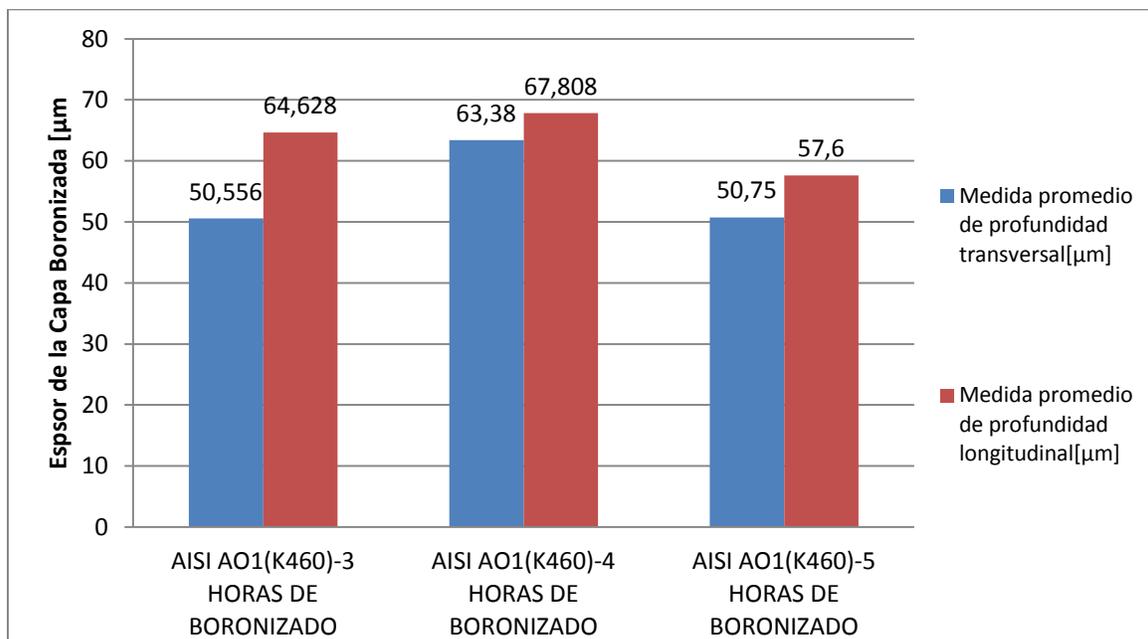


Figura 4.44 Espesores medidos de la capa boronizada para acero AISI AO1 (K460) a diferentes tiempos de exposición

5 Aplicación Industrial del Proceso de Boronizado: Empresa UMCO

Umco del Ecuador empresa dedicada a la manufactura de utensilios de cocina con aluminio se vio interesada en la aplicación del proceso de boronizado a un pin de acero AISI AO1 (K460) utilizado en la manufactura de tapas de ollas de presión (Figura5.1).



Figura 5.1 Pin para ollas presión UMCO

Los planos proporcionados por la empresa Umco del pin se detallan en el ANEXO F

5.1 Descripción de la máquina y función del pin

La máquina de Umco donde se utiliza el pin de prueba es una troqueladora que aplica una fuerza vertical de aproximadamente 60 Toneladas hacia el pin. Este pin empuja una leva, que a su vez mueve cuatro seguidores alrededor de la olla para formar las cejas propias de la tapa de ollas de presión. Esta máquina realiza este trabajo durante varios ciclos. (Figura 5.2).



Figura 5.2 Máquina troqueladora Umco para ollas de presión

5.1.1 Historial de pines en la empresa durante operación

La empresa informa que cuando un pin se encuentra en perfecto estado puede trabajar hasta por 5000 ciclos seguidos. Si el número de ciclos se reduce considerablemente (aproximadamente 300) el pin posiblemente presentaba defectos de baja resistencia.

5.2 Problemas presentados en el pin

Los principales problemas que presenta la empresa durante la operación con el pin es el rompimiento del pin en su curvatura. Este problema se presenta para curvaturas menores a 1,5 mm. La empresa prevé que esto se debe a que la manufactura de los pines no se los hace con toda la pericia del caso.

Por otro lado durante la operación se presenta un acortamiento de la altura del pin. Con respecto a este problema la empresa informa que la altura del pin es crítica en la operación pues si se reduce en 1 mm no se puede seguir trabajando con normalidad con el pin en la máquina, pues el pin ya no entra en la tapa de la olla de presión.

5.3 Aplicación de boronizado a pines

La empresa propone aplicar el proceso de boronizado a dos pines de acero AISI A01 (K460) en estado de suministro para ver el desempeño en operación de los mismos luego de haber realizado el tratamiento. Se realiza el tratamiento termoquímico de boronizado a los pines de dicha empresa con una duración de 5 horas a una temperatura de 920°C.



Figura 5.3 Pines Umco aplicado proceso de boronizado durante 5 horas a 920°C

Los pines entregados a la empresa luego de aplicar el proceso de boronización, presentan un promedio de dureza de 27[HRC]. Es importante anotar que ésta medición no muestra la dureza del recubrimiento con boro, puesto que se realizó con un durómetro en escala Rockwell C que no mide la dureza superficial propia del proceso de boronizado por utilizar carga de 150[kg]

Posteriormente la empresa sugiere realizar los tratamientos térmicos de temple y revenido post boronización en las instalaciones de la empresa según los siguientes parámetros:

- Se realiza proceso de temple y revenido para un pin, y para el otro solamente temple; esto se lo realiza con el fin de diferenciar los efectos en los pines al aplicar un tratamiento y el otro.
- El proceso de temple se lo realiza a 800° C con una permanencia en horno de 45 minutos.
- El proceso de revenido se lo realiza a 220° C con una permanencia en horno de 45 minutos.
- Para el proceso de temple se introduce los pines en una caja de acero con carbón con el fin de mantener la temperatura de los pines uniforme alrededor de las secciones de los pines.
- El enfriamiento de temple se lo realiza con aceite hidráulico.

La figura 5.4 muestra el procedimiento para los tratamientos térmicos aplicados en los pines de UMCO.

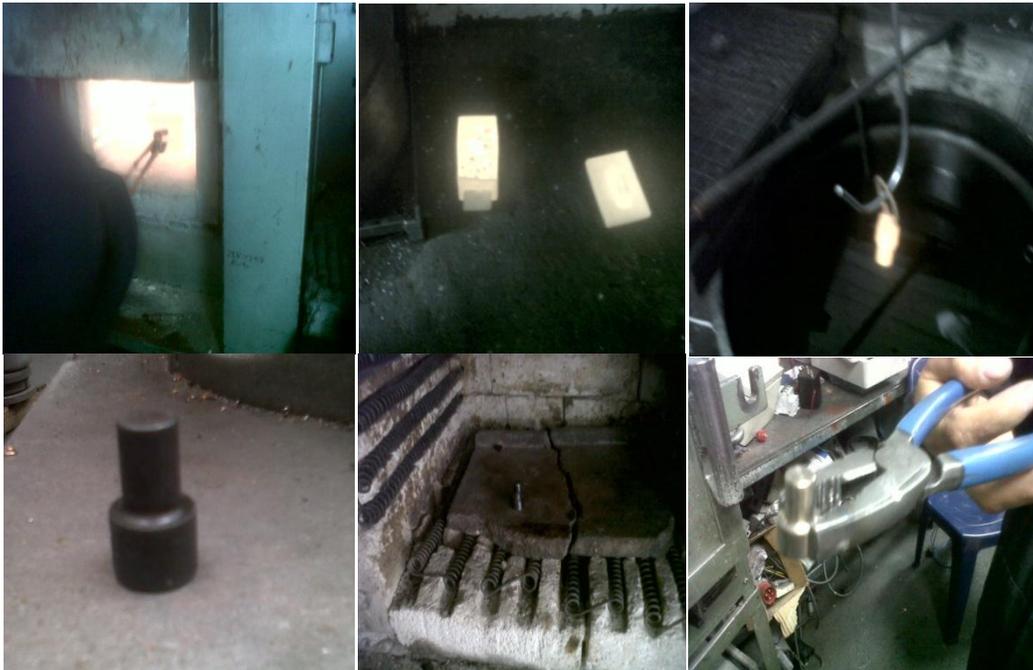


Figura 5.4 Tratamientos térmicos para pines realizados en Umco

La dureza obtenida para el tratamiento de temple es de 63 [HRC] y luego de aplicar el revenido esta dureza disminuye a 59[HRC]. En este punto la empresa informa que la dureza mínima de trabajo para pines de buen desempeño es de 60[HRC] luego del revenido, por lo cual es aceptable el resultado obtenido luego de realizar los tratamientos térmicos a los pines.

5.4 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para el desarrollo industrial muestran que ambos pines se rompieron durante operación. En esta sección se recogen imágenes de cada uno de los pines, así como un historial de trabajo para los pines tratados.

5.4.1 Pin de AISI AO1 – 5 horas boronizado y temple

Este pin durante la operación trabajo aproximadamente 6 ciclos y sufre el inicio de la fractura en la curvatura. Es posible observar que al ser un material muy frágil se rompe en toda la sección de la curvatura, formando un plano de ruptura, por lo cual se prevé que al ser el material muy duro experimenta fragilidad por tener baja tenacidad.



Figura 5.5 Pin roto de AISI AO1- 5 horas de boronizado y temple

5.4.2 Pin de AISI AO1 – 5 horas boronizado, templado y revenido

Este pin durante la operación trabajo aproximadamente 21 ciclos y sufre su fractura en la curvatura. Es posible observar que la falla se debe al trabajo que ejerce el troquel sobre el pin. Puesto que se logra observar una grieta que se prevé inició la fractura.



Figura 5.6 Pin roto de AISI AO1- 5 horas de boronizado, temple y revenido

5.5 Posibles problemas y causas del rompimiento de los pines

Luego de estudiar el comportamiento suscitado con los pines se puede comentar que la falla en los pines se debió a diferentes factores que a lo largo del desarrollo de la aplicación del proceso de boronizado se iban suscitando.

- **Difusión de la capa boronizada hacia el medio durante la realización de tratamientos térmicos en Umco**

Como se puede observar en los resultados de las metalografías la capa boronizada (secciones 4.4.5.5 y 4.4.6.4) experimenta una reducción de tamaño al realizar tratamientos térmicos post boronización aun cuando se las realice con un gas protector.

En el caso de éstos pines nunca fueron protegidos por ningún gas protector durante la realización de los tratamientos por lo que se prevé una difusión hacia el medio circundante de la capa de boro.

- **Temple realizado con carbón**

Para el tratamiento de temple se utiliza una caja con carbón con el fin de mantener la temperatura uniforme a lo largo de las secciones de los pines. Sin embargo, como se puede observar en la sección 2.3.3.4 el boro no se disuelve con facilidad en carbón; y principalmente al haber una concentración mayoritaria de carbón en el medio circundante en comparación con la capa de boro formada en el material; se prevé ocurrió una difusión de boro hacia el carbón en el medio circundante.

- **Dureza directamente proporcional a fragilidad**

Aquellos materiales que presentan una alta medida de resistencia a la tracción y de límite elástico no experimentan tanta tenacidad en comparación con los materiales dúctiles que a pesar de tener un valor menor de resistencia a la tracción, que a su vez se ve reflejado en un menor valor de dureza, los cuales presentan alta tenacidad (Figura 5.7).

Esta explicación es necesaria ya que para la aplicación industrial del proceso de boronizado se tiene un troquel que aplica carga cíclica hacia el punzón, de manera que es necesario tener un material que además de presentar una alta medida de dureza presente una alta tenacidad.

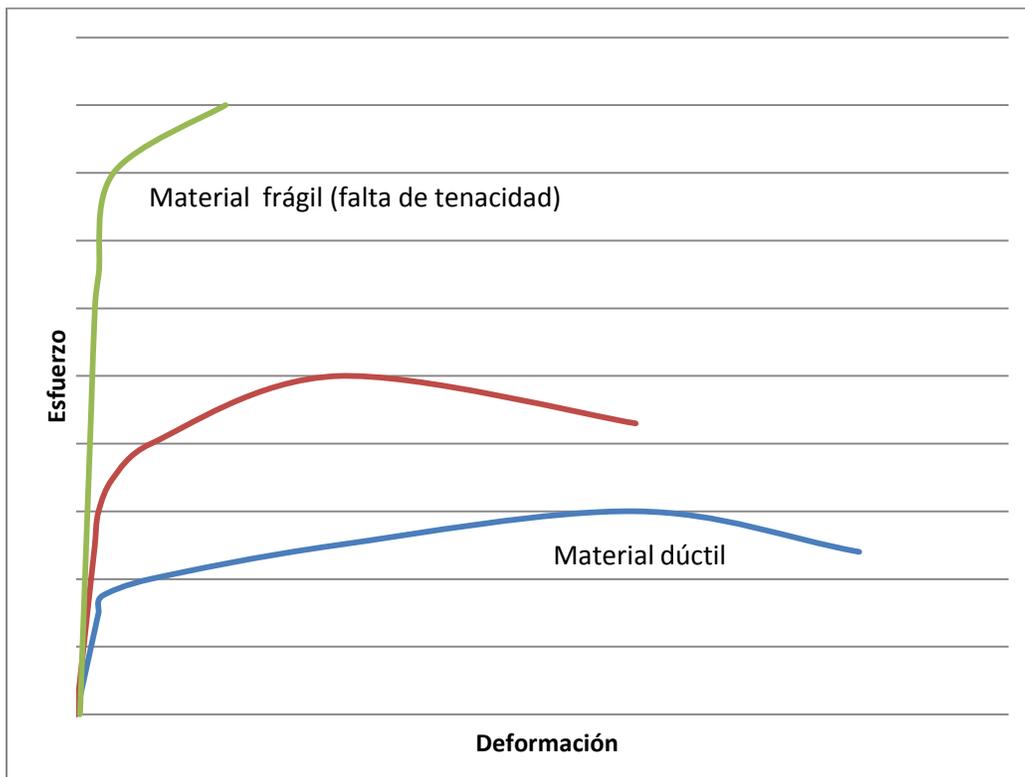


Figura 5.7 Diagrama Esfuerzo- Deformación para materiales frágiles y dúctiles

6 Análisis del costo del servicio de boronizado

Luego de obtener los resultados del desarrollo del proceso de boronizado para endurecimiento superficial, se pretende hacer un análisis de costo para proponer el servicio de boronizado como una alternativa en el mercado de tratamientos termoquímicos de partes y piezas para la industria ecuatoriana.

Así pues en primera instancia se realiza una breve introducción al tema de costos, con las definiciones más comunes y utilizadas para este estudio. Luego, se incluye un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) para el servicio de boronizado como tratamiento termoquímico con la finalidad de conocer el segmento de mercado donde se va a desarrollar el servicio y los posibles beneficiarios y competidores presentes en el mercado ecuatoriano. Luego se incluye el costo total del presente proyecto para finalmente realizar un análisis para proponer el costo del servicio de boronizado.

6.1 Generalidades de costo de un servicio

A cada proyecto por lo general se le asigna una inversión inicial no recurrente, los gastos recurrentes de operación y los ingresos posibles, así como un valor futuro de recuperación. Este proceso de comparación utiliza una variedad de términos y conceptos de costos, por lo que en primera instancia se definirá estos términos para posteriormente estudiar las medidas de efectividad y compararlos con proyectos similares (37).

6.1.1 Costos del ciclo de vida

Los costos de ciclo de vida de cualquier producto, servicio o proyecto son considerados como la suma de los gastos que se incurre en ella desde el inicio hasta el final. En este tipo de costos se incluyen los costos de diseño y desarrollo de ingeniería, costos de fabricación y pruebas, costos de operación y mantenimiento; y costos de recuperación (37).

6.1.1.1 Costo de diseño e ingeniería

Los costos de diseño e Ingeniería tienen que ver con los costos que se asume al inicio del desarrollo de un proyecto. Dentro de este tipo de costos se encuentran los costos

referentes a desarrollo del producto/servicio, como costos por recolección de información y costos empleados para el diseño del proyecto. Estos costos no son recurrentes y se presentan a inicio de todo proyecto.

6.1.1.2 Costos de fabricación y pruebas

Los costos de fabricación y pruebas son los costos que se asumen para llevar a cabo el desarrollo del producto/servicio. Dentro de esta clasificación se consideran los costos de materiales e insumos en los que se incurren para la fabricación y el período de pruebas del producto/servicio.

6.1.1.3 Costos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento son aquellos costos en los que se incurren para el desarrollo y ejecución del proyecto, así como los costos para prevenir posibles problemas que puedan ocurrir durante su ejecución. Dentro de éstos costos se consideran los costos por gasto energético, los costos de materiales utilizados y la mano de obra en la que se incurre para el correcto desarrollo y ejecución del proyecto.

6.1.1.4 Costo de recuperación

El costo de recuperación en un proyecto se refiere al costo por unidad de producción que se añade al producto o servicio de la totalidad de los gastos anteriores. Este costo se lo calcula con la finalidad de recuperar la inversión del producto o servicio en un periodo de tiempo. Generalmente para este costo se considera un porcentaje menor al 1% de la suma de los costos de diseño y desarrollo de ingeniería, costos de fabricación y pruebas; y los costos de operación y mantenimiento.

6.2 Análisis FODA para el servicio de boronizado

Con la finalidad de conocer el segmento de mercado donde el proceso de boronizado se desarrolla un análisis FODA del servicio, en el cual se detallan aspectos importantes del servicio para poder introducirlo en el mercado. Así pues se analizan los puntos a favor y en contra de este servicio en comparación con otros similares.

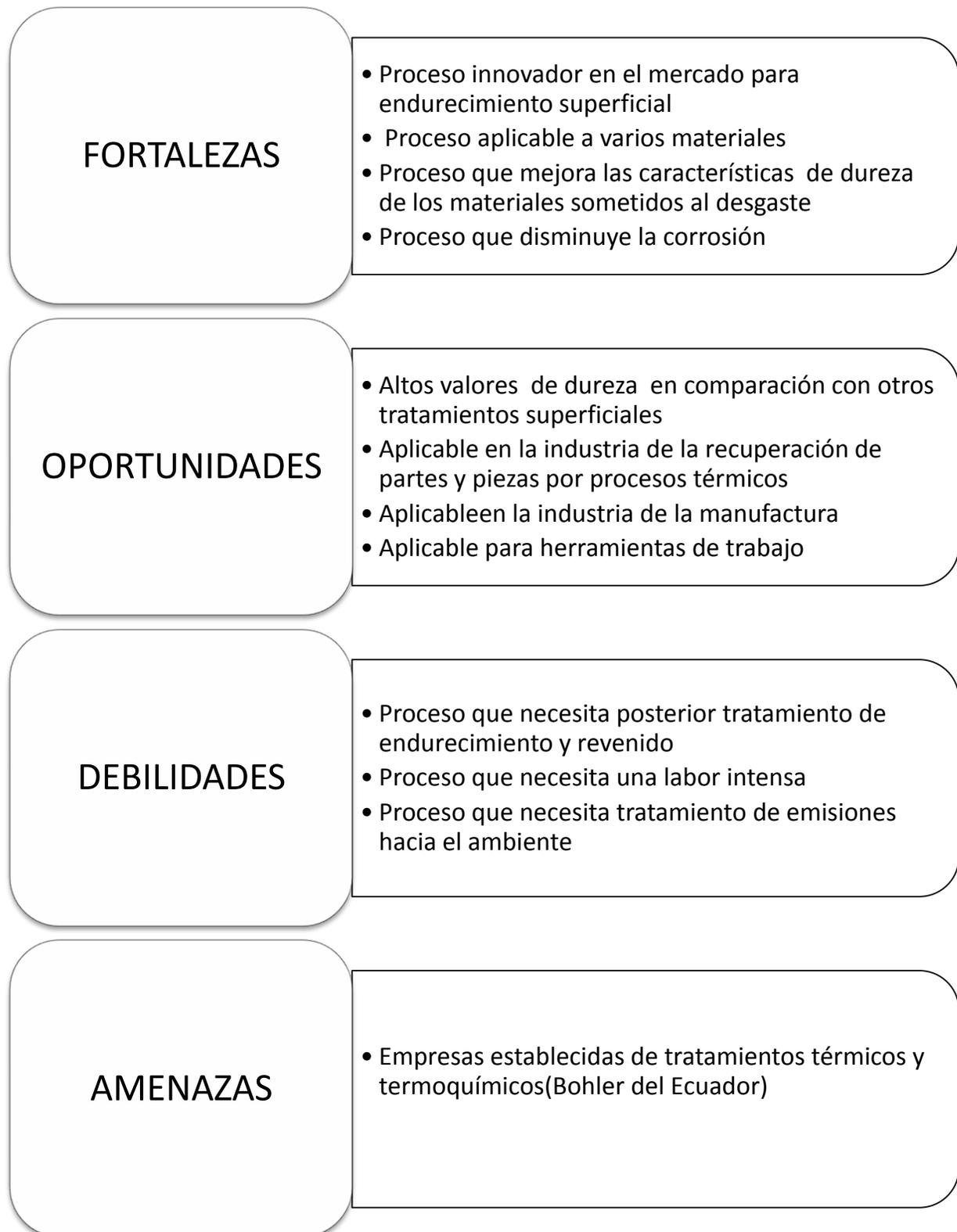


Figura 6.1 Diagrama FODA para el servicio de boronizado

6.3 Costo total del desarrollo del proyecto de boronizado

Para establecer un costo de servicio del proceso termoquímico de boronizado de acuerdo a la literatura descrita anteriormente, se considera en primera instancia el costo individual de cada rubro del presente proyecto.

Los costos por investigación, diseño e ingeniería del proyecto están basados en valores utilizados para transporte y gastos durante la visita a plantas y recolección de información para el desarrollo del proyecto.

Los costos de desarrollo del proceso y pruebas experimentales están basados en costos de los productos en la industria ecuatoriana; así pues se describen detalladamente todos y cada unos de los valores invertidos para el desarrollo del estudio.

Los costos de operación y mantenimiento al ser una parte substancial para el cálculo del servicio de boronizado se explican con mayor detenimiento.

- **Mano de obra**

Para el costo de la mano de obra se considera el salario básico en Ecuador para un trabajador durante tres meses (lapso del desarrollo y pruebas del proyecto). Según el Acuerdo Ministerial No.0369 este valor es fijado en \$292 (38).

$$\text{Costo de mano obra para proyecto} = \frac{\$292}{1 \text{ mes}} * 3 \text{ meses} = \$876$$

Materiales para el desarrollo del proceso

- **Ekabor®2**

Ekabor®2 está disponible en el mercado en una presentación de 15 [kg] con un valor de \$350. Para calcular el valor total utilizado durante el desarrollo del proceso de boronizado se consideran 2 [kg] y además que el producto puede volver a reutilizable hasta 5 veces, tal como se describe en la sección 2.3.4.1 de este documento.

$$\text{Costo kilogramo Ekabor®2} = \frac{\$350}{15 \text{ kg}} = \$23,33$$

$$\text{Costo Ekabor®2 utilizado en proyecto} = \frac{\$23,33}{\text{kg}} * 2 \text{ kg} = \$46,66$$

$$\text{Costo Ekabor®2 utilizado en proyecto} = \frac{\$46,66}{5 \text{ veces reutilización}} = \$9,33$$

- **Óxido de Aluminio (Al₂O₃)**

El óxido de Aluminio está disponible en el mercado en una presentación de 50[lb] (110 [kg]) con un valor de \$80. Para calcular el valor total utilizado durante el desarrollo del proceso de boronizado se consideran 1 [kg], así el costo del óxido de Aluminio para el desarrollo de proceso de boronizado es el siguiente:

$$\text{Costo kilogramo óxido de Alumnio} = \frac{\$80}{110 \text{ kg}} = \$0,72$$

$$\text{Costo óxido de Alumnio utilizado en proyecto} = \$0,72$$

Gasto de energía para el desarrollo del proceso

- **Energía Eléctrica**

Para el análisis del costo total utilizado en cuanto a energía eléctrica durante el desarrollo y pruebas experimentales del presente proyecto se considera un costo de \$0,08 (8 centavos) por kilovatio-hora y aproximadamente 30 horas de operación durante todo el desarrollo del proceso de boronizado. La potencia del horno utilizado para el desarrollo del proceso es de 1,8[kW]. Así el valor total por energía eléctrica utilizado es el siguiente:

$$\text{Costo Energía Eléctrica} = \frac{\$0,08}{\text{kW} - \text{hora}} * 1,8[\text{kW}] * 30[\text{horas}] = \$4,32$$

Los costos descritos anteriormente, se resumen en la tabla 6.1

Tabla 6.1 Costos para el desarrollo del proyecto de boronizado

COSTOS POR INVESTIGACION, DISEÑO E IGENIERIA DEL PROYECTO	
Visita a plantas , entrevistas y recolección de información	\$ 60,00
	\$ 60,00
COSTOS DE DESARROLLO DEL PROCESOY PRUEBAS EXPERIMENTALES	
Materiales Retorta	
Tubo inoxidable 304 SCH40 4" X200mm	\$ 26,96
Acero Inoxidable304 4 1/2" X10 mm	\$ 24,96
Acero Inoxidable304L 4 1/2" X10 mm	\$ 16,42
Tubo PUL INOX 304 1/2 " X 1,5MM X1,5 mts	\$ 5,76
Manufactura de la Retorta	\$ 80,00
	\$ 154,10
Materiales Substrato	
Eje acero E920 22,4mm x 200mm	\$ 3,18
Eje acero A200 22,4mm x 200mm	\$ 13,56
Eje acero V320 22,4mm x 200mm	\$ 9,96
Eje acero K100 22,4mm x 200mm	\$ 7,04
Eje acero K460 22,4mm x 200mm	\$ 6,87
	\$ 40,61
Conexiones y accesorios tanque de Argón	
Bombona Gas Argón Industrial AGA 10m3	\$ 1.400,00
Consumo Gas Argón	\$ 63,00
Regulador Argón IOXYGEN VM-25FL	\$ 91,13
Acoples Gas Argón 1/2"	\$ 11,16
Tuerca P/manguera 1/4"	\$ 2,12
Niples para manguera 1/4"	\$ 4,62
Abrazaderas	\$ 0,80
Manguera para gas industrial 300psi 5/16"	\$ 8,76
	\$ 1.581,59

Preparación muestras	
Resina poliéster	\$ 15,48
Octoato de cobalto	\$ 6,34
Metil etil cetona	\$ 3,23
Lijas de agua	\$ 35,00
Insumos Varios	\$ 30,00
	<u>\$ 90,05</u>
Pruebas metalográficas	
Metalografías	\$ 350,00
	<u>\$ 350,00</u>
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	
Mano de obra	\$ 876,00
	<u>\$ 876,00</u>
Materiales para el desarrollo del proceso	
EKABOR®2	\$ 9,33
Óxido de aluminio [Al ₂ O ₃]	\$ 0,72
Consumo de gas Argón	\$ 31,20
	<u>\$ 41,25</u>
Gasto Energía para el desarrollo del proceso	
Energía Eléctrica	\$ 4,32
	<u>\$ 4,32</u>
COSTO TOTAL DE DESARROLLO DEL PROYECTO	
	\$ 3.197,92

Así el costo total del desarrollo del proyecto (**\$ 3.197,92**) es de suma importancia para el cálculo de un costo de recuperación de la inversión realizada para este proyecto al calcular el costo del servicio por kilogramo para la venta al público que se detalla en la sección 6.4 de este mismo documento.

6.4 Costo por kilogramo de material base para el proceso termoquímico de boronizado

Para fijar un costo en el mercado ecuatoriano del proceso de boronizado por kilogramo de material base se pretende ofertar el servicio al público con una duración de tres, cuatro y cinco horas de duración del proceso; obteniendo los resultados de dureza y profundidad de capa boronizada para los distintos materiales descritos en los resultados de este mismo documento (Capítulo 4)

Así para fijar un costo de la prestación del servicio por kilogramo se consideran los costos de mano de obra, los materiales e insumos utilizados para brindar el servicio: Ekabor®2, óxido de Aluminio, consumo de gas argón, la energía eléctrica utilizada y el costo de recuperación que es un porcentaje del costo total del desarrollo del proyecto descrito en la sección 6.3.

Es importante tomar en cuenta que tanto el costo de Ekabor®2 y el costo del óxido de aluminio (Al_2O_3) son costos variables pues dependen directamente de la cantidad de material base a tratar pero no de la duración del proceso. En tanto que los costos de mano de obra, consumo de gas y energía eléctrica son considerados como fijos para la cantidad de material base pero variables en el análisis de duración del proceso. El costo de recuperación para cualquiera que sea la duración del proceso y la cantidad del material base está especificado como un 0,1% del costo total del desarrollo del proyecto y se lo considera como fijo.

Para el análisis que se va a realizar de costo total de prestación de servicio de acuerdo a la cantidad de material base, se tomará en cuenta la suma de los costos fijos con los costos variables que dependen de la cantidad de material base a tratar.

$$\text{Costo total del servicio} = \sum \text{Costos fijos} + (\text{cantidad de material base [kg]} \times \sum \text{Costos variables})$$

Ecuación 6.1

6.4.1 Costos fijos

6.4.1.1 Costo de mano de obra

Para el costo de la mano de obra de la prestación del servicio, se considera el sueldo básico en Ecuador para un trabajador por las horas que dure el proceso de boronizado. Así se tiene los siguientes costos por horas de duración del proceso:

$$\text{Costo de mano obra por hora} = \frac{\$292}{1 \text{ mes trabajo}} * \frac{1 \text{ mes trabajo}}{160 \text{ horas trabajo}}$$

$$\text{Costo de mano obra por hora} = \$1,83$$

$$\text{Costo de mano obra por 5 horas boronizado} = \$1,825 * 5 = \$9, 15$$

$$\text{Costo de mano obra por 4 horas boronizado} = \$1,825 * 4 = \$7, 32$$

$$\text{Costo de mano obra por 3 horas boronizado} = \$1,825 * 3 = \$5, 49$$

6.4.1.2 Costo del consumo de gas Argón

Para el costo del consumo de gas Argón se considera el costo de la recarga por 10 m³ (10000 litros) que tiene un valor de \$260. El consumo para todos los casos del proceso es de 1L/min. Así los costos de consumo de argón por hora de duración del proceso son los siguientes:

$$\text{Costo de consumo de argón por hora} = \frac{\$260}{10000 \text{ litros}} * \frac{60 \text{ litros}}{\text{hora}} = \$1,56$$

$$\text{Costo de consumo de argón por 5 horas boronizado} = \$1,56 * 5 = \$7, 80$$

$$\text{Costo de consumo de argón por 4 horas boronizado} = \$1,56 * 4 = \$6, 24$$

$$\text{Costo de consumo de argón por 3 horas boronizado} = \$1,56 * 3 = \$4, 68$$

6.4.1.3 Costo del consumo de energía eléctrica

Para el análisis del costo de consumo de energía eléctrica se considera un costo de \$0,08 (8 centavos) por kilovatio-hora. La potencia del horno de 1,8[kW]. Así el valor total por energía eléctrica por hora de duración del proceso son los siguientes:

$$\text{Costo Energía Eléctrica por hora} = \frac{\$0,08}{\text{kW} - \text{hora}} * 1,8[\text{kW}] = \$0,144$$

$$\text{Costo consumo de energía eléctrica 5 horas boronizado} = \$0,144 * 5 = \$0,72$$

$$\text{Costo consumo de energía eléctrica 4 horas boronizado} = \$0,144 * 4 = \$0,58$$

$$\text{Costo consumo de energía eléctrica 3 horas boronizado} = \$0,144 * 5 = \$0,44$$

6.4.1.4 Costo de recuperación

Como ya se menciona anteriormente este costo se lo considera fijo y corresponde al 0,1% del total del costo para el desarrollo del proyecto. Además este costo no varía de acuerdo a la cantidad de horas del proceso de boronizado y tampoco a la cantidad de material base a tratar.

El porcentaje de 0,1% es tomado con la finalidad que en 1000 servicios contratados se recupere la inversión inicial con la que se desarrollo el proyecto. Así pues este valor es el siguiente:

$$\text{Costo recuperación} = \$ 3.197,92 * 0,1\% = \$3,20$$

6.4.2 Costos Variables

6.4.2.1 Costo Ekabor®2

El costo de Ekabor ®2 es un costo variable, que depende directamente de la cantidad por kilogramo de material base a tratar. Para esto se considera una mezcla en peso de 1:2 respectivamente. Es decir para cada kilogramo de material base se utiliza 0,5 kilogramos de Ekabor ®2. Hay que tomar en cuenta que el producto es reutilizable 5 veces (sección 2.3.4.1)

Así pues para el análisis del costo por kilogramo este costo variable de Ekabor®2 es el siguiente:

$$\text{Costo kilogramo Ekabor®2} = \frac{\$350}{15 \text{ kg}} = \$23,33$$

$$\text{Costo Ekabor®2 por kilogramo de material base} = \frac{\$23,33}{2} = \$11,66$$

$$\text{Costo Ekabor®2 por kilogramo de material base} = \frac{\$11,66}{5 \text{ veces reutilizado}}$$

$$\text{Costo Ekabor®2 por kilogramo de material base} = \$2,33$$

6.4.2.2 Costo óxido de Aluminio

El costo del óxido de Aluminio también es un costo variable que depende de la cantidad por kilogramo de material base a tratar. Para esto se considera una mezcla en peso de 1:4 respectivamente. Es decir para cada kilogramo de material base se utiliza 0,25 kilogramos de óxido de Aluminio. Así pues para el análisis del costo por kilogramo este costo variable de óxido de Aluminio es el siguiente:

$$\text{Costo kilogramo óxido de aluminio} = \frac{\$80}{110 \text{ kg}} = \$0,72$$

$$\text{Costo óxido de aluminio por kilogramo material base} = \frac{\$0,72}{4} = \$0,18$$

6.4.3 Ecuaciones de cálculo de costo de servicio de boronizado de acuerdo a la cantidad de material base

6.4.3.1 Ecuación del costo de servicio para proceso con cinco horas de boronizado

Para el cálculo del costo del servicio de boronizado con 5 horas se consideran los costos fijos y variables a fin de mostrar una ecuación que ayude al cálculo del valor a cobrar por la prestación del servicio.

Tabla 6.2 Costos fijos y variables para servicio de cinco horas de boronizado

Costos fijos	
Costo mano de obra	\$ 9,15
Consumo de gas argón	\$ 7,80
Consumo energía eléctrica	\$ 0,72
Costo de recuperación	\$ 3,20
	\$20,87
Costos variables	
Costo Ekabor® 2	\$ 2,33
Costo óxido de Aluminio	\$ 0,18
	\$ 2,51
TOTAL COSTOS FIJOS	\$ 20,87
TOTAL COSTOS VARIABLES	\$ 2,51

Por lo tanto la ecuación de cálculo (de acuerdo a la ecuación 6.1) para conocer el valor del costo total del servicio para cinco horas de boronizado de acuerdo a la cantidad de material base expresada en kilogramos, es la siguiente:

$$\text{Costo total del servicio 5 horas} = \$20,87 + (\$2,51 \times \text{cantidad de material base [kg]})$$

Ecuación 6.2

6.4.3.2 Ecuación del costo de servicio para proceso con cuatro horas de boronizado

Para el cálculo del costo del servicio de boronizado con 4 horas se consideran los costos fijos y variables a fin de mostrar una ecuación que ayude al cálculo del valor a cobrar por la prestación del servicio.

Tabla 6.3 Costos fijos y variables para servicio de cuatro horas de boronizado

Costos fijos	
Costo mano de obra	\$7,32
Consumo de gas argón	\$6,24
Consumo energía eléctrica	\$0,58
Costo de recuperación	\$3,20
	\$17,34
Costos variables	
Costo Ekabor® 2	\$2,33
Costo óxido de Aluminio	\$0,18
	\$ 2,51
TOTAL COSTOS FIJOS	
	\$ 17,34
TOTAL COSTOS VARIABLES	
	\$ 2,51

Por lo tanto la ecuación de cálculo (de acuerdo a la ecuación 6.1) para conocer el valor del costo total del servicio para cuatro horas de boronizado de acuerdo a la cantidad de material base expresada en kilogramos, es la siguiente:

$$\text{Costo total del servicio 4 horas} = \$17,34 + (\$2,51 \times \text{cantidad de material base [kg]})$$

Ecuación 6.3

6.4.3.3 Ecuación del costo de servicio para proceso con tres horas de boronizado

Para el cálculo del costo del servicio de boronizado con 3 horas se consideran los costos fijos y variables a fin de mostrar una ecuación que ayude al cálculo del valor a cobrar por la prestación del servicio.

Tabla 6.4 Costos fijos y variables para servicio de tres horas de boronizado

Costos fijos	
Costo mano de obra	\$ 5,49
Consumo de gas argón	\$ 4,68
Consumo energía eléctrica	\$ 0,44
Costo de recuperación	\$ 3,20
	\$ 13,81
Costos variables	
Costo Ekabor 2	\$ 2,33
Costo óxido de Aluminio	\$ 0,18
	\$ 2,51

TOTAL COSTOS FIJOS	\$ 13,81
---------------------------	-----------------

TOTAL COSTOS VARIABLES	\$ 2,51
-------------------------------	----------------

Por lo tanto la ecuación de cálculo (de acuerdo a la ecuación 6.1) para conocer el valor del costo total del servicio para tres horas de boronizado de acuerdo a la cantidad de material base expresada en kilogramos, es la siguiente:

$$\text{Costo total del servicio 3 horas} = \$13,81 + (\$2,51 \times \text{cantidad de material base [kg]})$$

Ecuación 6.4

El precio de los procesos de cementado y nitrurado están en el rango de 5 USD por kilogramo de la empresa Bohler. De lo que se desprende que el proceso de boronizado puede tener un precio competitivo, marcando las diferencias en las propiedades obtenidas en los materiales.

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- El estudio realizado constituye el primer trabajo de desarrollo del proceso de boronizado realizado en Ecuador; Se demostró que este proceso puede ser introducido en el mercado ecuatoriano como alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de dureza y resistencia al desgaste para la industria.
- El modelo de retorta diseñado y construido satisface las necesidades y requerimientos para una adecuada difusión de boro en las piezas de substrato. Lo que indica que el proceso por empaquetamiento de boro y lecho fluidizante es una técnica viable, no complicada de desarrollar y que puede ser aplicada en la industria.
- Los materiales escogidos para el desarrollo del proceso de boronizado forman parte de distintos grupos de aceros utilizados para aplicaciones en la industria; lo que demuestra que el proceso puede ser aplicado para diversos tipos de aceros con bajo y alto contenidos de carbono, así como en contenido de materiales aleantes.
- Las variaciones de tiempo durante la ejecución de las fases experimentales demuestran distintos espesores para la capa boronizada en los materiales, éste es un indicador de que el proceso de boronizado es controlado por la difusión.
- Las medidas de microdureza para las distintas fases experimentales, aunque no son similares a las durezas propuestas por la literatura, demuestran un incremento de la dureza en la superficie de todos los materiales en comparación con los valores de dureza para estado de suministro.
- La metalografías realizadas a las muestras indican la presencia de la capa boronizada con la morfología típicas de dientes de sierra. Sin embargo para materiales de fundición y con alto contenido de materiales aleantes, la presencia

- de la capa boronizada presenta una morfología de fina capa difundida hacia el material base.
- Debido a que el proceso de boronizado está controlado por la difusión, se establece un tiempo de 5 horas y una temperatura de 920° C para optimizar el proceso y obtener resultados que puedan ser utilizados en aplicaciones industriales. Sin embargo en este estudio se detallan los resultados obtenidos para distintas condiciones de tratamiento que pueden ser utilizadas también.
 - La aplicación industrial, pines Umco, desarrollada en este estudio no es la más adecuada para el proceso de boronizado. Se mostró que la falla se debió a fractura frágil del pin durante su operación, el recubrimiento de boro no garantiza el buen desempeño en la aplicación dado que su aplicación no es necesariamente para resistir impacto (que fue la causa de la falla) sino para resistir desgaste abrasivo, erosivo o por rodadura.
 - El análisis de costo del servicio de boronizado demuestra que este proceso puede introducirse en el mercado ecuatoriano con facilidad debido a las aplicaciones y propiedades que brinda.

7.2 Recomendaciones

- Este trabajo debe ser el inicio para estudios posteriores de desarrollo del proceso de boronizado en el Ecuador. Este proceso no ha sido adoptado en la industria debido a que no existen opciones en el mercado en cuanto a servicios de endurecimiento superficial con Boro.
- Se considera que para investigaciones posteriores se debe realizar las mediciones de microdureza con un instrumento que garantice las mediciones. Pues el microdurómetro de la Escuela Politécnica del Ejército, el único disponible para investigación, no se encuentra debidamente calibrado.

- Se debe tener en cuenta que para realizar posteriores tratamientos térmicos luego del proceso de boronizado, existe la posibilidad que la capa boronizada disminuya su espesor. Por lo que los tratamientos post boronizado se lo debe realizar bajo parámetros adecuados como un ambiente protector libre de oxígeno que garantice la difusión de la capa boronizada.

8 Referencias Bibliográficas

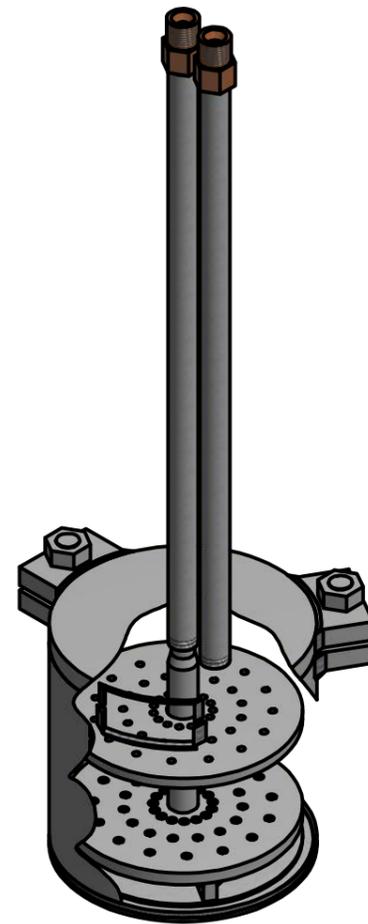
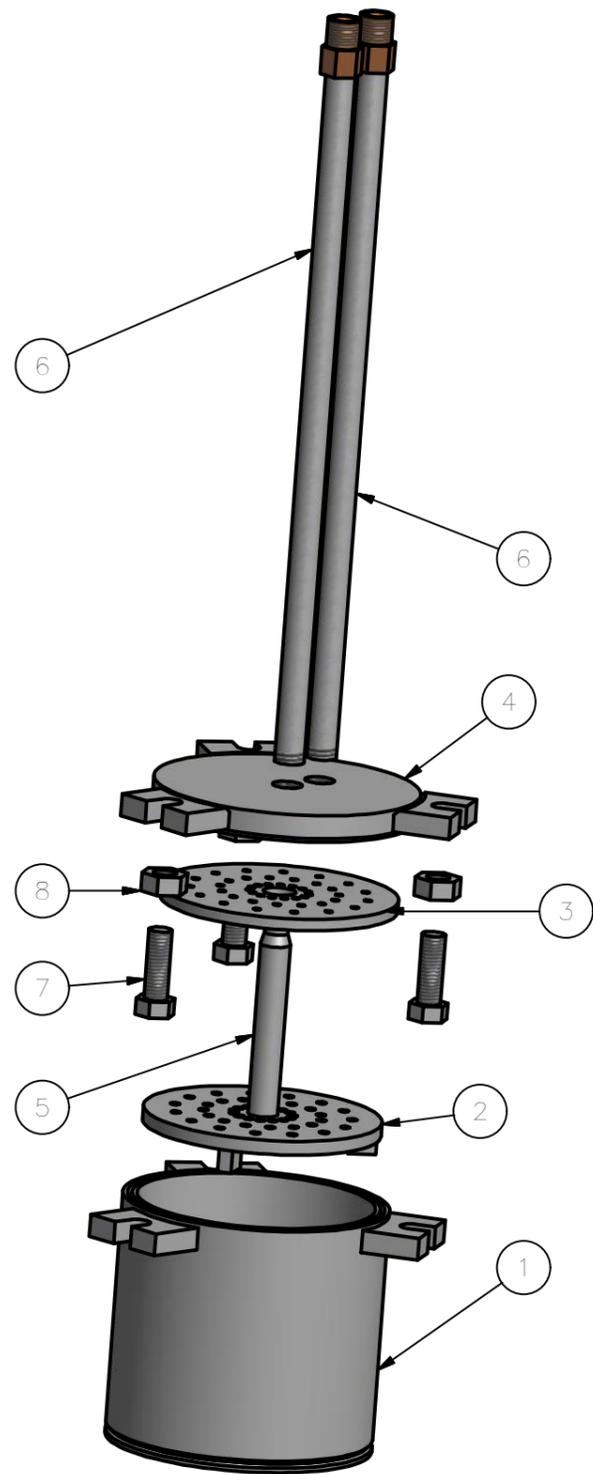
1. **N.A.** Clases de Tratamientos. [En línea] [Citado el: 13 de 10 de 2012.] <http://www.uhu.es/beatriz.aranda/apuntesciemat/CLASES%20DE%20TRATAMIENTOS.pdf>.
2. **Instituto Tecnico Superior Villalba Hervás.** Tratamientos de los metales para mejorar sus propiedades. [En línea] [Citado el: 2012 de 10 de 13.] http://iesvillabahervastecnologia.files.wordpress.com/2010/01/tratamientos_metales.pdf.
3. **Castro, Milagrosa González Fernández de.** Boración de Aceros- Tesis Doctoral. [En línea] 1999. [Citado el: 2012 de 10 de 13.] <http://oa.upm.es/130/1/05199904.pdf>.
4. **Anil Kumar Sinha, Bohn Piston Division.** Boriding of Steels. [aut. libro] ASM. *ASM Handbook-Heat Treating Vol.4.* 1991, pág. 978.
5. **Lampman, S.** Introduction to Surface Hardening of Steels. [aut. libro] ASM International Society. *Handbook Heat Treatment-Vol4.* pág. 611.
6. **F.Shackelford, James.** *Ciencia de materiales para ingenieros.* Mexico : Pearson, 1995.
7. **Ericsson, Torsten.** Principles of Heat Treating of Steels. [aut. libro] A.I. Society. *Handbook Heat Treatment- Vol 4.* pág. 14.
8. **Eng., Mater.** Aug1970. pág. 42.
9. **Fichtl, W.J.G.** *Saving Energy and money by Boronizing.* Tokyo : s.n., 1988.
10. **P. Dearnley, T.Bell.** *Surface Engineering.* 1985. págs. 203-217. Vol. 1.
11. **R.Chatterjee-Fischer.** *Surface Modification Technologies- Chapter 8.* s.l. : Sundarshan, 1989. págs. 567-609.
12. **H. Kunst, O.Schaaber.** *Hart.-Tech. Mitt .* s.l. : Translations HB 7122-1 and HB 7122-II, 1986. págs. 1-25. Vol. 22.
13. **O. Allaouia, N. Bouaouadjab, G. Saindernanc.** *Characterization of boronized layers on a XC38 steel.*
14. **A. Galibois, O. Boutenko, B.Voyzelle.** *Acta Metall.* págs. 1753-1763,1765-1771. Vol. 28.
15. **W.Fichtl, N. Trausner , A.G Matuschka.** *Boronizing with Ekabor, in Elektroschmeltz Kempten, GmbH; Metallpraxis.* 1972. pág. 434. Vol. 11.
16. **Lindberg Heat Treating Company.** *Boroalloy Process-Process data sheet 4.*

17. **A.J. Ninham, I.M. Hutchings.** *Wear of materials*. 1989. págs. 121-127. Vol. 1.
18. **M.E. Blanter, N.P. Bosedin.** *Metalloved. Term. Obra. Met.* 1955. págs. 3-9. Vol. 6.
19. **G.V. Samsonov, A.P. Epik.** *Coatings on High Temperature Materials, Part1*. s.l. : Plenum Press, 1966. págs. 7-111.
20. **J.J Smith, Delft University of technology, Laboratory of Metals** . 1984.
21. **C.M. Brakman, A.W.J. Gomers, E.J. Mittermeijer.** *Proceedings of Heat Treatment '88*. s.l. : Institute of Metals, 1988. págs. 211-217.
22. **Chatterjee-Fischer, R.** *Surface Modification Technologies*. s.l. : T.S. Sundarshan , 1989. págs. 567-609.
23. **Matuschka, A. Graf von.** *Boronizing*. s.l. : Hanser, 1980.
24. **A.Gallibois, O. Boutenko, B.Voyzelle.** *Acta Metall.* 1980. págs. 1753-1763,1765-1771. Vol. 28.
25. **Lyakhovich, L.S.** *Improving the life of forming tools by Chemico-Thermal Treatment*. Minsk : s.n., 1971.
26. **H.Orning, O.Schaaber.** *Hart.-Tech.Mitt Vol17*. 1962. págs. 131-140.
27. **H.C. Fiedler, R.J.Sieraksi.** *Met. Prog.* 1971. págs. 101-107. Vol. 99.
28. **E.Filep, Sz.Farkas, G.Kolozsvary.** *Surface Enineering*. 1988. págs. 155-158. Vol. 4.
29. Bortec. [En línea] [Citado el: 12 de Septiembre de 2012.] http://www.bortec.de/images/bortec/wear_protection_e.pdf.
30. Bortec. [En línea] 12 de Septiembre de 2012. http://www.bortec.de/images/bortec/wear_protection_e.pdf.
31. **Bohler.** *Manual de Aceros*. 1999.
32. Properties and applications of Ni-Resist and Ductile Ni-Resist alloys. [En línea] [Citado el: 06 de Septiembre de 2012.] http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/PropertiesandApplicationsofNi_ResistandDuctileNi_ResistAlloys_11018_.pdf.
33. **Callister, William.** *Introducción a la Ingeniería de Materiales*. Barcelona : Revert'e S.A, 1995. págs. 136-137.
34. **Doyle, Lawrence.** *Materiales y procesos de manufactura para Ingenieros*. [trad.] Julio Furnier González. México : Prentice-Hall Hispanoamericana, 1998.

35. **Appod, Hans.** *Tecnología de los metales para profesionales técnico-mecánicas.* Barcelona : Reverté, 1989.
36. **Matweb.** AISI Type 316L Stainless Steel, annealed and cold drawn bar. [En línea] [Citado el: 12 de 11 de 2012.] <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c02b8c0ae42e459a872553e0ebfab648&ckck=1>.
37. **White, Jhon. Agge, Marvin. Case, Kenneth.** *Técnicas de análisis económico en ingeniería.* México D.F : Limusa, 1981.
38. ecuador legal online. [En línea] [Citado el: 30 de 11 de 2012.] <http://www.ecuadorlegalonline.com/laboral/salario-minimo-2012/>.
39. **Lampman, S.** Introduction to Surface Hardening of Steels. [aut. libro] ASM International. *Handbook ASM Vol4-Heat Treating.* 1991, pág. 607.
40. Scribd. [En línea] [Citado el: 02 de Noviembre de 2012.] <http://es.scribd.com/doc/74434049/7/Tratamiento-termoquimico-TTQ>.
41. **Morral. F, Jimeno. E, Molero.P.** *Metalurgia General.* Barcelona : Reverté, 1982.
42. **Bortec.** *Information for using BorTec`s Ekabor® boronizing agents.* Goldenbergst : s.n.

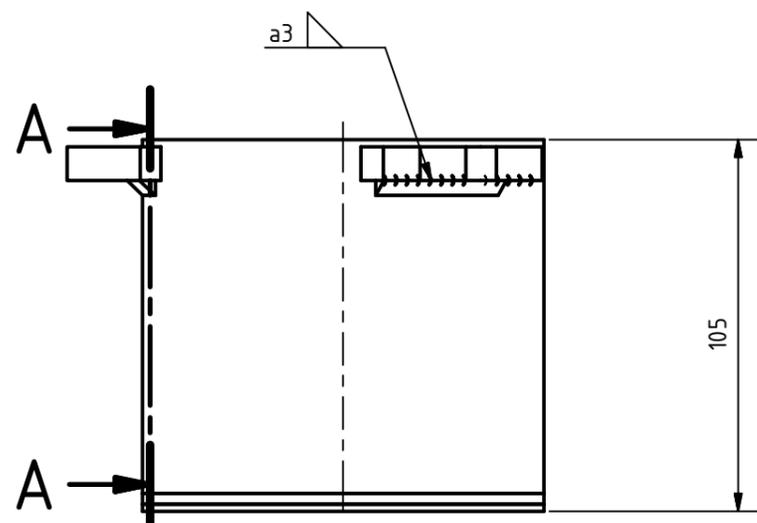
ANEXOS

ANEXO A
PLANOS RETORTA

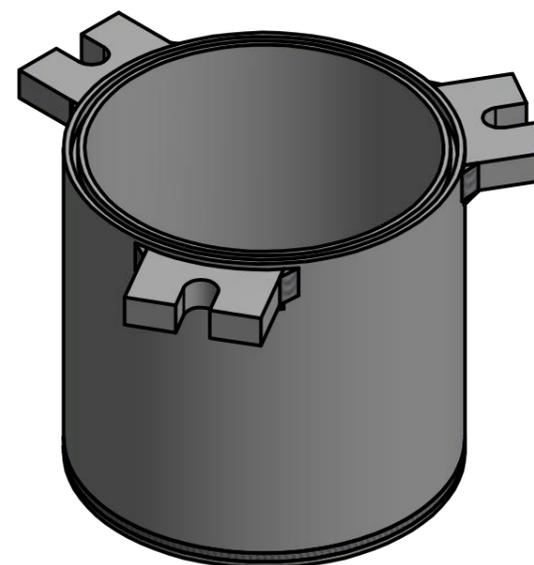
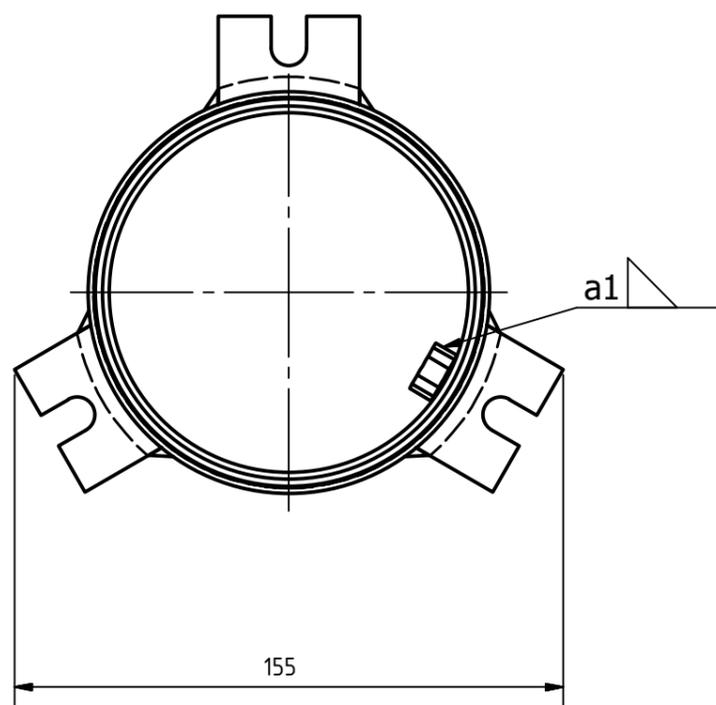
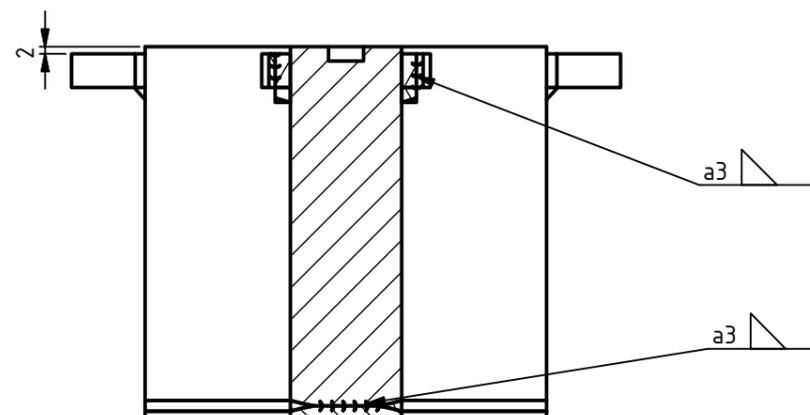


ESPECIFICACIONES	
ALTURA:	429[mm]
ANCHO:	155[mm]
PESO:	3,5[kg]

8		Tuerca	ISO 7411	3	Acero AISI 304	M10x2	
7		Perno	ISO 7411	3	Acero AISI 304	M10x2	
6		inyector y Desfogue	USFQ.107	2			
5		Tubo Distribuidor	USFQ.106	1	Acero AISI 304		
4		Tapa Principal	USFQ.105	1	Acero AISI 304		
3		Distribuidor Superior	USFQ.104	1	Acero AISI 304		
2		Distribuidor Inferior	USFQ.103	1	Acero AISI 304		
1		Camara	USFQ.102	1	Acero AISI 304		
N°	Zona	Denominación	Plano y/o Norma	Cant.	Material	Observación	
		 Facultad de Ingeniería Mecánica			Dib.	Daniel Iza	Escala: 1:3
					Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza	
					Rev.	Msc. Lorena Bejarano	
RETORTA					USFQ 101		Fecha: 2012-12-10



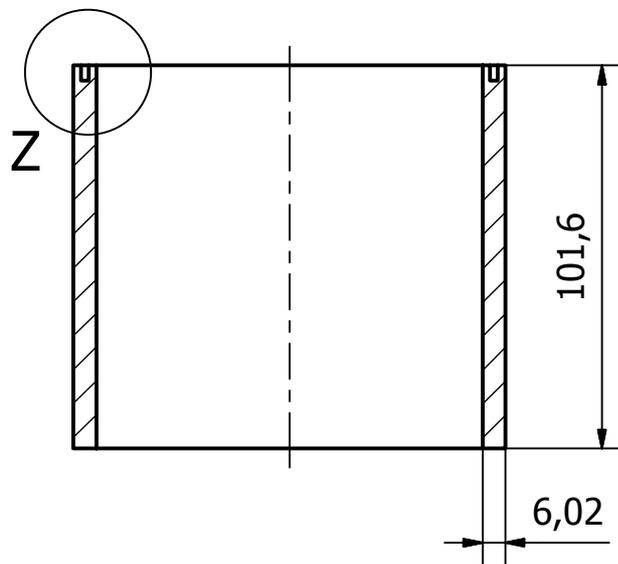
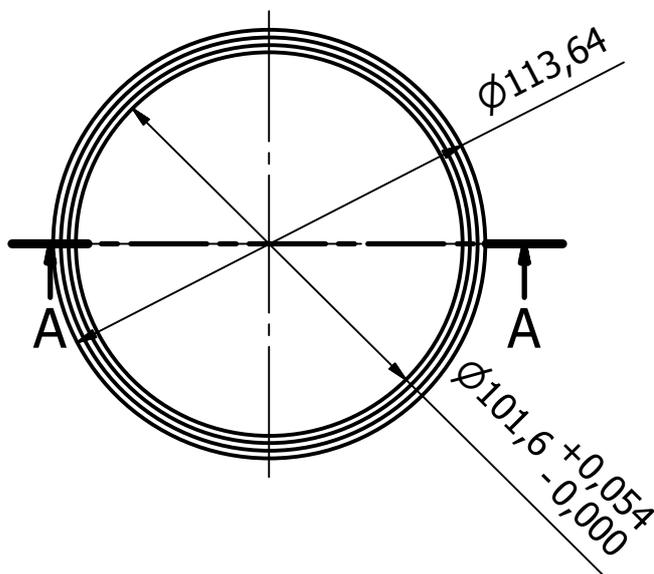
A-A (1: 2)



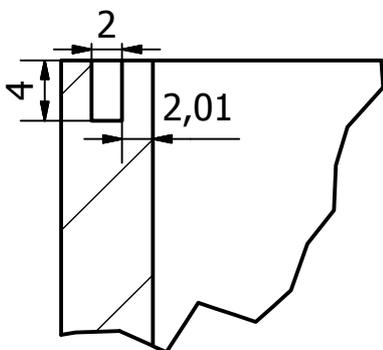
ESPECIFICACIONES	
La solda se realiza con las siguientes partes:	
* Tubo(USFQ.102.1)	
* Tapa inferior (USFQ.102.2)	
* Brida (USFQ.102.3)	
* Tope camara (USFQ.102.4)	
Y se la realiza con el electrodo E308L-16, con soldadura MIG como se especifica.	

Trat. Termico	Ninguno		Facultad de Ingeniería Mecánica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:2	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
CAMARA		USFQ 102		

Corte A-A (1 : 2)

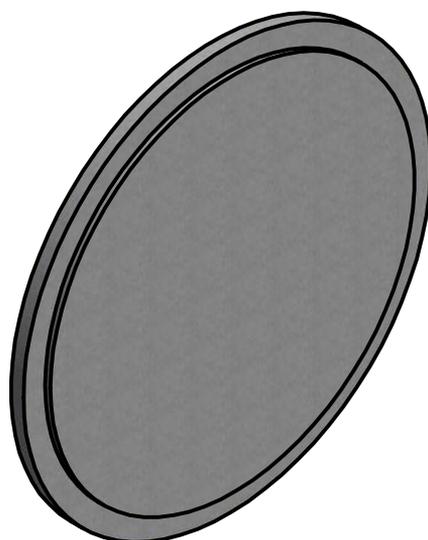
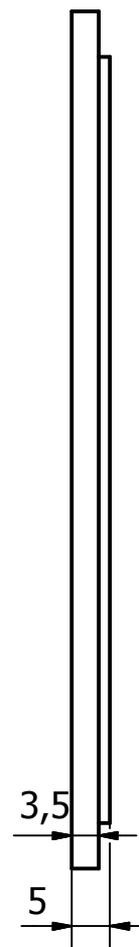
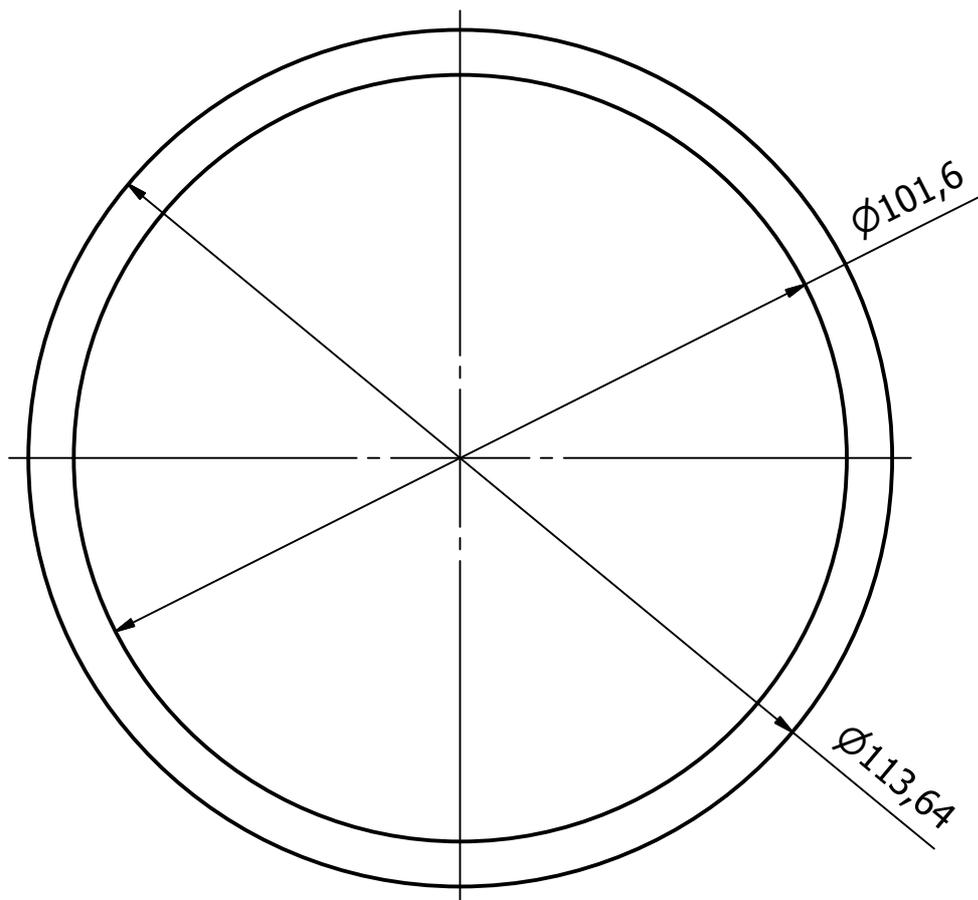


Detalle Z (2 : 1)

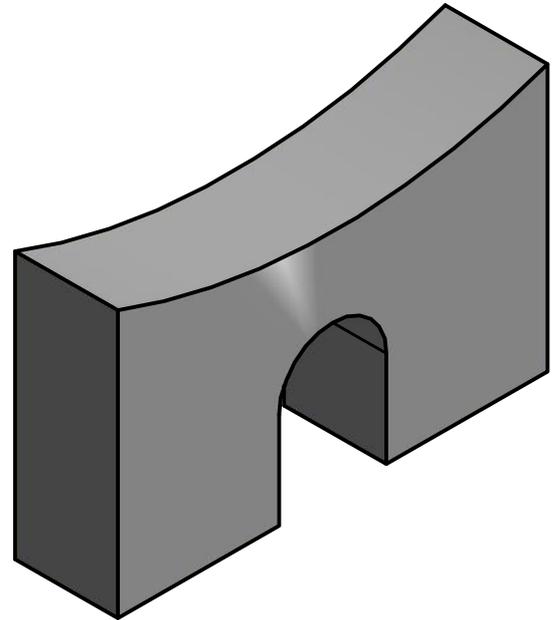
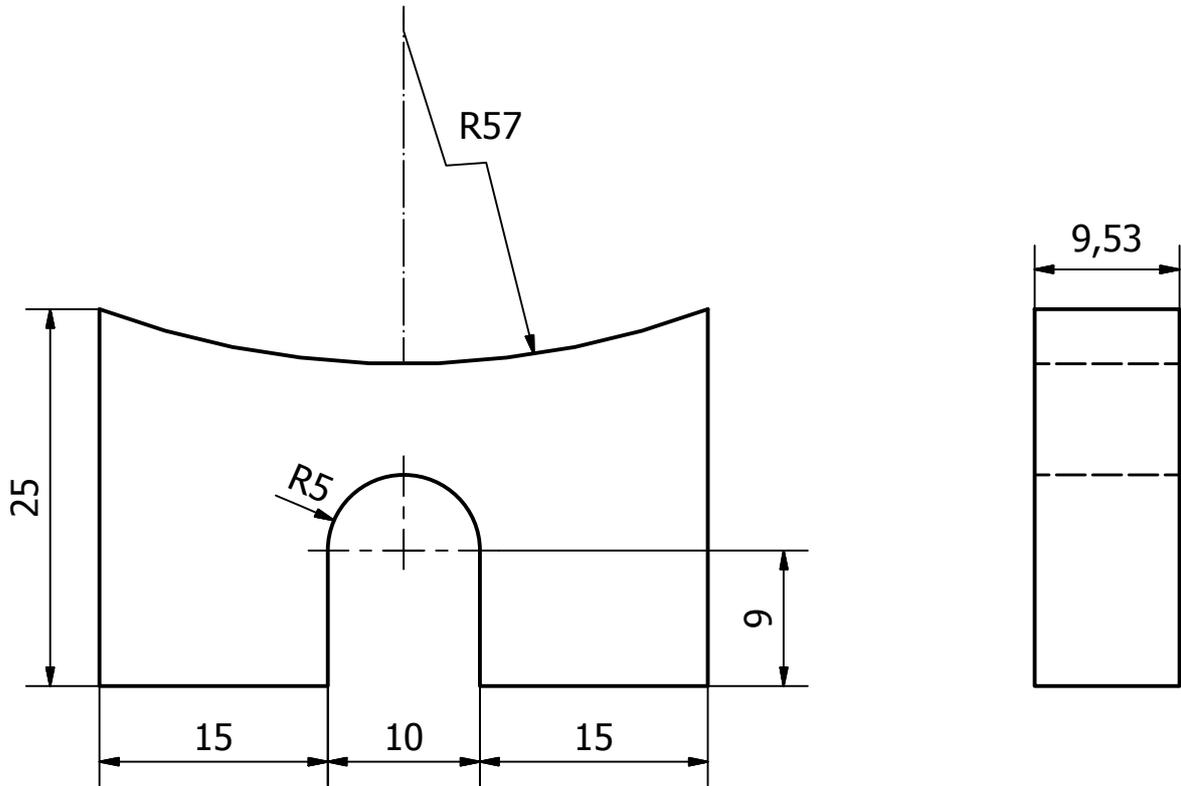


Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Grad: ± 0.1	Escala: 1:2	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TUBO		USFQ.102.1		

N7 / (N6)

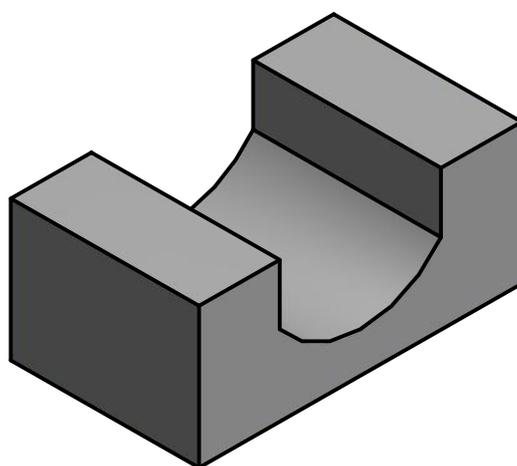
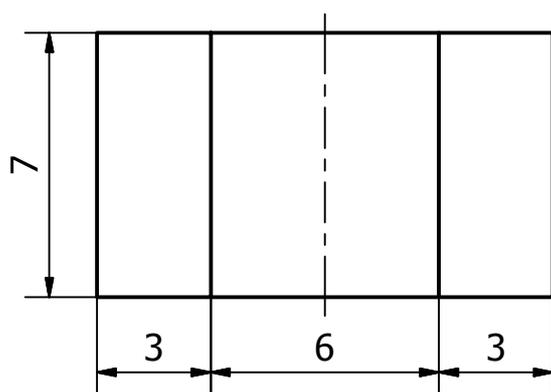
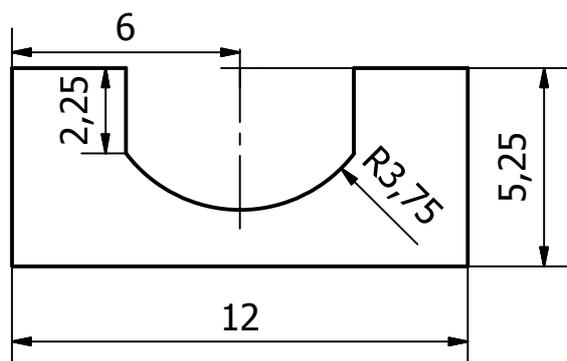


Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TAPA INFERIOR		USFQ.102.2		

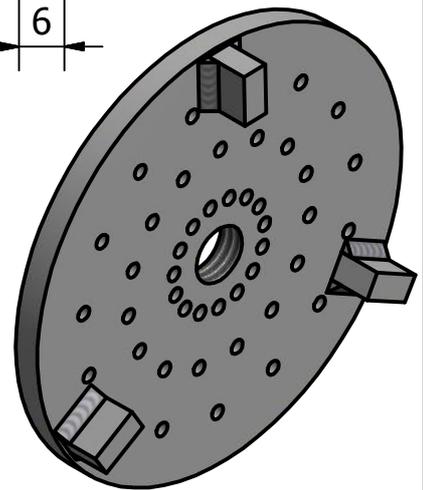
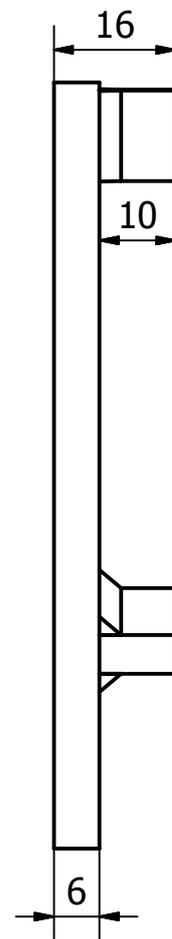
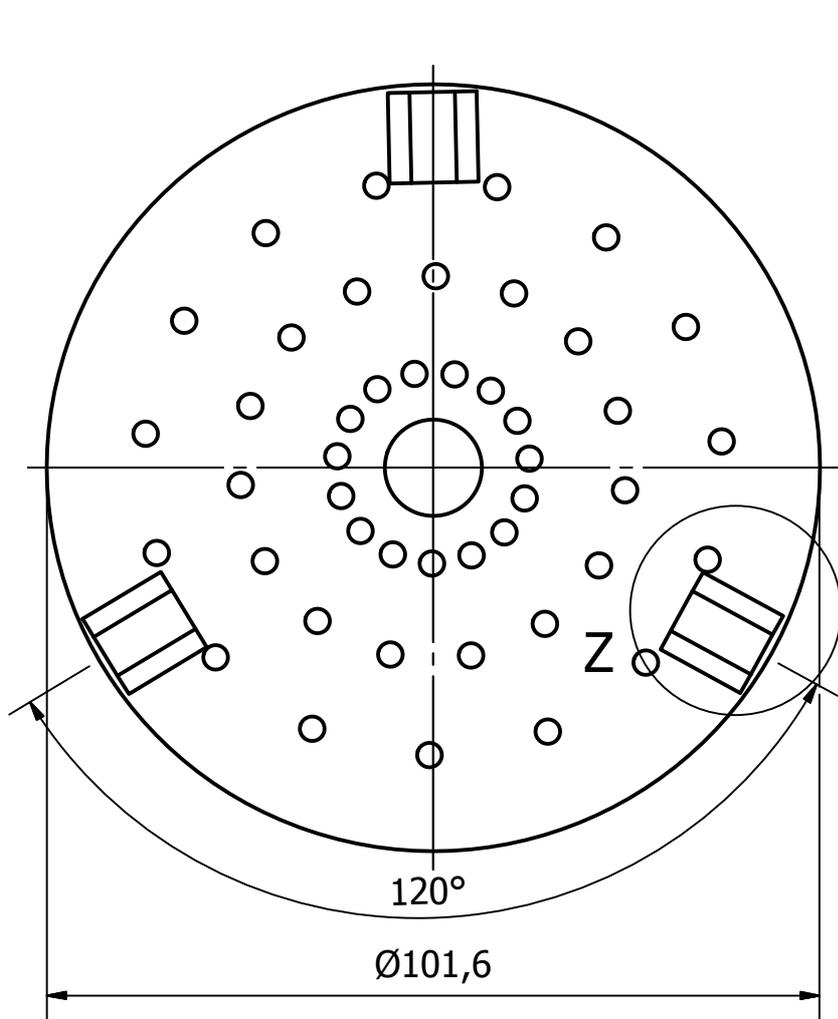


ESPECIFICACIONES
Fabricar 6 elementos

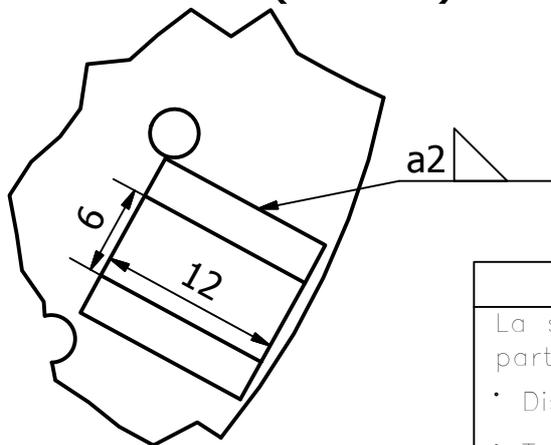
Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 2:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
BRIDA		USFQ.102.3		



Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 5:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TOPE CAMARA		USFQ.102.4		



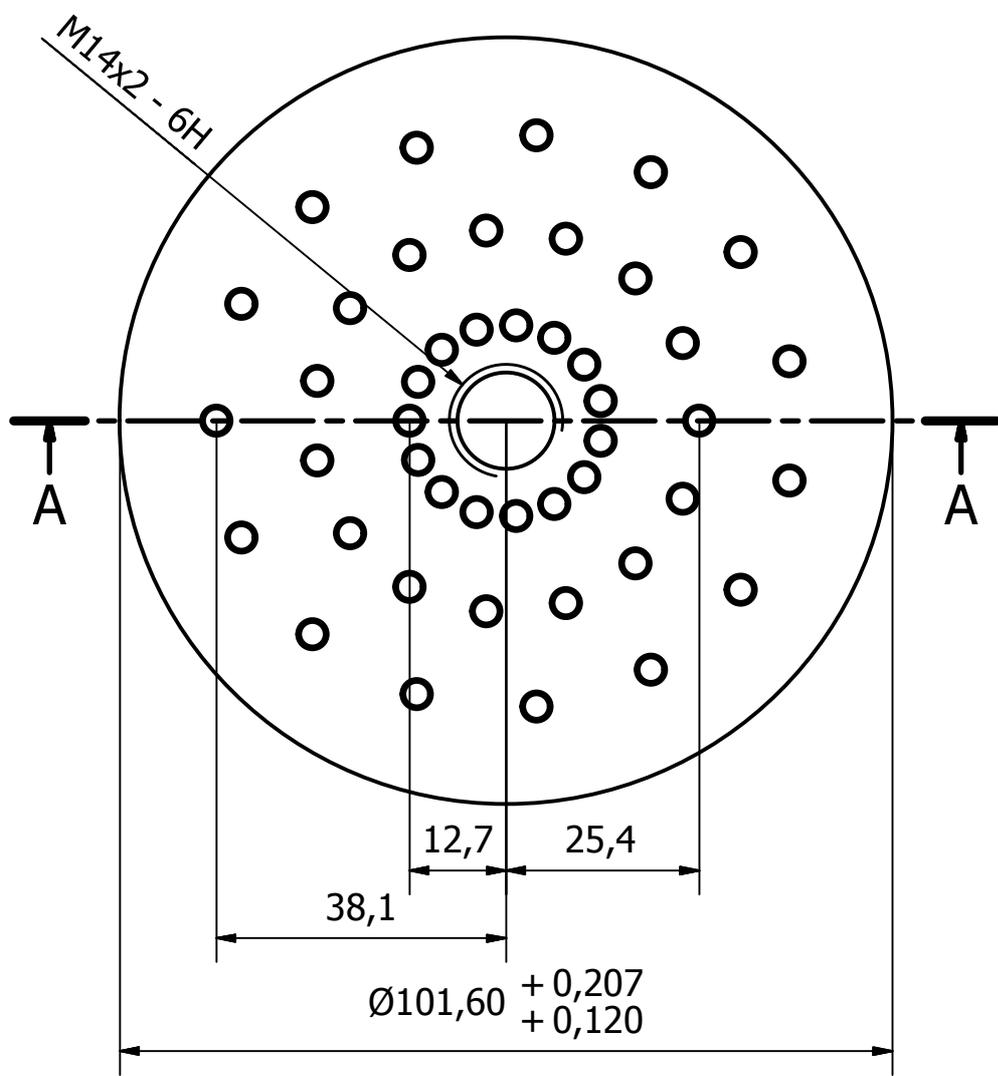
Detalle Z (2 : 1)



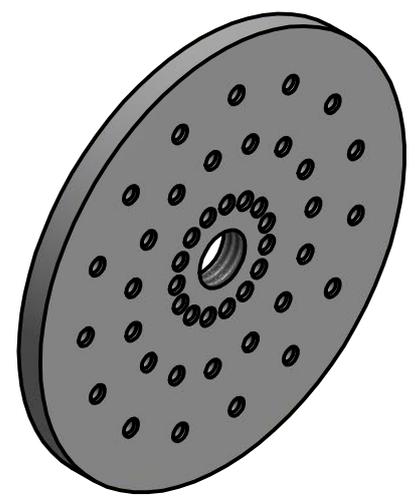
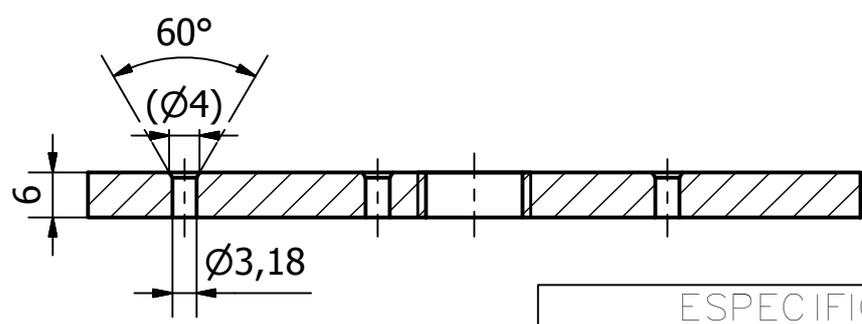
ESPECIFICACIONES	
La suelda se realiza con las siguientes partes:	
• Distribuidor Base (USFQ.103.1)	
• Tope Distribuidor (Dimensiones se especifican en este plano)	
Y se la realiza con el electrodo E308L-16, con soldadura MIG como se especifica.	

Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingeniería Mecánica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
DISTRIBUIDOR INFERIOR		USFQ.103		

N6 / (N7) / (N10)



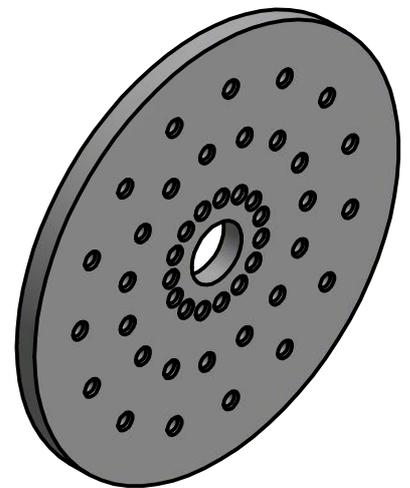
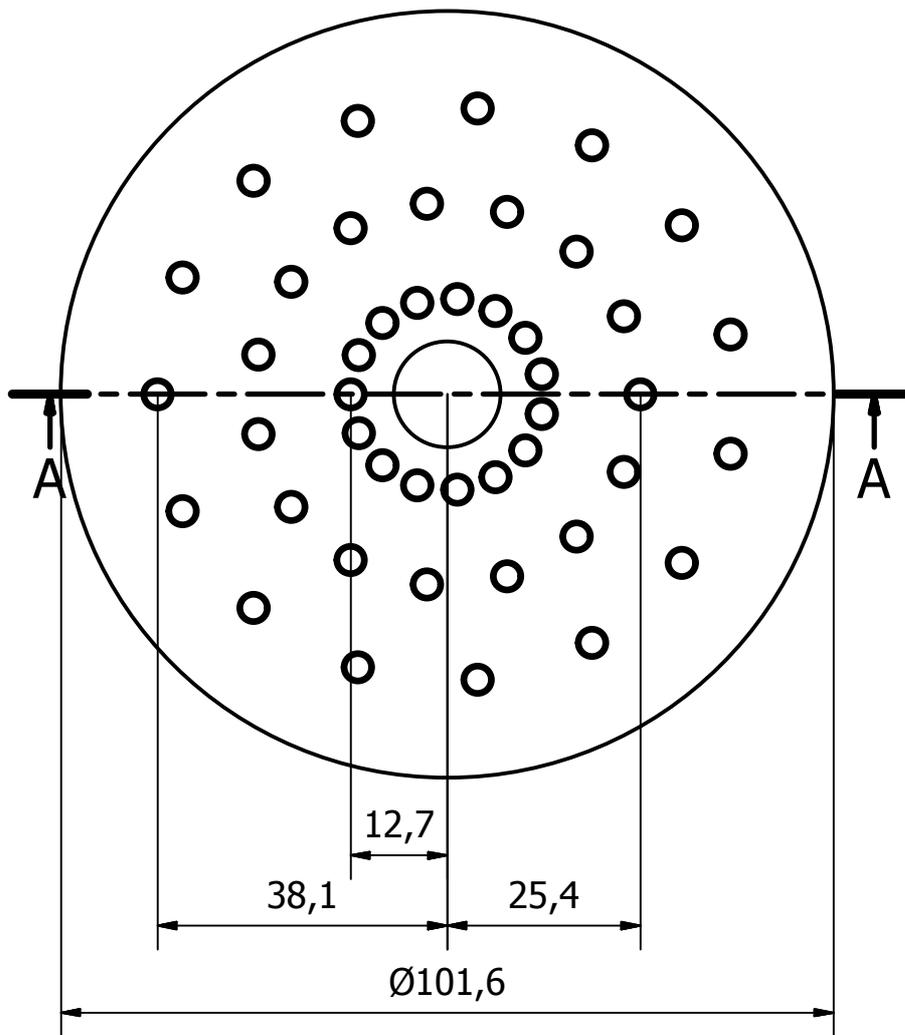
Corte A-A (1 : 1)



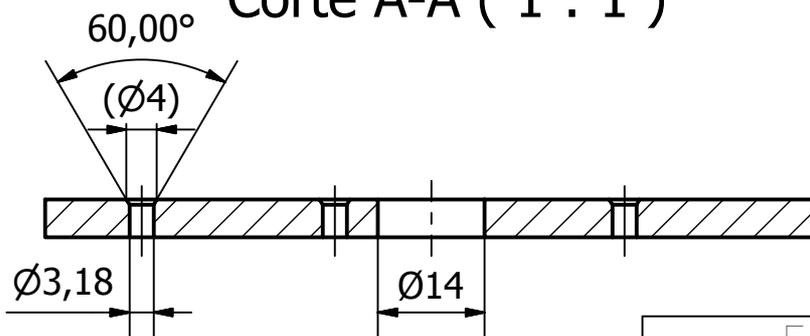
ESPECIFICACIONES
 Los agujeros son avellanados segun se especifica, son 15 agujeros equidistantes con las medidas que se muestra.

Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: i 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
DISTRIBUIDOR INFERIOR		USFQ.103.1		

N6 / (N7) (N10)



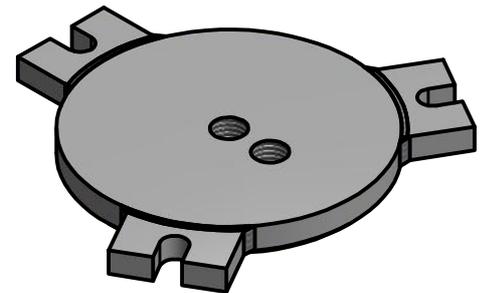
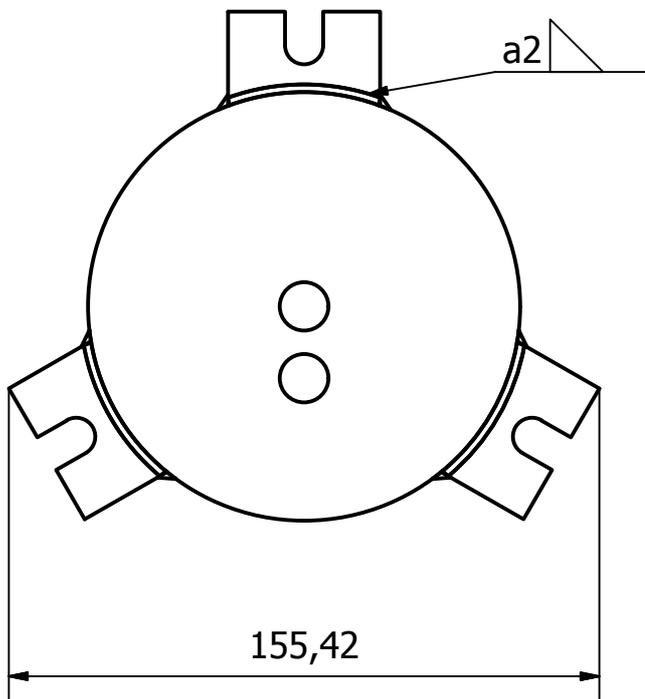
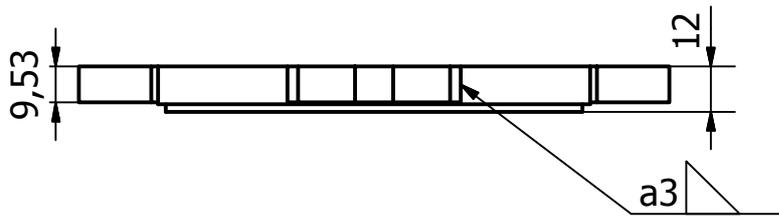
Corte A-A (1 : 1)



ESPECIFICACIONES

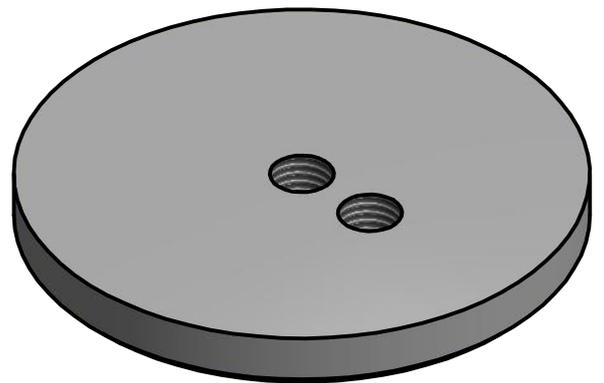
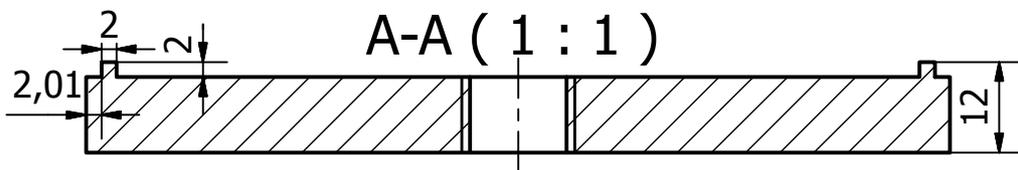
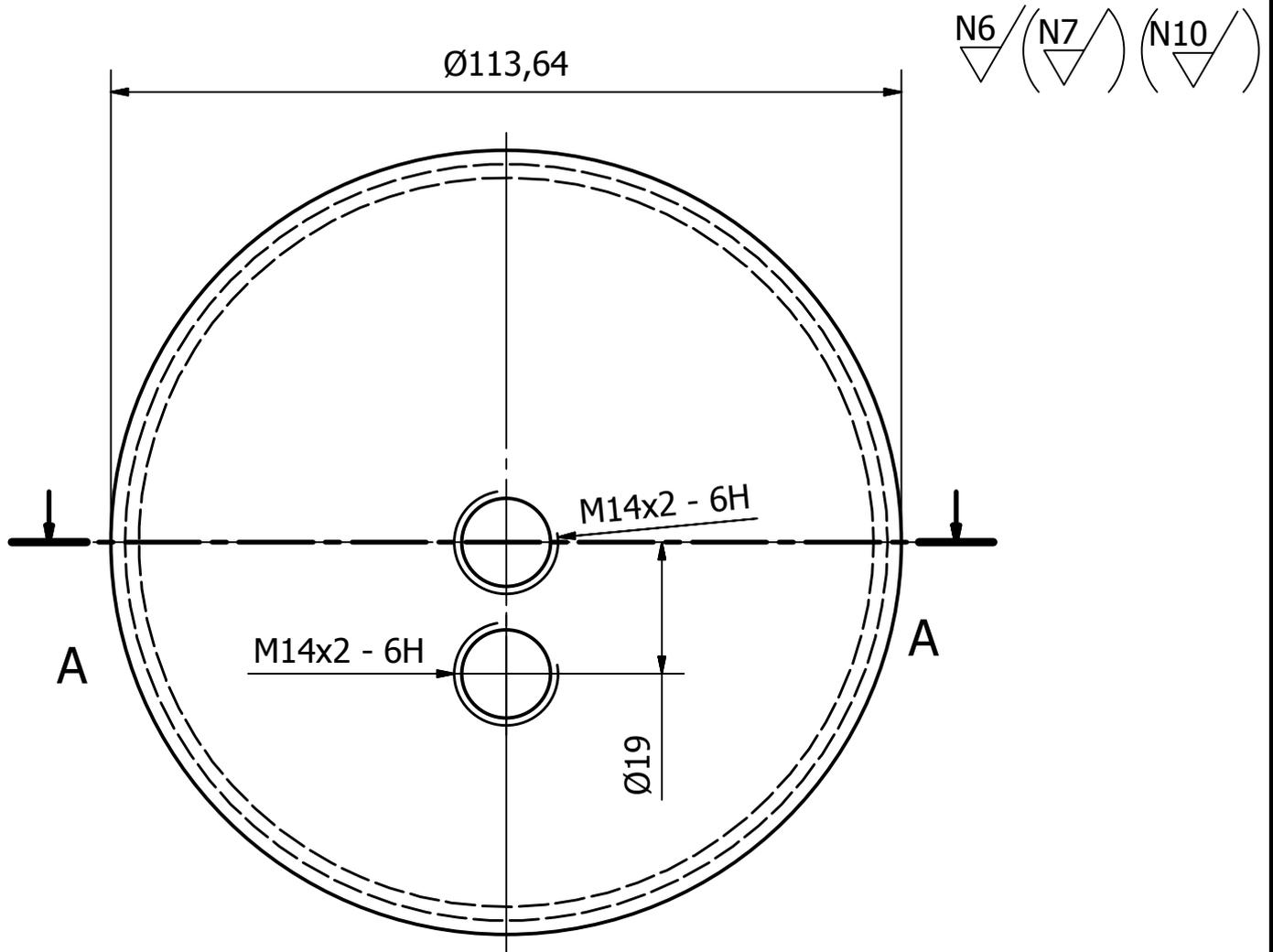
Los agujeros son avellanados segun se especifica, son 15 agujeros equidistantes con las medidas que se muestra.

Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
DISTRIBUIDOR SUPERIOR		USFQ.104		

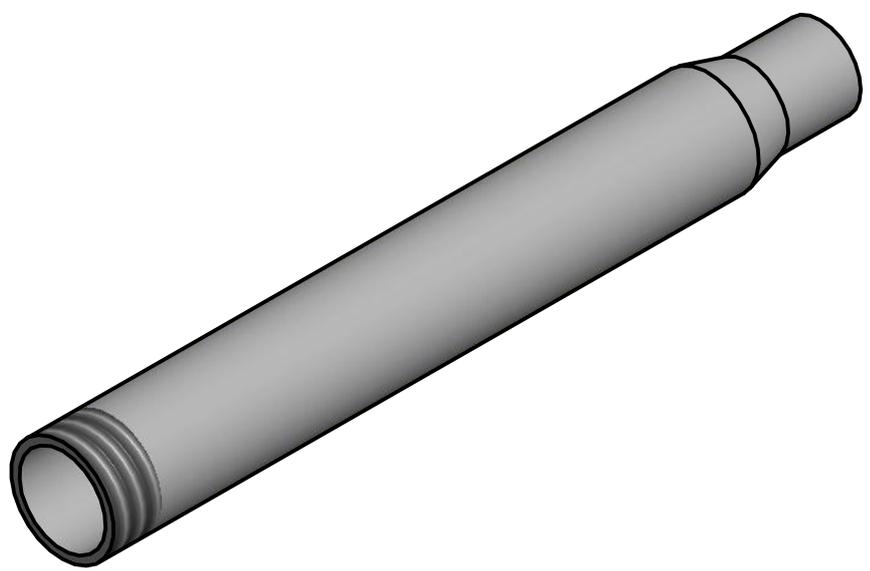
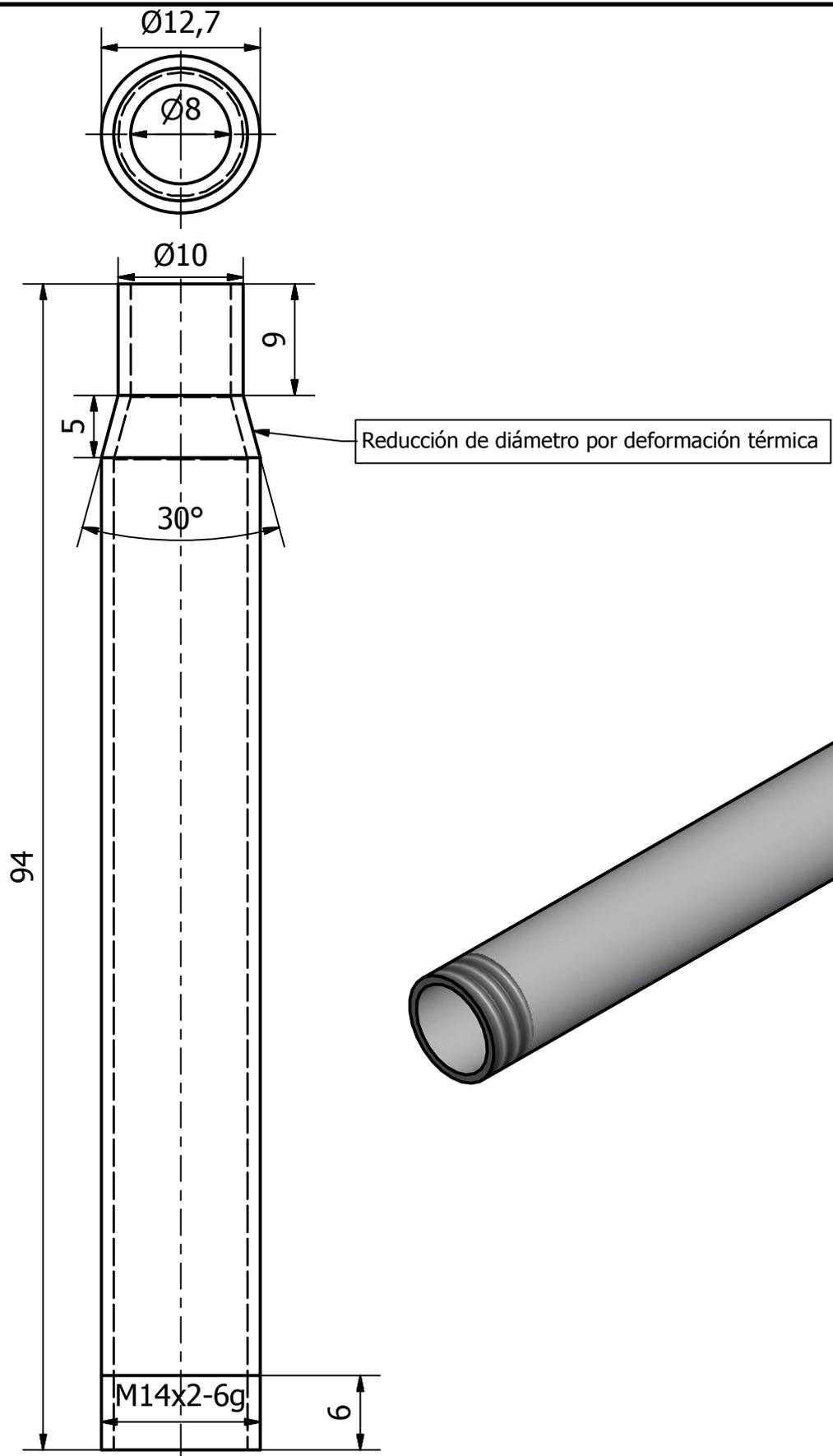


ESPECIFICACIONES
La suelta se realiza con las siguientes partes:
• Tapa (USFQ.105.1)
• Brida (USFQ.102.3)
Y se la realiza con el electrodo E308L-16, con soldadura MIG como se especifica.

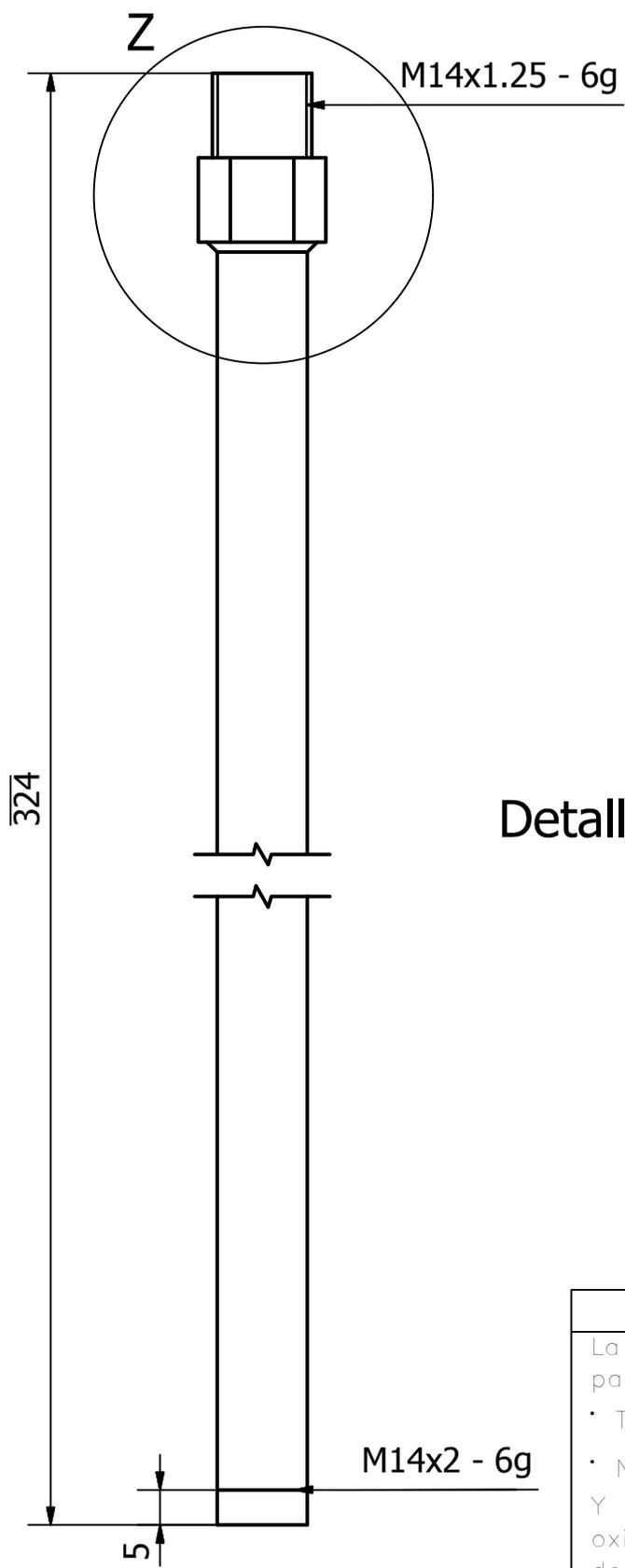
Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:2	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TAPA		USFQ.105		



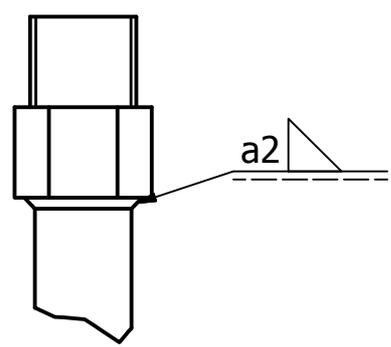
Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TAPA		USFQ.105.1		



Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 2:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TUBO DISTRIBUIDOR		USFQ.106		



Detalle Z (1 : 1)



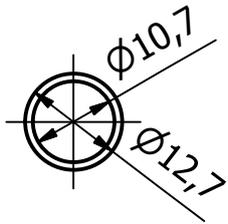
ESPECIFICACIONES

La suelda se realiza con las siguientes partes:

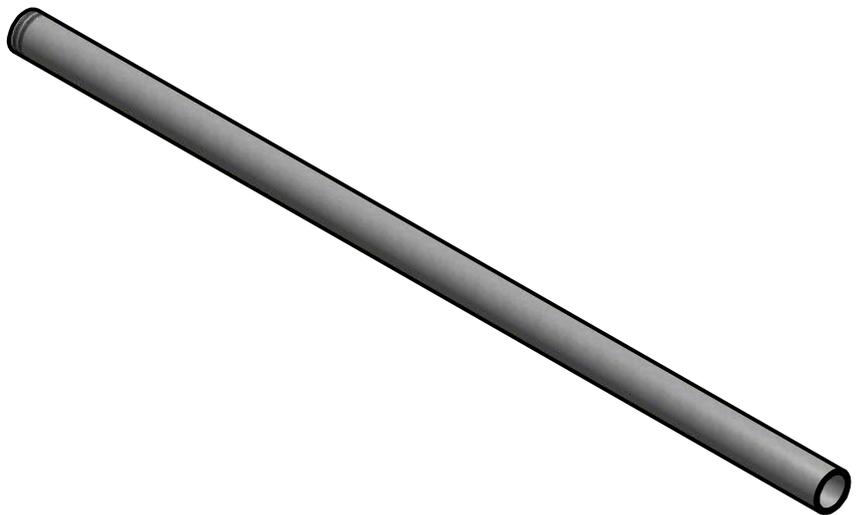
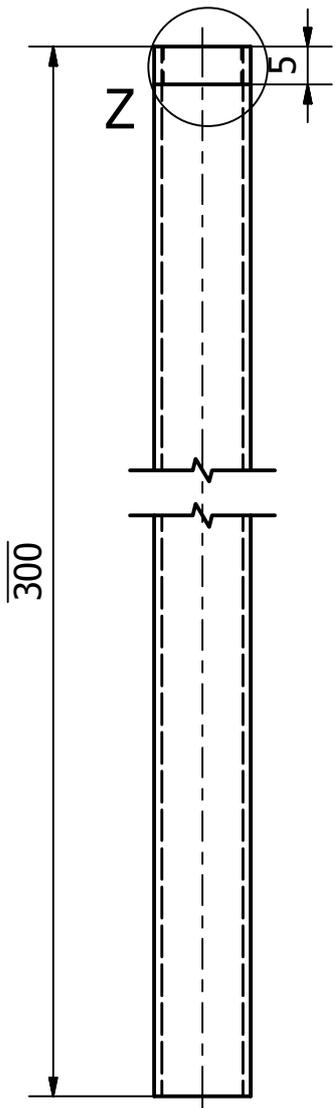
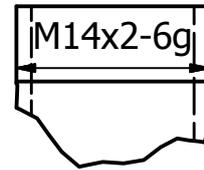
- Tubo Inyector y Desfogue (USFQ.107.1)
- Niple (USFQ.107.2)

Y se la realiza con soldadura oxiacetilenica, con plata como material de aporte, tal como se especifica.

Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material:	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
INYECTOR y DESFOGUE		USFQ.107		



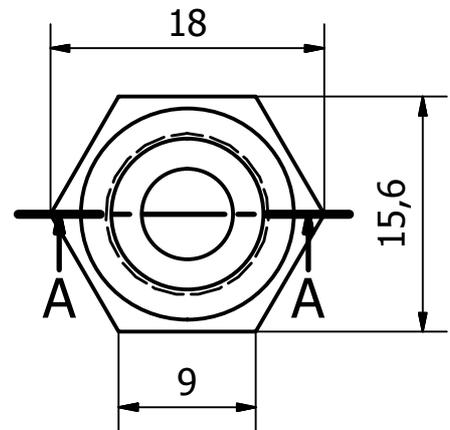
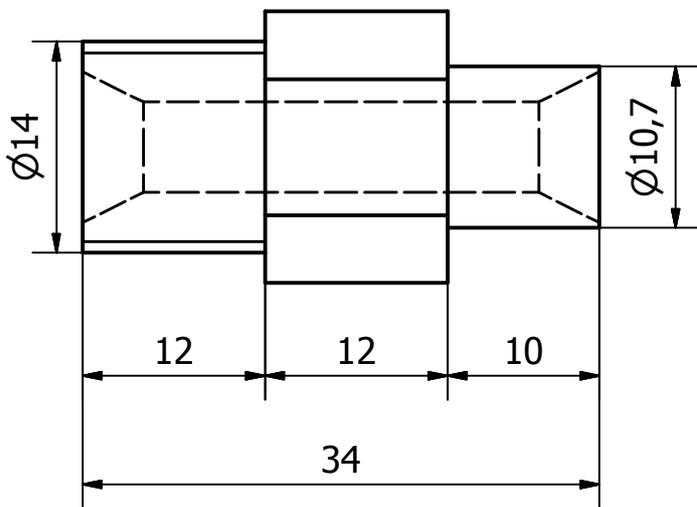
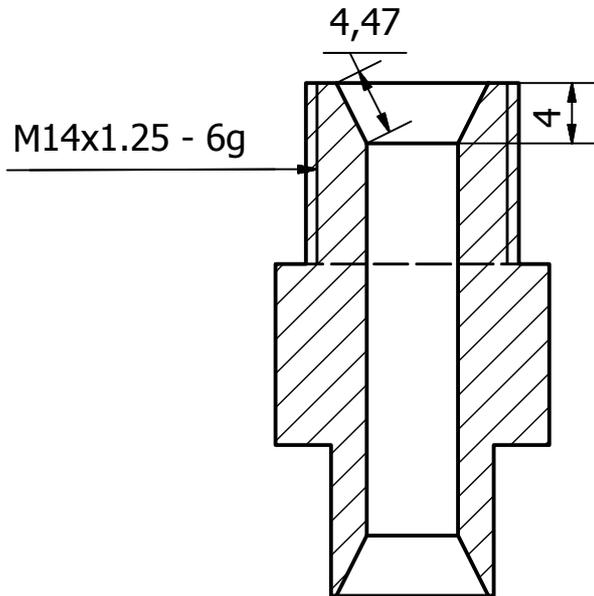
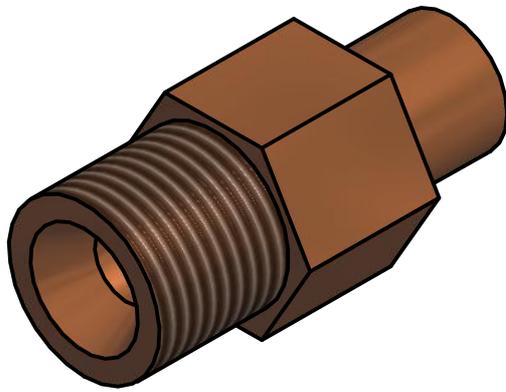
Detalle Z (2 : 1)



ESPECIFICACIONES
Fabricar 2 elementos

Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Acero AISI 304	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 1:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
TUBO INYECTOR y DESFOGUE		USFQ.107.1		

A-A (2 : 1)



ESPECIFICACIONES
 Fabricar 2 elementos

Trat. Termico	Ninguno	 Universidad San Francisco de Quito	Facultad de Ingenieria Mecanica	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Daniel Iza
Material: Cobre	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 2:1	Dis.	Dr.A.Valarezo-D.Iza
			Rev.	Msc. Lorena Bejarano
			Fecha: 2012-12-10	
NIPLE		USFQ.107.2		

ANEXO B
NORMAS ASTM

ANEXO B-1
NORMA ASTM E 140

TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C Hardness Range)^{A, B}

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^C		Knoop Hardness, 500-gf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Scleroscope Hardness Number ^D	Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)		A Scale, 60-kgf (HRA)	D Scale, 100-kgf (HRD)	15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N)	30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N)	45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N)		
68	940	...	...	920	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	...	...	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	865	...	...	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	...	(739)	846	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	65
64	800	...	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64
63	772	...	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63
62	746	...	(688)	776	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62
61	720	...	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61
60	697	...	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60
59	674	...	634	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59
58	653	...	615	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58
57	633	...	595	670	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57
56	613	...	577	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56
55	595	...	560	630	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55
54	577	...	543	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54
53	560	...	525	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53
52	544	(500)	512	576	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47
46	458	432	432	480	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46
45	446	421	421	466	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40
39	382	362	362	391	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	39
38	372	353	353	380	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38
37	363	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.6	49.3	37
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	36
35	345	327	327	351	67.9	51.5	77.7	55.0	37.2	47.1	35
34	336	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	34
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	33
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	32
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	31
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	30
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	29
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	28
27	279	264	264	290	63.8	45.2	73.3	47.7	27.8	39.5	27
26	272	258	258	284	63.3	44.6	72.8	46.8	26.7	38.7	26
25	266	253	253	278	62.8	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	25
24	260	247	247	272	62.4	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	24
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	23
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.5	22
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	21
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	20

^A In the table headings, *force* refers to total test forces.

^B Appendix X1 contains equations converting determined hardness scale numbers to Rockwell C hardness numbers for non-austenitic steels. Refer to 1.11 before using conversion equations.

^C The Brinell hardness numbers in parentheses are outside the range recommended for Brinell hardness testing in 8.1 of Test Method E 10.

^D These Scleroscope hardness conversions are based on Vickers—Scleroscope hardness relationships developed from Vickers hardness data provided by the National Bureau of Standards for 13 steel reference blocks, Scleroscope hardness values obtained on these blocks by the Shore Instrument and Mfg. Co., Inc., the Roll Manufacturers Institute, and members of this institute, and also on hardness conversions previously published by the American Society for Metals and the Roll Manufacturers Institute.

ANEXO B-2
NORMA ASTM E 165

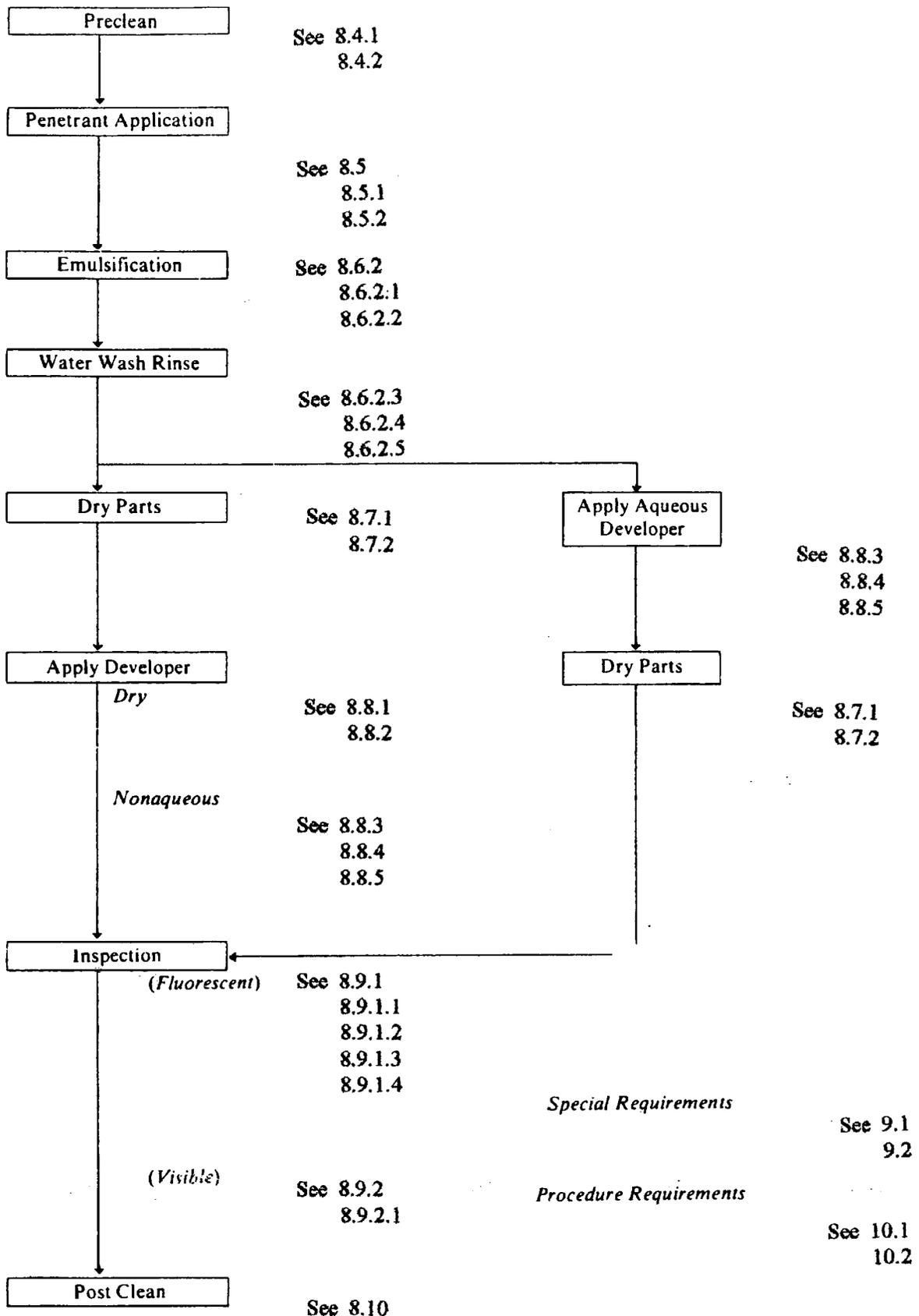


FIG. 2 General Procedure Flowsheet for Post-emulsifiable Method

ANEXO B-3
NORMA ASTM E 384



test machine should be protected from shock or vibration. To minimize vibrations, the operator should avoid contacting the machine in any manner during the entire test cycle.

6.2 *Vickers Indenter*—The Vickers indenter usually produces a geometrically similar indentation at all test forces. Except for tests at very low forces that produce indentations with diagonals smaller than about 25 μm , the hardness number will be essentially the same as produced by Vickers machines with test forces greater than 1 kgf, as long as the material being tested is reasonably homogeneous. For isotropic materials, the two diagonals of a Vickers indentation are equal in size.

6.2.1 The ideal Vickers indenter is a highly polished, pointed, square-based pyramidal diamond with face angles of $136^\circ 0'$. The effect that geometrical variations of these angles have on the measured values of Vickers hardness are discussed in Section 10.

6.2.2 The four faces of the Vickers indenter shall be equally inclined to the axis of the indenter (within $\pm 30'$) and shall meet at a sharp point. The line of junction between opposite faces (offset) shall be not more than 0.5 μm in length as shown in Fig. 2.

6.3 *Knoop Indenter*—The Knoop indenter does not produce a geometrically similar indentation as a function of test force. Consequently, the Knoop hardness will vary with test force. Due to its rhombic shape, the indentation depth is shallower for a Knoop indentation compared to a Vickers indentation under identical test conditions. The two diagonals of a Knoop indentation are markedly different. Ideally, the long diagonal is 7.114 times longer than the short diagonal, but this ratio is influenced by elastic recovery. Thus, the Knoop indenter is very useful for evaluating hardness gradients or thin coatings.

6.3.1 The Knoop indenter is a highly polished, pointed, rhombic-based, pyramidal diamond. The ideal included longitudinal edge angles are $172^\circ 30'$ and $130^\circ 0'$. The ideal indenter constant, c_p , is 0.07028. The effect that geometrical variations of these angles have on the measured values of Knoop hardness are discussed in Section 10.

6.3.2 The four faces of the Knoop indenter shall be equally inclined to the axis of the indenter (within $\pm 30'$) and shall meet at a sharp point. The line of junction between opposite faces (offset) shall be not more than 1.0 μm in length for indentations greater than 20 μm in length, as shown in Fig. 1. For shorter indentations the offset should be proportionately less.

6.3.3 Indenters should be examined periodically and replaced if they become worn, dulled, chipped, cracked or separated from the mounting material.

6.4 *Measuring Equipment*—The test machine's measuring device should report the diagonal lengths in 0.1 μm increments for indentations with diagonals from 1 to 200 μm .

NOTE 5—This is the reported length and not the resolution of the system used for performing the measurements. As an example, if a length of 200 μm corresponds to 300 filar units or pixels, the corresponding calibration constant would be $200/300 = 0.66666667$. This value would be used to compute diagonal lengths, but the reported length would only be reported to the nearest 0.1 μm .

6.4.1 The optical portion of the measuring device should have Köhler illumination (see Appendix X1).

6.4.2 To obtain maximum resolution, the measuring microscope should have adjustable illumination intensity, adjustable alignment and aperture and field diaphragms.

6.4.3 Magnifications should be provided so that the diagonal can be enlarged to greater than 25 % but less than 75 % of the field width.

7. Test Specimen

7.1 For optimum accuracy of measurement, the test should be performed on a flat specimen with a polished or otherwise suitably prepared surface. The surface must be free of any defects that could affect the indentation or the subsequent measurement of the diagonals. Conducting tests on non-planar surfaces is not recommended. Results will be affected even in the case of the Knoop test where the radius of curvature is in the direction of the short diagonal.

7.1.1 In all tests, the indentation perimeter, and the indentation tips in particular, must be clearly defined in the microscope field of view.

7.1.2 The specimen surface should not be etched before making an indentation. Etched surfaces can obscure the edge of the indentation, making an accurate measurement of the size of the indentation difficult. However, when determining the microindentation hardness of an isolated phase or constituent, a light etch can be used to delineate the object of interest. The quality of the required surface finish can vary with the forces and magnifications used in microindentation hardness testing. The lighter the force and the smaller the indentation size, the more critical is the surface preparation. Some materials are more sensitive to preparation-induced damage than others.

7.1.3 Due to the small size of the indentations, special precautions must be taken during specimen preparation. It is well known that improper polishing can alter test results. Specimen preparation must remove any damage introduced during these steps, either due to excessive heating or cold work, for example.

7.1.4 Specimen preparation should be performed in accordance with Methods E 3.

7.2 In some instances, it is necessary to mount the specimen for convenience in preparation. When mounting is required, the specimen must be adequately supported by the mounting medium so that the specimen does not move during force application, that is, avoid the use of polymeric mounting compounds that creep under the indenter force.

8. Procedure

8.1 Turn on the illumination system and power for the tester.

8.2 Select the desired indenter. Refer to the manufacturer's instruction manual if it is necessary to change indenters. Occasionally clean the indenter with a cotton swab and alcohol. Avoid creating static charges during cleaning.

8.3 Place the specimen on the stage or in the stage clamps, so that the specimen surface is perpendicular to the indenter axis.

8.4 Focus the measuring microscope with a low power objective so that the specimen surface can be observed.

8.5 Adjust the light intensity and adjust the apertures for optimum resolution and contrast.

8.6 Select the area desired for hardness determination.

Before applying the force, make a final focus using the measuring objective or the highest magnification objective available.

8.7 Adjust the tester so that the indenter is in the proper place for force application. Select the desired force.

8.8 Activate the tester so that the indenter is automatically lowered and makes contact with the specimen for the normally required time period. Then, remove the force either manually or automatically.

8.9 After the force is removed, switch to the measuring mode, and select the proper objective lens. Focus the image, adjust the light intensity if necessary, and adjust the apertures for maximum resolution and contrast.

8.10 Examine the indentation for its position relative to the desired location and for its symmetry.

8.10.1 If the indentation did not occur at the desired spot, the tester is out of alignment. Consult the manufacturer's instruction manual for the proper procedure to produce alignment. Make another indentation and recheck the indentation location. Readjust and repeat as necessary.

8.10.2 For a Knoop indentation, if one half of the long diagonal is greater than 10 % longer than the other, or if both ends of the indentation are not in sharp focus, the test specimen surface may not be perpendicular to the indenter axis. Check the specimen alignment and make another test.

8.10.3 For a Vickers indentation, if one half of either diagonal is more than 5 % longer than the other half of that diagonal, or if the four corners of the indentation are not in sharp focus, the test surface may not be perpendicular to the indenter axis. Check the specimen alignment and make another test.

8.10.4 If the diagonal legs are unequal as described in 8.10.2 or 8.10.3, rotate the specimen 90° and make another indentation in an untested region. If the nonsymmetrical aspect of the indentations has rotated 90°, then the specimen surface is not perpendicular to the indenter axis. If the nonsymmetrical nature of the indentation remains in the same orientation, check the indenter for misalignment or damage.

8.10.5 Some materials may have nonsymmetrical indentations even if the indenter and the specimen surface are perfectly aligned. Tests on single crystals or on textured materials may produce such results. When this occurs, check the alignment using a test specimen, such as a standard, known to produce uniformly shaped indentations.

8.10.6 Brittle materials such as ceramics may crack as a result of being indented. Specific details for testing ceramics are contained in Test Methods C 1326 and C 1327.

8.11 Measure the long diagonal of a Knoop indentation, or both diagonals of a Vickers indentation, in accordance with the manufacturer's instruction manual.

8.11.1 Determine the length of the long diagonal of a Knoop indentation or both diagonals of a Vickers indentation to within 0.1 μm (see 6.3). For the Vickers indentations, average the two diagonal length measurements.

8.12 Compute the Knoop or Vickers hardness number using the appropriate equation in Section 3 or Table X5.1 or Table X5.2, respectively. Table X5.1 and Table X5.2 show the Knoop or Vickers hardness for indentations with diagonal lengths

from 1 to 200.9 μm using 1 gf. If the force was not 1 gf, multiply the value from Table X5.1 or Table X5.2 by the actual gram-force value to obtain the correct hardness number.

8.13 Generally, more than one indentation is made on a test specimen. Ensure that the spacing between indentations is large enough so that adjacent tests do not interfere with each other. The minimum recommended spacing between tests is illustrated in Fig. 3.

9. Report

9.1 Report the following information:

9.1.1 The test results, the number of tests, and, where appropriate, the mean and standard deviation of the tests,

9.1.2 Test force,

9.1.3 Magnification, and

9.1.4 Any unusual conditions encountered during the test.

9.2 The symbols HK for Knoop hardness, and HV for Vickers hardness, shall be used with the reported numerical values.

9.2.1 The preferred method of reporting microindentation hardness test results in accordance with this standard is for the system of units consisting of force expressed as gram force. For example, if the Knoop hardness was 400 using a 100 gf force, it would be expressed as 400 HK 100 gf. For nonstandard dwell times, other than 10 to 15 s, the hardness would be reported as 400 HK 100 gf/22 s. In this case, 22 s would be the actual time of load application.

9.2.2 Alternative methods of denoting the microindentation hardness values can include 400 HK 0.1 in accordance with ISO for forces expressed in kilogram force, and 3.92 GPa for the SI system of units.

10. Precision and Bias ⁶

10.1 The precision and bias of microindentation hardness measurements depend on strict adherence to the stated test procedure and are influenced by instrumental and material factors and indentation measurement errors.

10.2 The consistency of agreement for repeated tests on the same material is dependent on the homogeneity of the material, reproducibility of the hardness tester, and consistent, careful measurement of the indents by a competent operator.

10.3 Instrumental factors that can affect test results include: accuracy of loading; inertia effects; speed of loading; vibrations; the angle of indentation; lateral movement of the indenter or specimen; indentation and indenter shape deviations.

10.3.1 Vibrations during indenting will produce larger indentations with the influence of vibrations becoming larger as the force decreases (**1**, **2**).⁷

10.3.2 The angle between the indenter and specimen surface should be within 2° of perpendicular. Greater amounts of tilting produce nonuniform indentations and invalid test results.

10.4 Material factors that can affect test results include: specimen homogeneity, orientation or texture effects; improper

⁶ Supporting data have been filed at ASTM Headquarters. Request RR:E-04-1004.

⁷ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

ANEXO B-4
NORMA ASTM E 407

TABLE 2 *Continued*

Etchant	Composition	Procedure
5	5 g HBF ₄ 200 mL water	Electrolytic: Use Al, Pb, or stainless steel cathode. Anodize 1–3 min, 20–45 V d-c. At 30 V, etch for 1 min.
6	25 mL HNO ₃ 75 mL water	Immerse 40 s at 70°C (160°F). Rinse in cold water.
7	10–20 mL H ₂ SO ₄ 80 mL water	Immerse 30 s at 70°C (160°F). Rinse in cold water.
8	10 mL H ₃ PO ₄ 90 mL water	(a) Immerse 1–3 min at 50°C (120°F). (b) Electrolytic at 1–8 V for 5–10 s.
9	3–4 9 sulfamic acid 5 drops HF 100 mL water	Use just prior to the last polishing operation. It is not intended as a final etchant. The specimen is examined as polished under polarized light.
10	10 mL HF 90 mL methanol (90 %)	Immerse 10–30 s.
11	2 mL HF 100 mL water	Immerse or swab few seconds to a minute.
12	20 mL HNO ₃ 60 mL HCl	Use hood. Do not store. Immerse or swab 5–60 s.
13	10 g oxalic acid 100 mL water	Electrolytic at 6 V: (a) 10–15 s. (b) 1 min. (c) 2–3 s. Use stainless steel cathode and platinum or Nichrome connection to specimen.
14	10 mL HNO ₃ 90 mL methanol (95 %)	Immerse few seconds to a minute.
15	15 mL HNO ₃ 15 mL acetic acid 60 mL HCl 15 mL water	Age before use. Immerse 5–30 s. May be used electrolytically.
16	5–10 mL HCl 100 mL water	Electrolytic at 3 V for 2–10 s.
17	5 mL HCl 10 g FeCl ₃ 100 mL water	Electrolytic at 6 V for few seconds.
18	2–10 g CrO ₃ 100 mL water	Electrolytic at 3 V for 2–10 s.
19	A 8 g NaOH 100 mL water B Saturated aqueous solution of KMnO ₄	Immerse in freshly mixed Solutions A + B (1:1) for 5–10 s. If surface activation is necessary, first use Etch #18, then rinse in water. While still wet, immerse in Solutions A + B (1:1). Mixture of solutions A + B has 15-min useful life.
20	5 mL H ₂ O ₂ (30 %) 100 mL HCl	Use hood. <i>Mix fresh</i> . Immerse polished face up for few seconds.
21	1 g CrO ₃ 140 mL HCl	Use hood. To mix, add the HCl to CrO ₃ . Electrolytic at 3 V for 2–10 s.
22	100 mL HCl 0.5 mL H ₂ O ₂ (30 %)	Use hood. Do not store. (a) Immerse or swab ½–3 min. Add H ₂ O ₂ dropwise to maintain action. (b) Electrolytic, 4 V, 3–5 s.
23	5 mL HCl 95 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Electrolytic at 6 V for 10–20 s.
24	5 mL HNO ₃ 200 mL HCl 65 g FeCl ₃	Use hood. Immerse few seconds.
25	10 g CuSO ₄ 50 mL HCl 50 mL water	Immerse or swab 5–60 s. Made more active by adding few drops of H ₂ SO ₄ just before use.

TABLE 2 *Continued*

Etchant	Composition	Procedure
60	25 mL HNO ₃ 15 mL acetic acid 15 mL HF 5–7 drops bromine	Use hood. Let stand ½ h before using. Swab 3–20 s.
61	60 mL HCl 40 mL HNO ₃	Use hood. Immerse few seconds to a minute.
62	1–5 g CrO ₃ 100 mL HCl	Vary composition of reagent and aging of reagent after mixing to suit alloy. Swab or immerse few seconds to a minute.
63	0.1 g CrO ₃ 10 mL HNO ₃ 100 mL HCl	Swab few seconds to a minute.
64	5 mL HNO ₃ 25 mL HCl 30 mL water	(a) Immerse 1–5 min. (b) Use hot. Will form chloride film on gold alloys if much silver is present. Ammonia will remove film.
65	A 10 g ammonium persulfate 100 mL water B 10 g KCN 100 mL water	Use hood—Can give off extremely poisonous hydrogen cyanide. Precaution—Also poisonous by ingestion as well as contact. Mix 1 + 1 mixture of Solutions A and B just before use. (A mixture of 5 drops of each will cover the surface of a 1 in. dia. mount.) Immerse ½ – 2 min.
66	30 mL HF 15 mL HNO ₃ 30 mL HCl	Swab 3–10 s or immerse to 2 min.
67	10 mL perchloric acid 10 mL 2-butoxyethanol 70 mL ethanol (95 %) 10 mL water	Precaution—Keep cool when mixing and use. Electrolytic at 30–65 V for 10–60 s.
68	3 mL perchloric acid 35 mL 2-butoxyethanol 60 mL methanol (absolute)	Precaution—Keep cool when mixing and use. Electrolytic at 60–150 V for 5–30 s.
69	5 mL perchloric acid 80 mL acetic acid	Precaution—Keep cool when mixing and use. Electrolytic at 20–60 V for 1–5 min.
70	5 mL HF 2 mL AgNO ₃ (5 %) 200 mL water	Swab for 5–60 s.
71	5 mL HF 95 mL water	Add 5–10 drops of this solution on the final polishing wheel which has been charged with the polishing solution. The specimen is polished on this wheel until the surface turns black. Distilled water is then slowly added to the wheel and polishing continued until the surface is bright. At this time the specimen should be ready for examination via polarized light. Note—Use inert substance between cloth and wheel to prevent attack of the wheel. Wear gloves.
72	10 mL HF 45 mL HNO ₃ 45 mL water	Swab for 5–20 s.
73	20 mL HCl 25 g NaCl 65 mL water	Electrolytic etch—use carbon cathode and platinum wire connection to specimen. (a) 6 V ac for 1 min. (b) 5 V–20 V ac for 1–2 min. (c) 20 V ac for 1–2 min. For etch-polishing, use shorter times. After etching, water rinse, alcohol rinse, and dry.
74	1–5 mL HNO ₃ 100 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Etching rate is increased, sensitivity decreased with increased percentage of HNO ₃ . (a) Immerse few seconds to a minute. (b) Immerse 5–40 s in 5 % HNO ₃ solution. To remove stain, immerse 25 s in 10 % HCl-methanol solution. (c) For Inconels and Nimonics, use 5 mL HNO ₃ solution—electrolytic at 5–10 V for 5–20 s. (d) Swab or immerse several minutes. (e) Swab 5–60 s. HNO ₃ may be increased to 30 mL in methanol only depending on alloy. (Ethanol is unstable with over 5 % HNO ₃ .) Do not store.
75	5 g picric acid 8 g CuCl ₂ 20 mL HCl 200 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Immerse 1–2 s at a time and immediately rinse with methanol. Repeat as often as necessary. (Long immersion times will result in copper deposition on surface.)

ANEXO C
HOJA DE SEGURIDAD
EKABOR® 2

Material Safety Data Sheet BorTec GmbH & Co. KG

8101209 EKABOR 2

<p>3.22 Special Fire Fighting Procedures</p> <p>3.23 Unusual Fire and Explosion Hazards</p>	<p>Fire fighters should wear full protective clothing including a self-contained breathing apparatus. Material may form toxic and corrosive gases in case of fire.</p>
Section 4 – Physical Hazards	
<p>4.1 Stability</p> <p style="padding-left: 20px;">Avoid temperatures below</p> <p style="padding-left: 20px;">Avoid temperatures above</p> <p style="padding-left: 20px;">Conditions to Avoid</p> <p>4.2 Incompatibility</p> <p>4.3 Hazardous Decomposition Products</p> <p>4.4 Hazardous Polymerisation</p> <p style="padding-left: 20px;">Conditions to Avoid</p>	<p>Stable at ambient temperatures and atmospheric pressure. The partial decomposition above 500 deg C is in accordance with use.</p> <p>Unknown</p> <p>Unknown</p> <p>Heat</p> <p>Strong acids</p> <p>At elevated temperatures: hydrogen fluoride and boron trifluoride. During boronizing process waste gases have to be exhaust.</p> <p>Will not occur.</p> <p>None</p>
Section 5 – Health Hazards	
<p>5.1 Technical Limit Value</p> <p>5.2 Toxicological Data</p> <p style="padding-left: 20px;">LD50 (oral)</p> <p style="padding-left: 20px;">LD50 (dermal)</p> <p style="padding-left: 20px;">LC50 (inhalative)</p> <p style="padding-left: 20px;">Eye Irritation</p> <p style="padding-left: 20px;">Skin Irritation</p> <p style="padding-left: 20px;">Sensitation</p> <p style="padding-left: 20px;">Mutagenicity</p> <p>5.3 Acute Overexposure</p> <p style="padding-left: 20px;">Route of Entry or Possible Contact</p> <p style="padding-left: 20px;">Eye Contact</p> <p style="padding-left: 20px;">Skin Contact</p> <p style="padding-left: 20px;">Inhalation</p> <p style="padding-left: 20px;">Ingestion</p> <p style="padding-left: 20px;">Additional Information</p> <p>5.4 Chronic Overexposure</p> <p>5.5 Aggravated Medical Conditions</p> <p>5.6 Carcinogenicity</p> <p style="padding-left: 20px;">National Toxicology Program</p> <p style="padding-left: 20px;">I.A.R.C. Monographs</p> <p style="padding-left: 20px;">OSHA</p> <p>5.7 OSHA Permissible Exposure Limit</p> <p>5.8 ACGIH Treshold Limit Value</p> <p>Other Exposure Limits</p>	<p>10 mg/m³ (PNOC-total dust) and See Section 2 – Hazardous Ingredients.</p> <p>Toxicological testing has not been conducted with this material.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>n.d.</p> <p>eyes, skin.</p> <p>May cause irritation.</p> <p>May cause irritation.</p> <p>No toxic effects are expected. In case of dust formation: May cause respiratory tract irritation.</p> <p>Not expected in industrial use.</p> <p>None</p> <p>None known.</p> <p>In case of dust formation: A long term exposure exceeding TLV can lead to damaging effect as a result of mechanical overloading of the respiratory tract.</p> <p>There are no data available which address signs and symptoms of exposure or medical conditions that are generally recognized as being aggravated by exposure to this material.</p> <p>None known.</p> <p>No</p> <p>No</p> <p>No</p> <p>15 mg/m³ (total dust) and See Section 2 – Hazardous Ingredients.</p> <p>10 mg/m³ (total dust) and See Section 2 – Hazardous Ingredients.</p> <p>German TLV: 6 mg/m³ (fine dust)</p>
<p>n.a. = not applicable n.d. = not determined n.e. = not established n.r. = not requested</p>	

Material Safety Data Sheet BorTec GmbH & Co. KG

8101209 EKABOR 2

<p>5.9 Emergency and First Aid Procedures</p> <p style="padding-left: 20px;">Eyes</p> <p style="padding-left: 20px;">Skin</p> <p style="padding-left: 20px;">Inhalation</p> <p style="padding-left: 20px;">Ingestion</p>	<p>If contact with eyes, immediately flush eyes with plenty of water. Get medical attention if irritation occurs.</p> <p>If contact with skin, wash skin with plenty of water or with water and soap. Apply hand lotion.</p> <p>In case of dust/aerosol formation: If inhaled, remove to fresh air. Get medical attention immediately.</p> <p>If swallowed, give victim several glasses of water. If swallowed, induce vomiting immediately as directed by medical personnel. Get medical attention immediately. Designate the product.</p>
--	---

Section 6 – Special Protection Information

<p>6.1 Industrial Hygiene</p> <p>6.2 Respiratory Protection</p> <p style="padding-left: 20px;">Ventilation</p> <p style="padding-left: 40px;">Local Exhaust</p> <p style="padding-left: 40px;">Mechanical (general)</p> <p style="padding-left: 40px;">Mechanical (special)</p> <p style="padding-left: 40px;">Mechanical (other)</p> <p>6.3 Protective Gloves</p> <p>6.4 Eye Protection</p> <p>6.5 Other Protective Clothing or Equipment</p> <p>6.6 Further information for system design and engineering measures:</p>	<p>Follow standard industrial hygiene practices when using this material.</p> <p>In case of dust formation: unconditional necessary. In case of long or strong exposure use a NIOSH approved respirator for: fine dust. Alternatively use a positive-pressure, air supplied respirator (regard TLV). Use only with adequate ventilation.</p> <p>Recommended (to maintain concentration below TLV)</p> <p>Yes</p> <p>n.r.</p> <p>n.r.</p> <p>rubber gloves</p> <p>In case of dust formation: chemical safety goggles.</p> <p>To avoid contact with skin. Barrier cream may be used to prevent dryness of skin.</p> <p>During application (boronizing process) the waste gases have to be exhaust.</p>
---	---

Section 7 – Special Precautions and Spill/Leak Procedures

<p>7.1 Handling and Storage</p> <p>7.2 Other Precautions</p> <p>7.3 Released or Spilled material</p> <p>7.4 Waste Disposal Methods</p>	<p>Avoid formation of dust. Avoid breathing dust/vapor/mist/gas/aerosol. Store in tightly closed container. Use only with adequate ventilation. Consider the formation of hydrogen fluoride at application! Remove contaminated clothing and shoes. Do not get into sewerage or soil.</p> <p>Avoid contact with eyes, skin or clothing. Wash thoroughly after handling.</p> <p>Avoid formation of dust. Take up by mechanical means. Place in an appropriate chemical waste container. Keep container tightly closed. Regard all local, State and Federal laws and regulations concerned with disposal, spill, clean up, removal or discharge. Dispose.</p> <p>Treat according to local, State and Federal regulations. Suitable waste disposal procedure: deposition (after consolidation).</p>
--	--

n.a. = not applicable	n.d. = not determined	n.e. = not established	n.r. = not requested
------------------------------	------------------------------	-------------------------------	-----------------------------

Material Safety Data Sheet BorTec GmbH & Co. KG

8101209 EKABOR 2

Section 8 – US Regulatory Information	
8.1	General All ingredients are listed on the TSCA Inventory.
8.2	State Substance Lists Entries
	Massachusetts Substance List:
	- Silicon carbide
	New Jersey Right To Know Hazardous Substance List:
	- Silicon carbide
	Pennsylvania Hazardous Substance List:
	- Silicon carbide

Section 9 – Transportation Information	
9.1 SEA / IMDG Class Packing Group EMS MFRAG UN-No. Proper Shipping Name Technical Name Special Instructions	None
9.2 AIR IATA / ICAO Class Subsidiary Risk Packing Group UN-No. Proper Shipping Name Technical Name Special Instructions	None
9.3 USA Domestic Hazard Class Packing Group UN-No. Proper Shipping Name Technical Name ERG Page No. Special Instructions	None
9.4 European Rail / Road GGVS / GGVE Class GGVS / GGVE Item ADR / RID Class ADR / RID Item Special Instructions	None

n.a. = not applicable n.d. = not determined n.e. = not established n.r. = not requested

Material Safety Data Sheet BorTec GmbH & Co. KG

8101209 EKABOR 2

Section A – Additional Information
None

This information relates to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process. Such information is to the best of our knowledge and belief accurate and reliable as of the date compile. However, no representation, warranty or guarentee, expressed or implied, is made as to its accuracy, reliability or completeness. It is the user`s responsibility to satisfy himself as to the suitability and completeness of such information for his own particular use. We do not accept liability for any loss or damage that may occur from the use of this information. Nothing herein shall be construed as a recommendation for uses which infringe valid patents or as extending a licence valid patents.

n.a. = not applicable n.d. = not determined n.e. = not established n.r. = not requested

ANEXO D
SUGERENCIA
BORONIZADO

SELECTED STEELS FOR BORONIZING						
STEELS AISI	EQUIVALENT BOEHLER	DESCRIPTION	SUGGESTED APLICATIONS	COMPOSITION	layer thickness	Temperature/time
AISI 1018	E920	Low carbón steel (general use)	...	C 0.18% Si 0.25% Mn 0.70%	55µm 80µm 120µm	850°C/ 2h 900°C/ 2h 900°C/ 4h
AISI 316L	A200	Austenitic Stainless Steel	...	C 0.03% máx Si 0.50% Mn 1.40% Cr 17% Mo 2.20% Ni 11.50%	20 µm	850°C/ 5h higher temperature is not recommendet! (longer time is possible)
AISI 4140	V320	Tempered Steel	...	C 0.41% Si 0.30% Mn 0.70% Cr 1.10% Mo 0.20%	40 µm 60 µm 75 µm	900°C /1h 900°C/ 3h 920°C/ 3h
AISI D3	K100	Ledeburitic steel 12% Cr	Punch and Dies, others?	C 2.00% Si 0.25% Mn 0.35% Cr 11.5%	40µm 65µm	850°C/ 8h 920°C/5h
Ni-Resist	-	Cast Iron	Diffusers and Impellers for submersible pumps – oil&gas industry	TBD	42µm	830°C/ 5h higher temperature is not recommendet! (longer time is possible)

ANEXO E
HOJA DE SEGURIDAD GAS
ARGÓN

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL (MSDS)

ARGÓN COMPRIMIDO

Nota : Las especificaciones contenidas en esta hoja de seguridad aplican también para argón prepurificado, argón alta pureza, argón ultra alta pureza.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del producto : Argón

Familia química : Gas inerte

Nombre químico : Argón

Fórmula : Ar

Sinónimos : No aplica

Usos : Soldadura de aluminio y titánico por proceso MIG y TIG; soldadura y corte por arco de plasma; soldadura y corte en ambiente inerte; soldadura eléctrica con protección gaseosa; fabricación de lámparas incandescente Y fluorescentes; suavizador/pasivos del acero en hornos siderúrgicos. Actúa como gas protector para evitar efectos oxidantes (shield gas); en la fabricación del acero la adición del argón reduce las pérdidas de cromo, no alterando el contenido final de carbono.

Fabricante :

AGA S.A.

Quito: Av. Pedro Vicente Maldonado 10499

Tel.: 1 800 242 427; 02 2673 011; 04 2101 060 las 24 horas los 365 días del año.

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Argón	99.9995%	07440-37-1	TLV : Gas asfixiante simple

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Resumen de emergencia

Líquido comprimido sin olor, incoloro e insípido. Puede ocasionar asfixia inmediata. El personal de rescate debe emplear equipo autónomo de respiración.

Efectos potenciales para la salud

Inhalación : Asfixiante simple. El Argón no es tóxico pero puede causar asfixia al desplazar el oxígeno del aire. Exposición a una atmósfera deficiente de oxígeno (<19.5%) puede causar mareo, náusea, vómito, salivación excesiva, disminución de agudeza mental, pérdida de conocimiento y muerte. Exposición a atmósferas que contienen el 10% o menos de oxígeno, pueden causar pérdida del conocimiento sin dar aviso, lesiones graves o muerte.

Contacto con la piel : No causa daños en la piel.

Contacto con los ojos : No es irritante para los ojos.

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Personas expuestas a altas concentraciones argón, deben ser llevadas al aire libre.

Si no está respirando, administrar respiración artificial como resucitación cardio-pulmonar y/o oxígeno suplemental. Si tiene dificultad al respirar, administrar oxígeno. Prestar asistencia médica inmediatamente.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Punto de inflamación : No aplica

Temperatura de auto ignición : No aplica

Limites de Inflamabilidad

Inferior (LEL): No aplica **Superior (UEL):** No aplica

Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.

Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: No aplica

Riesgo general

Cuando los cilindros se exponen a intenso calor o llamas, se pueden vaciar o romper violentamente. Algunos de cilindros están diseñados para evacuar el contenido al ser expuestos a altas temperaturas. La presión en el cilindro puede aumentar debido al calentamiento y pueden romperse si los dispositivos de presión llegan a fallar.

Medios de extinción

El Argón no es inflamable y no acelera la combustión. Usar extinguidores apropiados para incendios.

Instrucciones para combatir incendios

El Argón es un asfixiante simple. Si es posible, remover los cilindros de Argón del incendio o enfriarlos con agua desde un lugar seguro. No rociar agua directamente en el orificio del cilindro. Aparatos autónomos de respiración pueden ser requeridos para el personal de rescate. Evacuar la zona de peligro.

Si un camión que transporta cilindros está involucrado en un incendio, AISLE un área de 800 metros (1/2 milla) a la redonda.

Equipo contra incendios

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo con un aparato de respiración autosuficiente y protección personal completa, a prueba de fuego.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL

En caso de escape evacuar a todo el personal de la zona afectada (hacia un lugar contrario a la dirección del viento). Aísle un área de 25 a 50 metros a la redonda. Si es posible y si no hay riesgo, localice y selle la fuente del escape antes de entrar al área. Permita que el gas, el cual es más pesado que el aire se disipe. Monitoree los alrededores para el nivel de oxígeno. La atmósfera debe tener por lo menos 19.5 % de oxígeno antes de dejar al personal dentro del área sin un aparato de respiración autosuficiente. Si la fuga está en el cilindro o en la válvula, ponerse en contacto con el distribuidor.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes de uso: Mueva los cilindros utilizando carro porta cilindros o montacargas. No los haga rodar, ni los arrastre en posición horizontal. Evite que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro, o contra otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados, como por

ejemplo el baúl de un carro, camioneta o van. Para descargarlos del camión use rodillo de caucho.

Durante su uso: No use adaptadores, herramientas que generen chispas, ni caliente el cilindro

para aumentar el grado de descarga del producto. Use válvula de contención o un acumulador en la línea de descarga para prevenir contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión, al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de presión baja (<200 bar - 3000 psig). Jamás descargue el contenido del cilindro hacia ninguna persona, equipo, fuente de ignición, material incompatible, o a la atmósfera. No use aceites o grasas en los ajustadores o en el equipo de manejo de gas. Inspeccione el sistema para escapes usando agua y jabón. No intente encajar objetos como alicates, destornilladores, palancas, etc, en la válvula, ya que puede dañarla, causando un escape. Si el usuario experimenta alguna dificultad en el funcionamiento de la válvula del cilindro discontinuar el uso y llamar al fabricante. No ponga el cilindro como parte de un circuito eléctrico.

Después de uso: Cierre la válvula principal del cilindro. Cierre firmemente las válvulas. Marque los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula. No deben ser reutilizados cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego. En estos casos notifique al proveedor, para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de los cilindros

Almacene los cilindros en posición vertical. Separe los cilindros vacíos de los llenos. Para esto use el sistema de inventario que "el primero en llegar, primero en salir", para prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo periodo. Use solo envases y equipo (tubería, válvulas, conectores, etc.) diseñado para almacenar argón. Los cilindros pueden ser almacenados al descubierto, pero en tal caso, deben ser protegidos contra la intemperie y humedad para prevenir moho.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada, con el fin de evitar el paso de personal no autorizado, que puedan manipular de forma incorrecta el producto. Almacene lejos de áreas con mucho tráfico; de salidas de emergencia; áreas de procesamiento y producción; alejado de ascensores, salidas de edificio, cuartos, y de pasillos principales que lleven a salidas. El área debe ser protegida, con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos, como corte o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permita que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54 °C (130 °F), ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalice el área con letreros que indiquen "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO", "NO FUMAR". y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Proporcionar ventilación natural o mecánica, para asegurarse de prevenir atmósferas deficientes en oxígeno abajo del 19.5%.

Protección respiratoria

Usar equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire, de presión directa si el nivel de oxígeno está por debajo del 19.5%. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que estos estén libres de aceite y grasa; gafas de seguridad y botas con puntera de acero.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad de gas a 0 °C (32 °F), 1 atm: 1.650 kg/m³ (0.103 lbs/ft³)
Punto de ebullición a 1 atm: -185.9 °C (-302 °F)
Punto de congelación / fusión a 1 atm: -189.2 °C (-308.9 °F)
Peso específico de liquido a -80°C (-112°F): 1.38
pH: No aplica.
Peso específico (aire = 1) a 0°C (32°F) : 0.906
Peso molecular: 39.95
Solubilidad en agua vol/vol a 0°C (32°F) y 1 atm: 0.056
Grado de expansión: No aplica.
Grado de evaporación (nBuAc = 1): No aplica.
Olor umbral: No tiene olor.
Volumen específico del gas a 21.1°C (70°F) 1 atm: 9.7 ft³/lb
Presión de vapor a 21.1°C (70°F): No aplica
Coefficiente de distribución agua / aceite: No aplica.
Apariencia y color: Gas incoloro, inodoro y sin sabor.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El argón es un gas inerte.

Condiciones a evitar

Cilindros expuestos a temperaturas altas o llamas directas pueden romperse o estallar.

Incompatibilidad

Ninguno gas inerte.

Reactividad

Gas inerte.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

El argón es un asfixiante simple. En humanos se presentan los siguientes síntomas :

Concentración

Síntomas de exposición

12-16% Argón:	Respiración y grados del pulso aumenta, coordinación muscular es ligeramente alterada.
10-14% Argón:	Desajuste emocional, fatiga anormal, respiración perturbada.
6-10% Argón:	Nausea y vómito, colapso o pérdida de conocimiento.
Abajo 6%:	Movimientos convulsivos, colapso de la respiración es posible y muerte.

Efectos por inhalación a corto plazo

Ratas machos fueron expuestos por 6 días a 20% de oxígeno y 80% de argón a 1 atmósfera y presión ambiental. No hubo ningún cambio significativo en el conteo de células rojas o médula espinal. Otros estudios en animales pruebas fueron referentes a la deficiencia de oxígeno o los

efectos narcóticos a varias presiones de argón, los efectos de aumento de presión de argón en el sistema nervioso central y aeroembolismo.

Capacidad irritante del material: Producto no irritante.

Sensitización a materiales: El producto no causa sensitización en humanos.

Efectos al sistema reproductivo

Habilidad mutable: No aplicable

Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para argón.

Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para argón.

Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para argón.

Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para argón.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

No se espera ningún efecto ecológico. El argón no contiene ningún químico Clase I o Clase II que reduzca el ozono. No se anticipa ningún efecto en la vida de las plantas, a excepción de la escarcha producida en la presencia de gases expandiéndose velozmente. El argón no causa daño a la vida acuática.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Regrese los cilindros vacíos al fabricante, para que este se encargue de su disposición final de acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental. En caso de emergencia eliminar el gas poco a poco en un área bien ventilada.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Número de Naciones Unidas : UN 2817

Clase de peligro D.O.T : 2.2

Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS NO INFLAMABLE NO TOXICO

Contaminante marino : El producto no está identificado como un contaminante marino por el D.O.T



Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura, en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y deben ser descartados.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos se deben tener en cuenta los requerimientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2-266:2000.

La identificación de cilindros que contienen gases industriales, se encuentra reseñada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 0441:84.

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos :

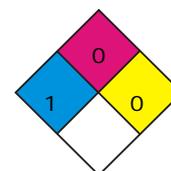
Código NFPA

Salud : 1 "Ligeramente peligroso"

Inflamabilidad : 0 "No arde"

Reactividad : 0 "Estable"

Salida de válvula : CGA 580



Recomendaciones de material : Se puede usar materiales comunes.

ANEXO F
PLANO PIN UMCO

ANEXO G

**REGRESIONES PARA
TRANSFORMACIONES DE
ESCALAS DE DUREZA**

