



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN
NITRURACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA
SERTECPET S.A.**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTORES:

BRYAN PAUL CASANOVA VERA

ALEX JAVIER MUÑOZ DÁVILA

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN
NITRURACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA
SERTECPET S.A.**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTORES: BRYAN PAUL CASANOVA VERA

ALEX JAVIER MUÑOZ DÁVILA

DIRECTOR: Ing. CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Bryan Paul Casanova Vera, Alex Javier Muñoz Dávila

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

Nosotros, BRYAN PAUL CASANOVA VERA Y ALEX JAVIER MUÑOZ DÁVILA declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 09 de febrero de 2023



Bryan Paul Casanova Vera
172386139-7






Alex Javier Muñoz Dávila
180463535-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN NITRUTACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA SERTECPET S.A.**, realizado por los señores: **BRYAN PAUL CASANOVA VERA Y ALEX JAVEIR MUÑOZ DÁVILA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Homero Almendariz Puento PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-02-09
Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-02-09
Ing. Eugenia Mercedes Naranjo Vargas MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2023-02-09

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado principalmente a Dios por haber guiado mis pasos y permitirme lograr cada uno de sus propósitos, así como brindarme la sabiduría en la toma de decisiones; además de su infinita bondad y amor para poder alcanzar mi objetivo. A mi familia, y en especial a mi madre por ser mi ejemplo y mi apoyo incondicional, quien con amor supo orientarme para hacerme una persona de bien. Adicionalmente esta investigación va dedicada a la empresa SERTECPET S.A.; y a las futuras generaciones, para que sea empleada como fuente de posteriores estudios.

Bryan

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme sabiduría; a mis padres y hermanos que han sido mi apoyo fundamental en todo momento, mi guía y mi sustento; a mis amigos y a los docentes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, quienes han compartido su conocimiento a lo largo de la carrera; además a la empresa SERTECPET S.A., misma que a través del Ing. Darío Ramírez nos permitió realizar este trabajo de investigación con enfoque en los aceros que emplea en sus procesos productivos; así como a los técnicos de los laboratorios de Ingeniería de Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y del laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, por permitirnos realizar en estos centros los distintos ensayos de las probetas.

A los ingenieros Carlos Oswaldo Serrano Aguiar y Eugenia Mercedes Naranjo Vargas, quienes con esfuerzo y dedicación nos guiaron en la realización de este proyecto de investigación.

Javier

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xviii
RESUMEN.....	xix
SUMMARY.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Limitaciones y delimitaciones.....	2
<i>1.2.1. Limitaciones.....</i>	<i>2</i>
<i>1.2.2. Delimitaciones.....</i>	<i>3</i>
1.3. Problema General de Investigación.....	3
1.4. Problemas específicos de investigación.....	3
1.5. Objetivos.....	3
<i>1.5.1. Objetivo General.....</i>	<i>3</i>
<i>1.5.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>4</i>
1.6. Justificación.....	4
<i>1.6.1. Justificación Teórica.....</i>	<i>4</i>
<i>1.6.2. Justificación Metodológica.....</i>	<i>4</i>
<i>1.6.3. Justificación Práctica.....</i>	<i>5</i>
1.7. Hipótesis.....	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de investigación.....	6
2.2. Referencias Teóricas.....	8
<i>2.2.1. Acero.....</i>	<i>8</i>
<i>2.2.2. Acero 4340.....</i>	<i>8</i>
<i>2.2.2.1. Aplicaciones del Acero AISI 4340.....</i>	<i>9</i>

2.2.2.2.	<i>Propiedades mecánicas del Acero AISI 4340</i>	9
2.2.2.3.	<i>Composición química del Acero AISI 4340</i>	9
2.2.3.	<i>Acero 34CrNiMo6</i>	9
2.2.3.1.	<i>Propiedades mecánicas del Acero 34CrNiMo6</i>	10
2.2.3.2.	<i>Composición química del Acero 34CrNiMo6</i>	10
2.2.4.	<i>Tratamiento termoquímico</i>	10
2.2.4.1.	<i>Cementación</i>	11
2.2.4.2.	<i>Nitruración</i>	12
2.2.4.3.	<i>Cianuración</i>	14
2.2.4.4.	<i>Carbonitruración</i>	14
2.2.4.5.	<i>Sulfurización</i>	15
2.2.4.6.	<i>Boruración</i>	15
2.2.5.	<i>Tracción</i>	16
2.2.5.1.	<i>Propiedades para determinar</i>	17
2.2.5.2.	<i>Diagrama Esfuerzo – Deformación</i>	18
2.2.6.	<i>Dureza</i>	19
2.2.7.	<i>Impacto</i>	19
2.2.8.	<i>Metalografía</i>	20

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	21
3.1.	Enfoque de investigación	21
3.2.	Nivel de Investigación	21
3.3.	Diseño de investigación	21
3.3.1.	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i>	21
3.3.1.1.	<i>Experimental</i>	21
3.3.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	22
3.3.2.1.	<i>Transversal</i>	22
3.3.2.2.	<i>Longitudinal</i>	22
3.4.	Tipo de estudio	22
3.4.1.	<i>Estudio documental</i>	22
3.4.2.	<i>Estudio de campo</i>	22
3.5.	Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra	23
3.5.1.	<i>Población</i>	23
3.5.2.	<i>Muestra</i>	23

3.6.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	24
3.6.1.	Método	24
3.6.2.	Técnicas e instrumentos de investigación	25
3.6.2.1.	<i>Espectrometría</i>	25
3.6.2.2.	<i>Metalografía</i>	27
3.6.2.3.	<i>Inclusiones no metálicas</i>	36
3.6.2.4.	<i>Dureza Rockwell C</i>	42
3.6.2.5.	<i>Micro Dureza Vickers</i>	45
3.6.2.6.	<i>Impacto</i>	49
3.6.2.7.	<i>Tracción</i>	52
3.6.2.8.	<i>Análisis estadístico Anova</i>	55

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	62
4.1.	Espectrometría	62
4.1.1.	<i>Espectrometría del acero AISI 4340</i>	62
4.1.2.	<i>Espectrometría del acero 34CrNiMo6</i>	63
4.2.	Metalografía	63
4.2.1.	<i>Metalografía del Acero AISI 4340</i>	64
4.2.2.	<i>Metalografía del acero 34CrNiMo6</i>	65
4.3.	Inclusiones no metálicas	67
4.3.1.	<i>Inclusiones no metálicas del acero AISI 4340</i>	67
4.3.2.	<i>Inclusiones no metálicas del acero 34CrNiMo6</i>	74
4.4.	Dureza Rockwell C	91
4.4.1.	<i>Hipótesis</i>	91
4.4.2.	<i>Contrastes</i>	92
4.4.3.	<i>Efectos de los factores A y B, así como su interacción</i>	92
4.4.4.	<i>Análisis de varianza</i>	93
4.4.4.1.	<i>Suma de Cuadrados</i>	93
4.4.4.2.	<i>Grados de Libertad</i>	93
4.4.4.3.	<i>Cuadrados medios</i>	93
4.4.4.4.	<i>Efectos Estandarizados</i>	94
4.4.4.5.	<i>Efecto de referencia</i>	94
4.4.4.6.	<i>Fisher Calculado</i>	94
4.4.4.7.	<i>Fisher tabulado</i>	95

4.4.4.8.	<i>Tabla Anova</i>	95
4.4.4.9.	<i>Coefficiente de determinación (R²)</i>	95
4.4.5.	<i>LSD Gráfico</i>	95
4.5.	Micro Dureza Vickers	97
4.5.1.	<i>Variación de dureza en el acero AISI 4340 Nitrurado</i>	97
4.5.2.	<i>Variación de dureza en el acero 34CrNiMo6 Nitrurado</i>	98
4.6.	Tenacidad	99
4.6.1.	<i>Hipótesis</i>	99
4.6.2.	<i>Contrastes</i>	100
4.6.3.	<i>Efectos de los factores A y B, así como su interacción</i>	100
4.6.4.	<i>Análisis de varianza</i>	101
4.6.4.1.	<i>Suma de Cuadrados</i>	101
4.6.4.2.	<i>Grados de Libertad</i>	101
4.6.4.3.	<i>Cuadrados medios</i>	102
4.6.4.4.	<i>Efectos Estandarizados</i>	102
4.6.4.5.	<i>Efecto de referencia</i>	102
4.6.4.6.	<i>Fisher Calculado</i>	103
4.6.4.7.	<i>Fisher tabulado</i>	103
4.6.4.8.	<i>Tabla Anova</i>	103
4.6.4.9.	<i>Coefficiente de determinación (R²)</i>	103
4.6.5.	<i>LSD Gráfico</i>	104
4.7.	Esfuerzo de Fluencia	105
4.7.1.	<i>Hipótesis</i>	105
4.7.2.	<i>Contrastes</i>	106
4.7.3.	<i>Efectos de los factores A y B, así como su interacción</i>	106
4.7.4.	<i>Análisis de varianza</i>	107
4.7.4.1.	<i>Suma de Cuadrados</i>	107
4.7.4.2.	<i>Grados de Libertad</i>	107
4.7.4.3.	<i>Cuadrados medios</i>	108
4.7.4.4.	<i>Efectos Estandarizados</i>	108
4.7.4.5.	<i>Efecto de referencia</i>	108
4.7.4.6.	<i>Fisher Calculado</i>	109
4.7.4.7.	<i>Fisher tabulado</i>	109
4.7.4.8.	<i>Tabla Anova</i>	109
4.7.4.9.	<i>Coefficiente de determinación (R²)</i>	109
4.7.5.	<i>LSD Gráfico</i>	110

4.8.	Esfuerzo último	111
4.8.1.	Hipótesis	111
4.8.2.	Contrastes	112
4.8.3.	Efectos de los factores A y B, así como su interacción	112
4.8.4.	Análisis de varianza	113
4.8.4.1.	Suma de Cuadrados	113
4.8.4.2.	Grados de Libertad	113
4.8.4.3.	Cuadrados medios.....	114
4.8.4.4.	Efectos Estandarizados	114
4.8.4.5.	Efecto de referencia	114
4.8.4.6.	Fisher Calculado.....	115
4.8.4.7.	Fisher tabulado	115
4.8.4.8.	Tabla Anova	115
4.8.4.9.	Coefficiente de determinación (R^2)	115
4.8.5.	LSD Gráfico	116
4.9.	Elongación	117
4.9.1.	Hipótesis	117
4.9.2.	Contrastes	118
4.9.3.	Efectos de los factores A y B, así como su interacción	118
4.9.4.	Análisis de varianza	119
4.9.4.1.	Suma de Cuadrados	119
4.9.4.2.	Grados de Libertad	119
4.9.4.3.	Cuadrados medios.....	120
4.9.4.4.	Efecto Estandarizado	120
4.9.4.5.	Efecto de referencia	120
4.9.4.6.	Fisher Calculado.....	121
4.9.4.7.	Fisher tabulado	121
4.9.4.8.	Tabla Anova	121
4.9.4.7.	Coefficiente de determinación (R^2)	121
4.9.5.	LSD Gráfico	121
4.10.	Propiedades mecánicas de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6	123
4.10.1.	Propiedades mecánicas del acero AISI 4340	123
4.10.2.	Propiedades mecánicas del acero 34CrNiMo6	124
4.11.	Análisis de resultados	125
CONCLUSIONES		126

RECOMENDACIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Propiedades mecánicas del Acero AISI 4340.....	9
Tabla 2-2:	Composición química del Acero AISI 4340.....	9
Tabla 3-2:	Propiedades mecánicas del acero 34CrNiMo6.....	10
Tabla 4-2:	Composición química del acero 34CrNiMo6.....	10
Tabla 5-2:	Dimensiones para las probetas de tracción.....	17
Tabla 6-2:	Tipos de ensayos de dureza.....	19
Tabla 7-2:	Medidas estandarizadas para ensayo de impacto.....	20
Tabla 1-3:	Tipos de ensayos.....	24
Tabla 2-3:	Normativa ASTM aplicada en la investigación.....	24
Tabla 3-3:	Características del espectrómetro.....	27
Tabla 4-3:	Características de la cortadora de cinta.....	30
Tabla 5-3:	Características de la máquina pulidora.....	32
Tabla 6-3:	Características de la secadora.....	34
Tabla 7-3:	Dimensiones para el microscopio <i>Nikon Eclipse E200</i>	35
Tabla 8-3:	Escala en Word.....	35
Tabla 9-3:	Características del microscopio óptico.....	36
Tabla 10-3:	Valores mínimos de severidad.....	41
Tabla 11-3:	Parámetros de ancho y diámetros para inclusiones.....	41
Tabla 12-3:	Características del durómetro.....	45
Tabla 13-3:	Características del durómetro Vickers.....	48
Tabla 14-3:	Conversión de Dureza.....	48
Tabla 15-3:	Características del Péndulo Charpy.....	52
Tabla 16-3:	Características de la máquina universal.....	55
Tabla 17-3:	Factores y niveles de estudio para el análisis ANOVA.....	56
Tabla 18-3:	Datos para el análisis Anova.....	56
Tabla 19-3:	Nomenclatura Yates.....	57
Tabla 20-3:	Valores de Fisher para un nivel de confianza del 95 %.....	60
Tabla 1-4:	Composición química del acero AISI 4340.....	62
Tabla 2-4:	Composición química del acero 34CrNiMo6.....	63
Tabla 3-4:	Inclusiones no metálicas del acero AISI 4340.....	68
Tabla 4-4:	Inclusiones no metálicas del acero 34CrNiMo6.....	75
Tabla 5-4:	Resultados del Ensayo de Dureza Rockwell C.....	91
Tabla 6-4:	Nomenclatura de Yates para Dureza Rockwell C.....	91

Tabla 7-4:	Contrastes para análisis de dureza Rockwell C	92
Tabla 8-4:	Efectos para análisis de dureza Rockwell C	92
Tabla 9-4:	Suma de cuadrados para análisis de dureza Rockwell C	93
Tabla 10-4:	Grados de libertad para análisis de dureza Rockwell C	93
Tabla 11-4:	Cuadrados medios para análisis de dureza Rockwell C	93
Tabla 12-4:	Efectos estandarizados dureza Rockwell C	94
Tabla 13-4:	Fisher Calculado para análisis de dureza Rockwell C	94
Tabla 14-4:	Análisis Anova del ensayo de dureza Rockwell C	95
Tabla 15-4:	Datos para el método gráfico LSD	95
Tabla 16-4:	Micro Dureza en el AISI 4340 Nitruado	97
Tabla 17-4:	Micro Dureza en el 34CrNiMo6 Nitruado	98
Tabla 18-4:	Resultados de tenacidad	99
Tabla 19-4:	Nomenclatura de Yates para tenacidad	100
Tabla 20-4:	Contrastes para análisis de tenacidad	100
Tabla 21-4:	Efectos para análisis de tenacidad	100
Tabla 22-4:	Suma de cuadrados para análisis de tenacidad	101
Tabla 23-4:	Grados de libertad para análisis de tenacidad.....	101
Tabla 24-4:	Cuadrados medios para análisis de tenacidad.....	102
Tabla 25-4:	Efectos estandarizados de la tenacidad.....	102
Tabla 26-4:	Fisher calculado para análisis de tenacidad	103
Tabla 27-4:	Análisis Anova de tenacidad	103
Tabla 28-4:	Datos para el método gráfico LSD	104
Tabla 29-4:	Esfuerzo de fluencia obtenido del ensayo de tracción.....	105
Tabla 30-4:	Nomenclatura de Yates para el esfuerzo de fluencia.....	106
Tabla 31-4:	Contrastes para análisis de esfuerzo de fluencia	106
Tabla 32-4:	Efectos para análisis de esfuerzo de fluencia	106
Tabla 33-4:	Suma de cuadrados para análisis de esfuerzo de fluencia	107
Tabla 34-4:	Grados de libertad para análisis de esfuerzo de fluencia.....	107
Tabla 35-4:	Cuadrados medios para análisis de esfuerzo de fluencia.....	108
Tabla 36-4:	Efectos estandarizados del esfuerzo de fluencia.....	108
Tabla 37-4:	Fisher calculado para análisis de tenacidad	109
Tabla 38-4:	Análisis Anova del esfuerzo de fluencia	109
Tabla 39-4:	Datos para el método gráfico LSD	110
Tabla 40-4:	Esfuerzo último obtenido del ensayo de tracción	111
Tabla 41-4:	Nomenclatura de Yates para el esfuerzo último	112
Tabla 42-4:	Contrastes para análisis de esfuerzo último.....	112

Tabla 43-4:	Efectos para análisis de esfuerzo último.....	112
Tabla 44-4:	Suma de cuadrados para análisis de esfuerzo último.....	113
Tabla 45-4:	Grados de libertad para análisis de esfuerzo último	113
Tabla 46-4:	Cuadrados medios para análisis de esfuerzo último	114
Tabla 47-4:	Efectos estandarizados del esfuerzo último.....	114
Tabla 48-4:	Fisher calculado para análisis de esfuerzo último	115
Tabla 49-4:	Análisis Anova del esfuerzo último.....	115
Tabla 50-4:	Datos para el método gráfico LSD	116
Tabla 51-4:	Elongación obtenida del ensayo de tracción.....	117
Tabla 52-4:	Nomenclatura de Yates para el porcentaje de elongación	118
Tabla 53-4:	Contrastes para análisis del porcentaje de elongación.....	118
Tabla 54-4:	Efectos para análisis del porcentaje de elongación.....	118
Tabla 55-4:	Suma de cuadrados para análisis del porcentaje de elongación	119
Tabla 56-4:	Grados de libertad para análisis del porcentaje de elongación	119
Tabla 57-4:	Cuadrados medios para análisis del porcentaje de elongación	120
Tabla 58-4:	Efectos estandarizados de la elongación	120
Tabla 59-4:	Fisher calculado para análisis del porcentaje de elongación	121
Tabla 60-4:	Análisis Anova del porcentaje de elongación.....	121
Tabla 61-4:	Datos para el método gráfico LSD	122
Tabla 62-4:	Propiedades mecánicas del acero AISI 4340 con y sin nitruración.....	123
Tabla 63-4:	Propiedades mecánicas del acero 34CrNiMo6 con y sin nitruración	124
Tabla 64-4:	Cuadro resumen de resultados.....	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Tratamiento termoquímico.....	11
Ilustración 2-2:	Nitruración líquida.....	13
Ilustración 3-2:	Nitruración iónica.....	13
Ilustración 4-2:	Cianuración.....	14
Ilustración 5-2:	Carbonitruración.....	15
Ilustración 6-2:	Diagrama Esfuerzo - Deformación (Esquemático).....	18
Ilustración 1-3:	Metodología de la investigación.....	25
Ilustración 2-3:	Procedimiento para espectrometría.....	26
Ilustración 3-3:	Procedimiento del ensayo de metalografía.....	28
Ilustración 4-3:	Probeta para ensayo metalográfico.....	29
Ilustración 5-3:	Proceso de Desbaste.....	31
Ilustración 6-3:	Banco Portalijas.....	31
Ilustración 7-3:	Alúmina.....	32
Ilustración 8-3:	Proceso de Pulido.....	32
Ilustración 9-3:	Ataque químico con Nital al 2%.....	33
Ilustración 10-3:	Probeta atacada químicamente.....	33
Ilustración 11-3:	Dimensionamiento de fotografías.....	34
Ilustración 12-3:	Escala de fotografías.....	35
Ilustración 13-3:	Procedimiento para análisis de inclusiones no metálicas.....	37
Ilustración 14-3:	Probeta para inclusiones no metálicas.....	38
Ilustración 15-3:	Recorrido para la observación de Inclusiones no metálicas.....	39
Ilustración 16-3:	Inclusión Tipo A.....	39
Ilustración 17-3:	Inclusión Tipo B.....	40
Ilustración 18-3:	Inclusión Tipo C.....	40
Ilustración 19-3:	Inclusión Tipo D.....	40
Ilustración 20-3:	Escala de fotografía para análisis de inclusiones.....	42
Ilustración 21-3:	Procedimiento para ensayo de dureza Rockwell C.....	43
Ilustración 22-3:	Distancia entre huellas de indentador.....	44
Ilustración 23-3:	Procedimiento para ensayo de micro dureza Vickers.....	46
Ilustración 24-3:	Distancia entre huellas de indentador.....	47
Ilustración 25-3:	Probeta para ensayo de Impacto.....	49
Ilustración 26-3:	Procedimiento para ensayo de Impacto.....	50
Ilustración 27-3:	Probeta para ensayo de tracción.....	52

Ilustración 28-3:	Procedimiento para ensayo de tracción.....	53
Ilustración 29-3:	LSD Gráfico.....	61
Ilustración 1-4:	Composición química del acero AISI 4340	62
Ilustración 2-4:	Composición química del acero 34CrNiMo6	63
Ilustración 3-4:	Microestructura del acero AISI 4340, lente objetivo 10x.....	64
Ilustración 4-4:	Microestructura del acero AISI 4340, lente objetivo 40x.....	64
Ilustración 5-4:	Microestructura del acero AISI 4340.....	65
Ilustración 6-4:	Microestructura del acero 34CrNiMo6, lente objetivo 10X.	65
Ilustración 7-4:	Microestructura del acero 34CrNiMo6, lente objetivo 40X.	66
Ilustración 8-4:	Microestructura con predominancia de martensita.	66
Ilustración 9-4:	Microestructura del acero 34CrNiMo6.....	67
Ilustración 10-4:	Fotomicrografía 1 del acero AISI 4340	68
Ilustración 11-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 5.....	69
Ilustración 12-4:	Fotomicrografía 2 del acero AISI 4340	69
Ilustración 13-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 5.....	70
Ilustración 14-4:	Fotomicrografía 3 del acero AISI 4340	70
Ilustración 15-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 2,5.....	71
Ilustración 16-4:	Fotomicrografía 4 del acero AISI 4340	71
Ilustración 17-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 5.....	72
Ilustración 18-4:	Fotomicrografía 5 del acero AISI 4340	72
Ilustración 19-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 5.....	73
Ilustración 20-4:	Fotomicrografía 6 del acero AISI 4340	73
Ilustración 21-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 4.....	74
Ilustración 22-4:	Fotomicrografía 1 del acero 34CrNiMo6	76
Ilustración 23-4:	Inclusión no metálica tipo A, severidad 0,5.....	76
Ilustración 24-4:	Inclusión no metálica tipo B, severidad 1	77
Ilustración 25-4:	Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5.....	77
Ilustración 26-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 4.....	78
Ilustración 27-4:	Fotomicrografía 2 del acero 34CrNiMo6	78
Ilustración 28-4:	Inclusión no metálica tipo A, severidad 0,5.....	79
Ilustración 29-4:	Inclusión no metálica tipo B, severidad 1	79
Ilustración 30-4:	Inclusión no metálica tipo C, severidad 2	80
Ilustración 31-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 3.....	80
Ilustración 32-4:	Fotomicrografía 3 del acero 34CrNiMo6	81
Ilustración 33-4:	Inclusión no metálica tipo A, severidad 0,5.....	81
Ilustración 34-4:	Inclusión no metálica tipo B, severidad 1	82

Ilustración 35-4:	Inclusión no metálica tipo C, severidad 1	82
Ilustración 36-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 3.....	83
Ilustración 37-4:	Fotomicrografía 4 del acero 34CrNiMo6	83
Ilustración 38-4:	Inclusión no metálica tipo A, severidad 1.....	84
Ilustración 39-4:	Inclusión no metálica tipo B, severidad 0,5.....	84
Ilustración 40-4:	Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5.....	85
Ilustración 41-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 4.....	85
Ilustración 42-4:	Fotomicrografía 5 del acero 34CrNiMo6	86
Ilustración 43-4:	Inclusión no metálica tipo A, severidad 1.....	86
Ilustración 44-4:	Inclusión no metálica tipo B, severidad 1	87
Ilustración 45-4:	Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5	87
Ilustración 46-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 3.....	88
Ilustración 47-4:	Fotomicrografía 6 del acero 34CrNiMo6	88
Ilustración 48-4:	Inclusión no metálica tipo A, severidad 1.....	89
Ilustración 49-4:	Inclusión no metálica tipo B, severidad 1	89
Ilustración 50-4:	Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5	90
Ilustración 51-4:	Inclusión no metálica tipo D, severidad 4.....	90
Ilustración 52-4:	Efecto de los factores sobre la dureza.....	92
Ilustración 53-4:	Efecto estandarizado de los factores sobre la dureza.....	94
Ilustración 54-4:	Análisis gráfico de la dureza de los aceros con y sin nitruración	96
Ilustración 55-4:	Micro Dureza Vickers en el acero AISI 4340 Nitrurado	97
Ilustración 56-4:	Dureza Rockwell C en el acero AISI 4340 Nitrurado	97
Ilustración 57-4:	Micro Dureza Vickers en el acero 34CrNiMo6 Nitrurado	98
Ilustración 58-4:	Dureza Rockwell C en el acero 34CrNiMo6 Nitrurado.....	99
Ilustración 59-4:	Efecto de los factores sobre la tenacidad	101
Ilustración 60-4:	Efecto estandarizado de los factores sobre la tenacidad	102
Ilustración 61-4:	Análisis gráfico de la tenacidad de los aceros con y sin nitruración.....	104
Ilustración 62-4:	Efecto de los factores sobre el esfuerzo de fluencia	107
Ilustración 63-4:	Efecto estandarizado de los factores sobre el esfuerzo de fluencia	108
Ilustración 64-4:	Esfuerzo de fluencia en los aceros con y sin nitruración	110
Ilustración 65-4:	Efecto de los factores sobre el esfuerzo último.....	113
Ilustración 66-4:	Efecto estandarizado de los factores sobre el esfuerzo último.....	114
Ilustración 67-4:	Esfuerzo último de los aceros con y sin nitruración	116
Ilustración 68-4:	Efecto de los factores sobre el porcentaje de elongación.....	119
Ilustración 69-4:	Efecto estandarizado de los factores sobre la elongación	120
Ilustración 70-4:	Elongación de los aceros con y sin nitruración.....	122

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** REPORTE DE ESPECTROMETRÍA DEL ACERO AISI 4340
- ANEXO B:** REPORTE DE ESPECTROMETRÍA DEL ACERO 34CRNiMo6
- ANEXO C:** PLANO DE PROBETA PARA ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL
- ANEXO D:** PLANO DE PROBETA PARA ENSAYO DE IMPACTO
- ANEXO E:** PLANO DE PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN
- ANEXO F:** METALOGRAFÍA DEL ACERO AISI 4340
- ANEXO G:** METALOGRAFÍA DEL ACERO 34CrNiMo6
- ANEXO H:** ANÁLISIS DE INCLUSIONES
- ANEXO I:** REPORTE DE ENSAYO DE IMPACTO (SIN NITRURACIÓN)
- ANEXO J:** REPORTE DE ENSAYO DE IMPACTO (CON NITRURACIÓN)
- ANEXO K:** REPORTE DE ENSAYO DE TRACCIÓN (SIN NITRURACIÓN)
- ANEXO L:** REPORTE DE ENSAYO DE TRACCIÓN (CON NITRURACIÓN)
- ANEXO M:** ESFUERZO vs DEFORMACIÓN (ACERO AISI 4340 SIN NITRURACIÓN)
- ANEXO N:** ESFUERZO vs DEFORMACIÓN (ACERO AISI 4340 CON NITRURACIÓN)
- ANEXO O:** ESFUERZO vs DEFORMACIÓN (ACERO 34CRNiMo6 SIN NITRURACIÓN)
- ANEXO P:** ESFUERZO vs DEFORMACIÓN (ACERO 34CRNiMo6 NITRURADO)

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue caracterizar metalográficamente y evaluar las propiedades mecánicas de los aceros con y sin nitruración AISI 4340 y 34CrNiMo6, para lo cual se obtuvieron probetas de dichos materiales mediante el proceso de mecanizado, en lo referente a la evaluación de las propiedades mecánicas se realizó el análisis estadístico respectivo. Se analizó la composición química de ambos aceros mediante el análisis de espectrometría óptica; posteriormente se llevó a cabo el análisis de inclusiones no metálicas, se determinó el tipo, el grado, así como la serie de las inclusiones y se efectuó la comparación de la morfología de estas con la morfología descrita en la norma ASTM E45-11. A continuación se realizó el estudio metalográfico de estos aceros, se observó y comparó las fotomicrografías con ayuda del libro *Metals Handbook* logrando determinar los microconstituyentes de cada acero. Para determinar las propiedades mecánicas de estos aceros se efectuó los ensayos de dureza Rockwell, impacto y tracción empleando la normativa ASTM (E18-15, E23-18 y A370-21, respectivamente). Para el análisis estadístico se utilizó el diseño experimento 2² logrando como resultado una diferencia significativa de las propiedades mecánicas de los aceros antes de la aplicación del tratamiento de nitruración, el acero AISI 4340 resulta ventajoso en cuanto a tenacidad, esfuerzo de fluencia, así como en esfuerzo último de tracción; en contraste, el acero 34CrNiMo6 presenta ventajas en cuanto a dureza y elongación. Adicionalmente luego de la aplicación de la nitruración no se observó diferencia significativa entre estas propiedades mecánicas. Se concluye que la aplicación del tratamiento de nitruración en estos aceros equipara sus propiedades mecánicas, haciendo posible la intercambiabilidad dentro de procesos productivos. Se recomienda ampliar parámetros de evaluación a fin de aumentar el grado de investigación en este trabajo de titulación.

Palabras clave: <ACERO> <ESPECTROMETRÍA> <METALOGRAFÍA> <PROPIEDADES MECÁNICAS> <ENSAYOS DE DUREZA>.

0363-DBRA-UPT-2023



SUMMARY

The aim of this study was to characterize metallographically and evaluate the mechanical properties of steels with and without nitriding AISI 4340 and 34CrNiMo6, for which specimens of these materials were obtained through the machining process, in relation to the evaluation of the mechanical properties the respective statistical analysis was performed. On the one hand, the chemical composition of both steels was analyzed by optical spectrometry analysis. On the other hand, the analysis of non-metallic inclusions was carried out, where the type, degree and series of inclusions were determined, as well as the comparison of the morphology with those described in ASTM E45-11. Then, a metallographic study of these steels was then carried out, where the photomicrographs were observed and compared with the help of the *Metals Handbook*, and the microconstituents of each steel were determined. In order to determine the mechanical properties of these steels, Rockwell hardness, impact and tensile tests were carried out using ASTM standards (E18-15, E23-18 and A370-21, respectively). For the statistical analysis, the design experiment 2² was used, resulting in a significant difference in the mechanical properties of the steels before the application of the nitriding treatment. Thus, AISI 4340 steel is advantageous in regard to toughness, creep stress, as well as ultimate tractive effort. In contrast, 34CrNiMo6 steel has advantages in terms of hardness and elongation. Additionally, no significant difference was observed between these mechanical properties after the application of nitriding. It is concluded that the application of nitriding treatment in these steels associates their mechanical properties, making interchangeability possible within production processes. It is recommended to expand evaluation parameters in order to increase the degree of research in this degree work.

Keywords: <STEEL> <SPECTROMETRY> <METALOGRAPHY> <MECHANICAL PROPERTIES> <HARDNESS TESTS>.



Lic. Angela Cecibel Moreno Novillo
0602603938

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial tanto en Ecuador como en el resto del mundo ha orientado a que los ingenieros busquen nuevas alternativas de mejora de las propiedades de materiales ya existentes a fin de optimizar el uso de recursos, de aquí, la importancia de conocer las propiedades mecánicas que brinda un material. En la actualidad se han implementado diversas técnicas y métodos a fin de mejorar los materiales permitiendo que estos puedan emplearse bajo condiciones más exigentes, reduciendo el uso innecesario de herramientas, máquinas y otros equipos que incrementen el costo de reparación o que genere alguna demora durante el trabajo. Estos materiales deben presentar buenas propiedades mecánicas como la resistencia, dureza, tenacidad y otras, que conlleve a tener un ciclo de vida adecuado del equipo, máquina, herramienta fabricados con dichos elementos.

Esta investigación plantea analizar la influencia del tratamiento termoquímico de nitruración por sales en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6, que son materiales de alta aplicabilidad dentro de la industria petrolífera, esto permitirá conocer cómo varían las propiedades mecánicas antes y después de la aplicación del tratamiento. Para cumplir con el objetivo de la investigación se parte de obtener probetas para los diferentes ensayos, a fin de evaluar la incidencia de la nitruración en las propiedades mecánicas de ambos materiales.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La empresa SERTECPET S.A., es una entidad que ofrece varios servicios principalmente en el área petrolera, en sus actividades más importantes se destaca el uso de herramientas especiales, las cuales necesitan cumplir condiciones específicas para su correcto funcionamiento, en la actualidad la empresa fabrica estas herramientas con aceros aleados.

El departamento de calidad de la empresa presenta dudas sobre la aplicación del proceso de nitruración a los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6, debido al desconocimiento que tiene acerca de la incidencia de este tratamiento en las propiedades mecánicas y en la constitución micrográfica de estos aceros; es por ello, que se pretende realizar ensayos destructivos, tales como, ensayos de tracción e impacto, así como un ensayo de dureza, a fin de determinar las propiedades mecánicas de los aceros, las mismas que posteriormente se analizarán mediante un modelo estadístico 2^2 ; a su vez se ha de efectuar un ensayo metalográfico para conocer la constitución micrográfica de cada acero.

1.2. Limitaciones y delimitaciones

1.2.1. Limitaciones

- Entre las limitaciones que se observa en la ejecución de la presente investigación se tienen los tiempos tanto para la mecanización, así como para la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración.
- Otra limitación fue encontrar un laboratorio con equipos en buenas condiciones de operatividad y que a su vez cuenten con certificados de calibración.
- Limitación económica, puesto a que fue necesario enviar a mecanizar las probetas, además, se viajó a la Escuela Superior Politécnica Nacional con el fin de realizar los ensayos destructivos de tracción, así como el de impacto.

1.2.2. Delimitaciones

Los ensayos destructivos de tracción, así como el de impacto del presente proyecto de investigación se realizará en la Escuela Superior Politécnica Nacional, misma que cuenta con laboratorios y equipos certificados permitiendo de esta manera obtener datos con alto grado de precisión, para determinar el esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y elongación; por otro parte, los ensayos de dureza superficial y la caracterización metalográfica de este proyecto se efectuarán en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, misma que cuenta con laboratorios y equipos para tal efecto en la Facultad de Mecánica. En cada ensayo se desarrollará un análisis comparativo de las propiedades para ambos aceros antes y después de la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración por sales; para tal efecto, la empresa SERTECPET S.A, coordina la nitruración de las probetas con la empresa *Voestalpine-Bohler*.

1.3. Problema General de Investigación

¿Existe similitud en las características metalográficas y propiedades mecánicas de los aceros con y sin nitruración AISI 4340 y 34 CrNiMo6, empleados por la empresa SERTECPET S.A?, en el año 2022?

1.4. Problemas específicos de investigación

- ¿Cuántas probetas se utilizarán para hacer los ensayos de tracción, tenacidad, dureza y caracterización metalográfica?
- ¿Cómo se elaborarán las probetas para la ejecución de los diferentes tipos de ensayos?
- ¿Qué normativa se empleará como guía en la realización de los ensayos de tracción, tenacidad y caracterización metalográfica?
- ¿Con que fin se van a efectuar los ensayos para la empresa SERTECPET S.A?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Caracterizar metalográficamente y evaluar las propiedades mecánicas de los aceros con y sin nitruración AISI 4340 y 34CrNiMo6, para la empresa SERTECPET S.A.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar el número de probetas para ensayos de tracción, tenacidad, dureza y caracterización metalográfica, dimensionar según ASTM y modelar en SolidWorks Académico.
- Obtener probetas mediante mecanización, con y sin nitruración de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 para ensayos de tracción, tenacidad, dureza y caracterización metalográfica.
- Realizar el ensayo de tracción, tenacidad, dureza y caracterización metalográfica en equipos debidamente calibrados y bajo normativa ASTM.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos en los ensayos destructivos y no destructivos de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 mediante el modelo estadístico 2^2 .

1.6. Justificación

El presente tema de trabajo de titulación es de suma importancia en el ámbito científico, debido a que las industrias que utilizan aceros aleados como principal materia prima para la mecanización de herramientas que serán sometidas a condiciones específicas de funcionamiento, presentan desconocimiento y dudas al momento de aplicar tratamientos termoquímicos a los aceros aleados tales como los AISI 4340 y 34 CrNiMo6 que garanticen una mejora de las propiedades mecánicas de los mismos y a su vez permitan cumplir con los requerimientos de las condiciones a las cuales las herramientas y piezas estarán sometidas.

1.6.1. Justificación Teórica

Desde el enfoque teórico, se analizará los conceptos relacionados con metalografía, dureza, tenacidad y demás términos asociados a los ensayos realizados, mismos que permitan ampliar los conocimientos en el área de la ingeniería de materiales

1.6.2. Justificación Metodológica

En esta investigación se pretende aplicar la normativa ASTM para evaluar las propiedades mecánicas de dichos aceros obtenidas antes y después de la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración, verificando que los valores obtenidos en los ensayos se encuentren dentro de las especificaciones establecidas en catálogos, y a su vez conocer la incidencia de la nitruración en la constitución micrográfica de estos aceros mediante un ensayo metalográfico y

así determinar si ambos aceros son óptimos para la elaboración de herramientas y piezas sometidas a grandes cargas dentro de la industria petrolífera.

1.6.3. Justificación Práctica

Desde el punto de vista práctico, la importancia del proyecto radica en que se pretende elaborar ensayos en laboratorios certificados para tomar datos de las propiedades mecánicas, así como de sus constituyentes micrográficos cuyos resultados permitirán corroborar o contrastar la hipótesis de que las propiedades mecánicas y los constituyentes micrográficos de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 son semejantes antes y después de la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración.

1.7. Hipótesis

Las propiedades mecánicas de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 son semejantes antes y después de la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Según Cholango y Zapata (2020: pp.1-6) en su tema de titulación “Determinar la resistencia a la tracción y dureza del acero AISI/SAE 4340, tratado térmicamente por temple a 860 °C y revenido a 280 °C, 320 °C Y 380°C” determinan el comportamiento del acero AISI 4340 tratado térmicamente con temple a 800 °C y revenido a tres diferentes temperaturas 280 °C, 320 °C y 380 °C, comparando la resistencia a la tracción y dureza de forma experimental. Aquel proyecto inicia mencionando los tratamientos térmicos utilizados y métodos de enfriamiento existentes, los cuales asignan características mecánicas al material de acuerdo con cada temperatura utilizada. Así mismo especifica las propiedades y composición química del acero AISI 4340 en estado de suministro según catálogos del distribuidor. Como segunda etapa se tiene una descripción de los procedimientos que se van a llevar a cabo y bajo que normativas se van a realizar tanto las pruebas de tracción, así como la prueba de dureza, siendo estas la ASTM E8 para tracción y la ASTM E10 para el ensayo de dureza. Además, se especifican la espectrometría óptica de las muestras, elección de variables, y el diseño de probetas correspondientes para cada ensayo. Luego se analiza los resultados obtenidos a partir de los ensayos destructivos y no destructivos con el fin de comparar valores y obtener el material más adecuado. A continuación, se aplica un análisis de varianza multifactorial ANOVA, la cual permite conocer la influencia de la temperatura y del método de enfriamiento sobre sus propiedades mecánicas. Finalmente, mediante los resultados obtenidos se determina que temperatura de revenido es la más adecuada para la caracterización de dureza del acero.

De acuerdo con Ñauta y Riera (2015: pp.1-9) en su tema de investigación “Caracterización de Propiedades Mecánicas de los Aceros para Construcción de Maquinaria que se comercializa en el Ecuador” caracterizan experimentalmente los aceros de construcción de maquinaria de mayor demanda, analizar los resultados de los ensayos destructivos y desarrollar una guía para la selección de los aceros. El trabajo en mención arranca con el análisis de los aceros más utilizados en la industria y las propiedades relativas aquellos que se consideran en el diseño; mediante recolección de información primaria, tales como encuestas dirigidas hacia las principales empresas que desarrollan este trabajo en el país. Además, describen los procedimientos, equipos e instrumentos necesarios para la realización de ensayos destructivos en función de las propiedades que se desean conocer; estos ensayos se llevan a cabo bajo la normativa ASTM. A continuación, se determinan las propiedades de los aceros, tales como, esfuerzo elástico a la

tracción, esfuerzo de fluencia, porcentaje mínimo de alargamiento, entre otras, todas en unidades del Sistema Internacional, basándose además en relaciones fundamentales de la mecánica de materiales para la obtención de diversas propiedades. Finalmente, todos estos datos han sido documentados en una guía de selección de aceros, con el propósito de brindar la información y una tabla comparativa concernientes a las propiedades de los aceros más usados en la industria ecuatoriana.

García (2018: pp.1-7) en su trabajo de titulación “Determinación de propiedades mecánicas de materiales comerciales” se centra en la caracterización de los siguientes aceros: acero al carbono F-1, acero bonificado 34CrNiMo6 y el acero inoxidable 316 L, mediante ensayos de dureza, y ensayos de tracción; el ensayo de dureza se realiza bajo la escala Vickers. Este estudio se realizó sin aplicación de ningún tratamiento a la superficie de las muestras de los aceros mencionados anteriormente y los resultados obtenidos se comparan con los valores establecidos en el catálogo de IMS.

Conforme a Guzmán (2015: pp.1-11) en su investigación “Fractura en aceros de alta resistencia: mecanismos de agrietamiento y auto afinidad en superficies de fractura” realizado para la Universidad Autónoma de Nueva León. En esta investigación se efectúa la caracterización metalográfica del acero AISI 4340 una vez que a este se les ha sometido a los tratamientos de temple y revenido. Además, se hace un estudio de fractografía a las probetas tanto de los ensayos de tracción, así como a las de los ensayos de impacto Charpy.

En correspondencia con Cabrera (2017: pp.10-15) en su estudio “Propuesta de un material alternativo para la construcción de la barra estabilizadora delantera de la suspensión. Caso de estudio Chevrolet Aveo Family 1,5l” se realizan ensayos de dureza y espectrometría para los aceros AISI 5160, AISI 4140, AISI 4337 y AISI 4340. El ensayo de dureza se realizó aplicando la normativa -18. Además de estos ensayos se realizan los siguientes análisis: análisis estático y análisis a la fatiga, con el fin de determinar cuál de los aceros mencionados es óptimo para la construcción de la barra estabilizadora delantera de la suspensión de un vehículo Chevrolet Aveo Family 1,5 l.

En concordancia con Torres y Ojeda (2010: pp.1-8) en su trabajo “Tratamientos térmicos, pruebas mecánicas y metalográficas de los aceros utilizados en el campo automotor a nivel nacional” se realiza un ensayo comparativo de la dureza de los aceros AISI 4140, AISI 1045, AISI 1018 y AISI 4340 sometidos a un tratamiento de templado en aceite (220°C) y posteriormente a un tratamiento de revenido, en el cual las muestras se preparan empleando como guía la normativa ASTM E-3.

Resumiendo, en cuanto a los antecedentes de esta propuesta de trabajo de integración curricular se observa que las investigaciones se centran en la realización de los siguientes ensayos: tracción, dureza y metalografía al acero AISI 4340 sometido a tratamientos de temple y revenido a diversas temperaturas; en cuanto al acero 34CrNiMo6 se ha realizado un estudio que consiste en un ensayo de tracción y un ensayo de dureza Vickers sin la aplicación de ningún tratamiento superficial; es por ello que la brecha que se plantea cubrir con la presente investigación consiste en caracterizar metalográficamente y evaluar las propiedades mecánicas de los aceros con y sin nitruración AISI 4340 y 34CrNiMo6, contribuyendo así con la empresa SERTECPET S.A. en el estudio de la incidencia del tratamiento de nitruración por sales en las propiedades mecánicas y en la constitución micrográfica de estos aceros.

2.2. Referencias Teóricas

2.2.1. Acero

Se conoce como acero a las combinaciones entre hierro-carbono cuya constitución de carbono oscila entre 0,012 a 2,1%; se puede mejorar las propiedades de este material adicionando elementos tales como cromo, vanadio, níquel, entre otros. (Avner, 1995 p. 229)

El acero tiene amplias utilidades en la industria de la metalurgia, petrolífera, automotriz, entre otros; debido a su versatilidad en sus propiedades mecánicas, gracias a los tratamientos térmicos, termoquímicos y afines que se pueden aplicar en la superficie de este material, mejorando o cambiando las características de este.

2.2.2. Acero 4340

Se define como acero AISI 4340 a la aleación hipoeutectoide constituida con un porcentaje de carbono que oscila entre el 0,38% al 0,43%, además presenta pequeñas porciones de elementos tales como: cromo, níquel, molibdeno, entre otros, lo que ayuda a que este acero obtenga buenas características como: dureza, resistencia a la tensión, resistencia a la fatiga, impacto, así también como el nitrurado, favoreciendo a su aplicación en el campo industrial (Waldun Steel, p.1).

A este material se le debe eliminar en lo posible la presencia de azufre y fósforo puesto que estos constituyentes reducen propiedades mecánicas de estos aceros convirtiéndoles en elementos más

frágiles y no se les podría emplear en actividades que demanden alta exigencia dentro de las diversas industrias. (García et al., 2019: p.2)

2.2.2.1. Aplicaciones del Acero AISI 4340

Las principales utilidades de este acero se encuentran en la fabricación de herramientas y equipos que demandan una elevada dureza además de buena tenacidad, de la misma forma tienen una gran relevancia en las industrias que van desde la automotriz hasta la petrolífera. Por ejemplo, se lo emplea en la construcción de maquinaria pesada, turbinas, ejes rotores, engranajes, piezas de transmisión, etc.

Cabe indicar que luego de aplicación del tratamiento de nitrurado, se expande el campo de aplicación de este material, pues existe una gran variedad de piezas con requerimientos especiales de alta resistencia y plasticidad. (SongShun Steel, 2021a: p.1)

2.2.2.2. Propiedades mecánicas del Acero AISI 4340

Tabla 1-2: Propiedades mecánicas del Acero AISI 4340

Propiedades mecánicas				
Diámetro (mm)	Resistencia Mecánica (MPa)	Punto de Fluencia (MPa)	Elongación % Mín.	Dureza Rockwell B. (HRB)
$d < 16$	1200 – 1400	1000	9	240 – 380
$16 \leq d \leq 40$	1100 – 1300	900	10	240 – 380
$41 \leq d \leq 100$	1000 – 1200	800	11	240 - 380

Fuente: DIPAC, 2021

2.2.2.3. Composición química del Acero AISI 4340

Tabla 2-2: Composición química del Acero AISI 4340

Composición química				
% C	% Si	% Mn	% P	% S
0,38 – 0,43	0,1 – 0,35	0,60 – 0,80	0,04 – 0,30	0,002 – 0,03

Fuente: DIPAC, 2021

2.2.3. Acero 34CrNiMo6

El Acero 34CrNiMo6 es una aleación con alto porcentaje de cromo-níquel-molibdeno, su contenido de carbono oscila entre 0,30% a 0,38%, además de que se encuentran pequeñas

cantidades de fósforo y azufre. Sus características mecánicas hacen de este material óptimo para ser tratado térmicamente permitiendo mejorar su resistencia, así como su ductilidad, igualmente presenta una aceptable templabilidad posibilitando su utilización principalmente en la mecanización de árboles de levas y biela de motores.

2.2.3.1. Propiedades mecánicas del Acero 34CrNiMo6

Tabla 3-2: Propiedades mecánicas del acero 34CrNiMo6

Propiedades mecánicas				
Diámetro (mm)	Resistencia Mecánica(MPa)	Punto de Fluencia (MPa)	Elongación %Mín.	Dureza Brinell.
$d < 250$	> 800	> 600	> 13	> 240
$250 \leq d < 500$	> 750	> 540	> 14	> 225
$500 \leq d \leq 990$	> 700	> 490	> 15	> 213

Fuente: Waldun Steel, 2018

2.2.3.2. Composición química del Acero 34CrNiMo6

Tabla 4-2: Composición química del acero 34CrNiMo6

Composición química							
% C	% Si	% Mn	% P	% S	%Cr	% Mo	% Ni
0,30 – 0,38	≤ 0,40	0,50 – 0,80	≤ 0,025	≤ 0,035	1,30 – 1,70	0,15 – 0,30	1,30 – 1,70

Fuente: Waldun Steel, 2018

2.2.4. Tratamiento termoquímico

Los tratamientos termoquímicos se pueden considerar como una rama perteneciente a los tratamientos térmicos, puesto que el elemento pasa por un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento, sin embargo, estos procesos cambian la estructura superficial de la pieza adicionando una sustancia química en esta.

Estos métodos emplean elementos tales como: carbono, nitrógeno e incluso sulfato tanto en estado líquido como gaseoso, mismos que tienen la finalidad de incrementar la dureza superficial, la resistencia al desgaste, así como la resistencia a la corrosión de las piezas sobre las cuales estos son aplicados.



Ilustración 1-2: Tratamiento termoquímico

Fuente: Tecnología Industrial, 2020

Etapas del Tratamiento Termoquímico

Para la aplicación de los tratamientos termoquímicos, se siguen las siguientes fases:

1. Separación de los elementos al estado atómico; por ejemplo:
 - a) Descomposición del amoníaco para obtener nitrógeno (nitruración gaseosa)
$$2NH_3 \rightarrow 2N + 3H_2$$
 - b) Disociación del monóxido de carbono para obtener carbono (cementación)
$$2CO \rightarrow CO_2 + C$$
2. Adición de estos átomos en la superficie del acero.
3. Difusión de los átomos hacia la estructura interna del material.

Tipos de Tratamientos Termoquímicos

2.2.4.1. Cementación

Se denomina cementación al proceso en el cual el carbono se introduce en la superficie de los aceros que poseen bajas cantidades de este constituyente (0,15 – 0,23%C), mediante el calentamiento de las piezas a una temperatura de aproximadamente 900 °C a fin de elevar la dureza, la resistencia al desgaste y a la fatiga. La baja cantidad de carbono hace que la aleación tenga una dureza máxima de aproximadamente 20 - 35 HRC (dureza Rockwell escala C).

Entre las técnicas de cementación se encuentran la cementación por gas, al vacío, por plasma (iónica), por baño de sal, así como por paquete, estos últimos no son empleados con frecuencia debido al escaso interés comercial; en contraste el método más utilizado es la cementación por gas (propano, butano, monóxido de carbono, entre otros).

2.2.4.2. Nitruración

Se entiende como nitruración a la técnica que se basa en la disociación del amoníaco con el fin de agregar átomos de nitrógeno en la capa superficial de aceros cuyo contenido de carbono comprenda valores entre 0,25% y 0,50% a una temperatura de alrededor de 550 °C; dentro de este rango se pueden obtener mejoras en las características de la pieza, obteniendo así una dureza superficial muy alta con un mínimo de deformaciones. Por otro lado, las capas superficiales de los aceros con concentraciones de carbono inferiores al 0,255% son muy frágiles, mientras que si se aplica el tratamiento en aceros con proporción de carbono superior al 0,5% no se obtiene ningún beneficio.

Se aconseja que las piezas se sometan a procesos de templado y revenido antes de aplicarse el tratamiento de nitruración para que la estructura martensítica del acero contribuya en la compactación de la capa nitrurada, la cual debe tener un espesor comprendido entre 0,2 a 0,5 mm, así mismo la profundidad de esta está limitada por elementos nitrurantes, tales como: Al, Cr, Mo, V y Ti garantizando una mayor uniformidad y compactación de la capa.

Tipos de Nitruración

Existen cuatro tipos de nitruración:

1. Nitruración gaseosa.

Proceso que se lleva a cabo mediante la disociación del amoníaco en condiciones atmosféricas controladas, a su vez la temperatura a la que se efectúa oscila entre 500 °C y 575 °C.

2. Nitruración líquida.

Es un procedimiento de baño de sales, entre ellas cianuros (CN-) y cianatos (CON-) en estado fundido caracterizado por una mínima adición de carbono, debido a que la temperatura a la cual se realiza es igual a la de la nitruración gaseosa, permitiendo de esta manera que los átomos de nitrógeno se adhieran fácilmente a la superficie de las piezas, es por ello que la capa superficial está químicamente en un 25 % de carburos y de un 75 % de nitruros de hierro.



Ilustración 2-2: Nitruración líquida

Fuente: González, Alejandra, 2020

3. Nitruración sólida.

Este tipo de nitruración se caracteriza por la disposición de una mezcla nitrurante en la superficie, misma que se ha de calentar a temperaturas entre 520 °C y 570 °C por un tiempo estimado de 12 horas.

4. Nitruración iónica.

Este procedimiento se realiza en un reactor, además se basa en la difusión de iones de nitrógeno en la superficie de las piezas, posteriormente se forman nitruros sobre esta. La finalidad de esta técnica es reducir los tiempos empleados en una nitruración por gas e incluso aumentado la velocidad de penetración de nitrógeno en el acero. Dentro de los gases con los cuales se trabaja en el reactor se encuentran el gas carburante, argón, etc. (Capote, 2011a: p.7)

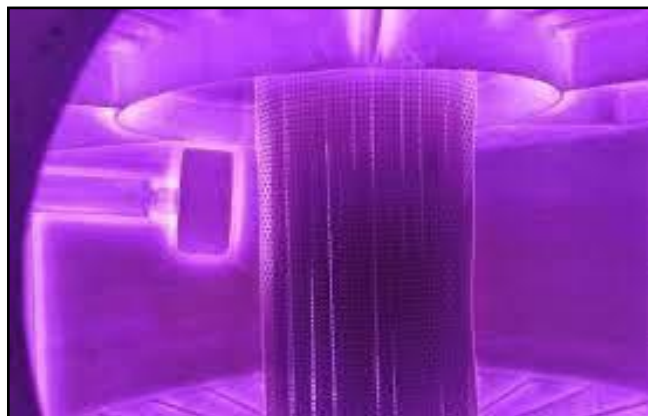


Ilustración 3-2: Nitruración iónica

Fuente: Kuzu S.L, 2017

2.2.4.3. Cianuración

Se considera como una técnica intermedia entre la cementación y la nitruración, puesto que los átomos de carbono y nitrógeno se combinan dando lugar a la formación de cianuros ($C=N$), estos se adhieren mediante un baño de sales en la capa superficial de los aceros, con el fin de endurecer dicha capa, así como proporcionarle resistencia al desgaste. (Capote, 2011b: p.8)

Este tratamiento se efectúa empleando cianuro con cloruro de sodio, así como carbonato de sodio a una temperatura que va desde los 750 °C a 950 °C; posteriormente las piezas se enfrían mediante un proceso de inmersión generando de esta manera una profundidad uniforme de 0,25 mm.



Ilustración 4-2: Cianuración

Fuente: Slideserve, 2014.

2.2.4.4. Carbonitruración

Este proceso termoquímico es similar a la cementación gaseosa, debido a que así mismo la superficie de las piezas absorbe carbono y nitrógeno; sin embargo, esta adición se lleva a cabo a temperaturas entre 780° C a 820 °C; a su vez este método permite mejorar el temple del carbono por consiguiente la dureza del acero. (Tecnología Industrial, 2020, p.1)



Ilustración 5-2: Carbonitruración

Fuente: Capote, 2011

2.2.4.5. Sulfinización

Es tratamiento termoquímico en el cual se adiciona azufre al acero a una temperatura de 575 °C con la finalidad de mejorar su comportamiento de este frente al mecanizado. El azufre adherido forma sulfuro de hierro (S_2Fe) mismo que se considera como impureza, esto hace que el acero se fragilice, aumente su resistencia al desgaste, al mismo tiempo que facilita la lubricación de las piezas. (Capote, 2011c p.10)

2.2.4.6. Boruración

Proceso termoquímico caracterizado por el uso de carburo de boro (B_4C) en forma de pasta, la cual se introduce en un horno a temperaturas que oscilan entre 800 °C y 1050 °C, donde se produce una disociación de la pasta en átomos de boro, mismos que penetran la superficie a fin de aumentar la dureza de la capa externa de la pieza. Este tratamiento se puede aplicar materiales tales como: aceros, hierros fundidos y aleaciones. (Puertolas et al., 2010: p 30)

Tratamientos térmicos para el acero AISI 4340

- Repintado: Se realiza generalmente a una temperatura de 850 °C durante al menos 1 hora por cada 25 mm, posterior a ello se realiza un enfriamiento lento con ayuda del horno. (GGD Metals, 2015a, p.1)
- Estandarización: Se efectúa a una temperatura comprendida entre 860 °C y 880 °C durante al menos 1 hora por cada 25 mm. Se enfría mediante aireado, o en casos particulares, se suele emplear aire forzado. (GGD Metals, 2015b, p.1)

- Temple: “Se realiza durante 1 hora el acero a temperaturas comprendidas entre 840 °C y 870 °C, luego se enfría rápidamente sumergiendo la pieza en agua, aceite, solución polimérica, sal o aire comprimido”. (GGD Metals, 2015c, p.1)
- Nitruración: De acuerdo con lo mencionado anteriormente este permite incrementar la resistencia al desgaste del endurecimiento de la capa superficial. La dureza que se alcanza en la superficie depende de la naturaleza con la que se aplica el tratamiento.
- Endurecimiento superficial: Procedimiento que permite endurecer la superficie del acero, luego de la aplicación de varios tratamientos, se alcanza una dureza estimada superior a 55 HRC.

Tratamientos Térmicos del acero 34CrNiMo6

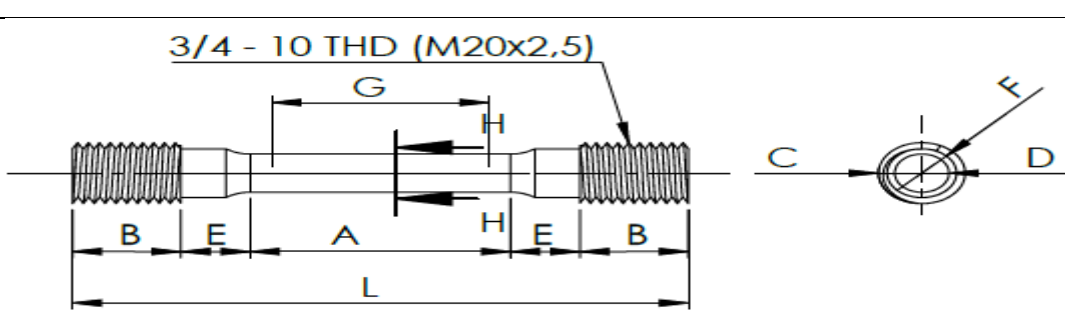
- Normalización: 860 °C -870 °C, fresco en el aire
- Recocido suave: 650 °C -680 °C, frío en el horno, máx. 248 HB. Recocido completo: 830-900 °C, frío en el horno.
- Endurecimiento: 830 – 860 °C, se recomienda enfriamiento rápido con aceite
- Revenido: 540°C – 660°C, fresco en aire quieto
- Temple: Se calienta el acero 34CrNiMo6 a 850 °C, posteriormente este se enfría en aceite, para finalmente templearlo hasta alcanzar la temperatura ambiente. (Waldun Steel, 2018, p.1)

2.2.5. Tracción

El ensayo de tracción o también denominado ensayo de tensión es una de las pruebas que se aplican a los materiales que se estudian para determinar el esfuerzo de fluencia, rotura y elongación, por medio de la aplicación de una fuerza estática, la cual se la aplica gradualmente hasta obtener los datos anteriormente mencionados hasta el punto romper la probeta en dos, por tal motivo también se lo cataloga como un ensayo destructivo por incapacitar la probeta luego de su aplicación. (Criollo, 2011a: p.21)

Para la aplicación de este ensayo se utilizan probetas normalizadas, las medidas para la mecanización de estas se encuentran en la normativa ASTM A0370-21, en la cual se especifican varias características que se deben de considerar al momento de realizar el ensayo de tracción. Las dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción se aprecian en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Dimensiones para las probetas de tracción

ESPÉCIMEN PARA ENSAYO DE TRACCIÓN			
			
Símbolo	Descripción	Dimensiones	
		in	mm
G	Longitud de medición	2,000 ± 0,005	50,0 ± 0,10
D	Diámetro	0,500 ± 0,010	12,5 ± 0,25
R	Radio de filete, mín.	$\frac{3}{8}$	10
A	Longitud de sección reducida	2 $\frac{1}{4}$	60, mín.
L	Longitud total, aproximada	5 $\frac{1}{2}$	140
B	Sección de agarre	1, aproximadamente	25, aproximadamente
C	Diámetro de la sección final	$\frac{3}{4}$	20
E	Longitud del hombro y sección de filete, aproximada	$\frac{5}{8}$	16
F	Diámetro del hombro	$\frac{5}{8}$	16

Fuente: ASTM A0370-21, 2021

Para realizar la prueba de tracción se necesita una máquina universal, la cual sujeta al espécimen con dos mordazas en sus extremos, las cuales pueden ser para probetas roscadas o planas dependiendo del tipo escogido, a fin de que el ensayo sea exitoso se recomienda que la carga transmitida de la máquina hacia la probeta sea axial, es decir que los centros de acción de las mordazas estén alineados al eje para su correcta toma de datos al momento de llegar a la rotura.

2.2.5.1. Propiedades para determinar

- Tensión de tracción (σ). – Es la relación entre la fuerza de tracción y el área transversal de la probeta.
- Límite elástico (σ_y). - Es la resistencia a la deformación elástica. Se expresa en fuerza por unidad de área, generalmente MPa.
- Esfuerzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$). - Tensión máxima de tracción que ha soportado la probeta durante el ensayo.
- Esfuerzo último (σ_R). - Tensión de tracción soportada por la probeta en el momento de su rotura.

- e) Módulo de elasticidad o Módulo de Young. - Es la relación entre el esfuerzo último y la deformación adquirida en el tramo lineal de la curva esfuerzo-deformación (región elástica). Sus unidades son MPa o N/mm^2 .
- f) Alargamiento o elongación: Es el incremento en longitud de la probeta, generalmente se expresa en tanto por ciento.
- g) Deformación (ϵ). Es una magnitud que representa la relación entre el alargamiento y la longitud inicial de la probeta. Existen tres tipos de deformaciones:
1. Deformación en el límite elástico (ϵ_y)
 2. Deformación al esfuerzo máximo ($\epsilon_{m\acute{a}x}$)
 3. Deformación a la rotura (ϵ_R)

2.2.5.2. Diagrama Esfuerzo – Deformación

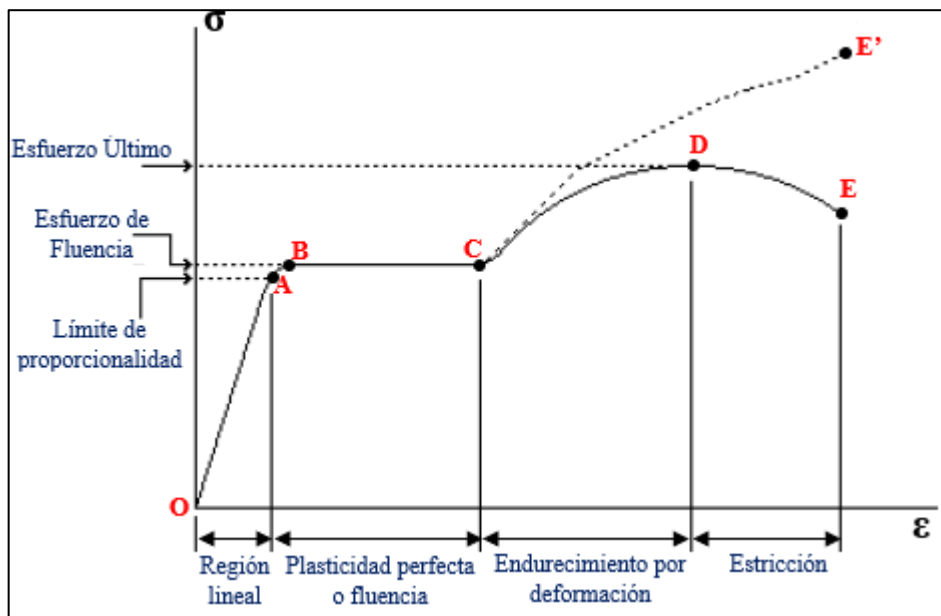


Ilustración 6-2: Diagrama Esfuerzo - Deformación (Esquemático)

Fuente: Acevedo, María, 2019.

Luego del ensayo de tracción del acero se distinguen las siguientes zonas:

- Zona 0-A: Corresponde al período elástico, el cual comprende desde el inicio hasta el límite de proporcionalidad, mismo que representa la relación directamente proporcional entre el esfuerzo aplicado y la elongación de la probeta.
- Zona A-B: Zona de alargamiento pseudoelástico, comprende entre el límite de proporcionalidad y el esfuerzo de fluencia, es aquella área en la que el material empieza a perder la capacidad elástica para retornar a su estado inicial.

- Zona B-C: Zona de fluencia, comienza la deformación permanente del material, es decir el material ya no puede regresar a su estado inicial.
- Zona C-D: Zona en la que acontece la acritud de la probeta, esta se vuelve más frágil, alcanzando así el material su esfuerzo último de tracción.
- Zona D-E: Zona de estricción, disminuye el área transversal de la probeta hasta el punto de la rotura.

2.2.6. Dureza

El ensayo de dureza permite medir la resistencia que existe en la superficie del material por medio de la penetración de este, por un objeto más duro que el material a estudiar. Las pruebas de dureza pueden variar dependiendo de su aplicación, de las cuales las más importantes tenemos: Brinell, Rockwell y Vickers. (Criollo, 2011b: p.28)

Mediante la prueba Rockwell se determina el valor de dureza mediante la profundidad de penetración que deja la carga aplicada en la probeta, por lo general se emplea una bola de acero o un cono de diamante dependiendo del tipo de ensayo Rockwell que se desea aplicar, esto está especificado en la Tabla 6-2. (Askeland, 1998: p.142)

Tabla 6-2: Tipos de ensayos de dureza

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	1gf - 10 kgf	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Fuente: Askeland, Donald; 1998

2.2.7. Impacto

La prueba de impacto Charpy es un ensayo dinámico, ya que se lo realiza por medio del movimiento de un péndulo que golpea una sola vez al espécimen en estudio, lo que provoca que se destruya con la fuerza de impacto emitida por el mismo, dando como resultado la energía que

recibió la muestra para poder romperla, esto nos indica la tenacidad que tiene la probeta. (ASTM E 23-18, 2018: p.2)

Las especificaciones en las medidas de las probetas estandarizadas están dadas en la norma ASTM E 23-18, las cuales se muestran en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2: Medidas estandarizadas para ensayo de impacto

ESPÉCIMEN CON MUESCA EN V PARA ENSAYO CHARPY			
ID	Descripción	Dimensión	Tolerancia
1	Longitud de la muestra	55 mm	+0/-2,5 mm
2	Muesca superior	27,5 mm	±1 mm
3	Longitud de la muesca en el borde	90°	±2°
4	Ángulo de los lados adyacentes	90°	±0,17°
5	Ancho	10 mm	±0,025 mm
6	Espesor	10 mm	±0,025 mm
7	Longitud del ligamento	8 mm	±0,025 mm
8	Radio de muesca	0,25 mm	±0,025 mm
9	Ángulo de muesca	45°	±1°
A	Requisito de acabado superficial	2 μm (Ra)	≤
B	Requisito de acabado superficial	4 μm (Ra)	≤

Fuente: ASTM E 23-18, 2018

2.2.8. Metalografía

Los ensayos metalográficos ayudan a determinar el tamaño, así como la estructura del grano del material en estudio, debido a la incidencia de los microconstituyes en las propiedades mecánicas de los aceros para la construcción; estas pruebas se las realiza en probetas debidamente preparadas, estas deben tener una superficie pulida o desbastada lo más perfecta posible, posteriormente las probetas son sometidas a un ataque químico, por medio de un microscopio se logra identificar los microconstituyente que conforman el material estudiado. (Criollo, 2011c: p.50)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de investigación

La presente investigación está orientada a caracterizar metalográficamente y evaluar las propiedades mecánicas de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 antes y después de ser sometidos a un tratamiento termoquímico de nitruración por sales; esto debido al carácter investigativo, donde se emplea variables continuas durante la caracterización metalográfica de los aceros y en la interpretación de resultados de los ensayos destructivos y no destructivos.

3.2. Nivel de Investigación

El presente estudio es de nivel descriptivo explicativo; el primero implica la determinación de las propiedades mecánicas y caracterización de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 con y sin nitruración mediante ensayos, sin que exista manipulación de alguna variable; mientras que se define como explicativo debido a que se hace un análisis estadístico a fin de corroborar o rechazar la hipótesis de que las propiedades mecánicas y los constituyentes micrográficos de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 son semejantes antes y después de la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración.

3.3. Diseño de investigación

3.3.1. *Según la manipulación o no de la variable independiente*

3.3.1.1. *Experimental*

Bajo la premisa de que se pretende una caracterización de los aceros AISI 4340 y CrNiMo6 con y sin nitruración, se toman los valores obtenidos en los diferentes ensayos ejecutados en laboratorios, para un posterior análisis mediante herramientas estadísticas existiendo la manipulación directa en las variables.

3.3.2. Según las intervenciones en el trabajo de campo

3.3.2.1. Transversal

Se determina que el ensayo de tracción realizado bajo la norma ASTM-A0370 en los laboratorios es de tipo transversal puesto a que mediante este ensayo se calculan al mismo tiempo varias propiedades de interés como son la elongación, así como la resistencia última del material. Además, cabe mencionar que igualmente el ensayo de metalografía también aplica un estudio transversal dado que al mismo tiempo se puede observar la constitución micrográfica de los aceros.

3.3.2.2. Longitudinal

Los ensayos de Impacto y de dureza se orientan hacia un trabajo longitudinal, debido a que solo se puede evaluar una propiedad a la vez, es decir para el ensayo de Impacto únicamente se determina la tenacidad de los aceros, mientras que para en el ensayo de dureza se calcula la resistencia que presenta el material al ser penetrado.

3.4. Tipo de estudio

3.4.1. Estudio documental

Es preciso adquirir conocimiento e información acerca del comportamiento de los aceros AISI 4340, así como del 34CrNiMo6, además de conocer la incidencia del tratamiento termoquímico de nitruración en los mismos, por lo que se requiere un estudio bibliográfico en fuentes tales como: publicaciones, trabajos de titulación, revistas, libros, etc. Posterior a esta revisión se plantea las variables y parámetros que intervienen en el trabajo de investigación, destacando su relevancia en la interpretación de los resultados.

3.4.2. Estudio de campo

Se realiza en los laboratorios mediante la ejecución de los ensayos de espectrometría, metalografía, tracción, dureza e impacto.

3.5. Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra

3.5.1. Población

La población de la presente investigación está delimitada por la disponibilidad del material que ofrece la empresa SERTECPET S.A, la cual otorga un total de 15 barras de acero, de las cuales 8 son del acero AISI 4340 y los 7 restantes son del acero 34CrNiMo6.

3.5.2. Muestra

Para el cálculo de la muestra se tomó en cuenta varios factores que delimitan los diferentes ensayos, principalmente la cantidad de material disponible, así como las especificaciones técnicas en la normativa ASTM, en la norma ASTM A370-21 se sugiere para los ensayos de tracción se realice empleando muestras sustanciales, por lo que se necesitan 10 muestras por cada tipo de acero, por su parte la norma ASTM E23-18 se menciona que en el ensayo de Impacto se necesita un mínimo de 3 muestras o especímenes para obtener resultados verídicos. Para el ensayo de espectrometría la norma ASTM E415-21 indica que para probetas cilíndricas el diámetro debe estar comprendido entre 10 a 38 mm, por lo que se opta por seleccionar una probeta de cada acero.

Por otra parte, para el análisis de inclusiones no metálicas, la norma ASTM E45 indica que la superficie de la probeta debe ser de mínimo de 160mm², e igualmente se selecciona una probeta de cada acero.

Además, cabe mencionar que para el análisis estadístico de los resultados de los ensayos de tracción, dureza e impacto se procede a la aplicación del modelo estadístico ANOVA, mismo que sugiere que existan como mínimo 8 datos para el análisis. Bajo estas consideraciones se especifica el número de probetas en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Tipos de ensayos

Acero	Ensayo	Número de Probetas
AISI 4340	Tracción	10
34CrNiMo6	Tracción	10
AISI 4340	Impacto	8
34CrNiMo6	Impacto	8
AISI 4340	Dureza	8
34CrNiMo6	Dureza	8
AISI 4340	Metalografía	1
34CrNiMo6	Metalografía	1
AISI 4340	Inclusiones	1
34CrNiMo6	Inclusiones	1
AISI 4340	Espectrometría	1
34CrNiMo6	Espectrometría	1

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3.6. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

3.6.1. Método

Para este estudio de caracterización metalográfica y evaluación de las propiedades mecánicas de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 con y sin nitruración se realizan ensayos de tracción, impacto, dureza, metalografía, espectrometría, así como el análisis de inclusiones no metálicas, partiendo de lo establecido en las normativas ASTM, de acuerdo con el tipo de ensayo, como se detalla en la Tabla 2-3. Cabe indicar que la metodología de la investigación se observa en la Ilustración 1-3.

Tabla 2-3: Normativa ASTM aplicada en la investigación

Norma	Descripción:
ASTM E18-15	<i>Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.</i>
ASTM E3	<i>Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.</i>
ASTM E384-17	<i>Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials</i>
ASTM E-407	<i>Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.</i>
ASTM E45-11	<i>Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.</i>
ASTM E415-21	<i>Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.</i>
ASTM E8	<i>Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.</i>
ASTM E23-18	<i>Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials</i>
ASTM A370-21	<i>Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products</i>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

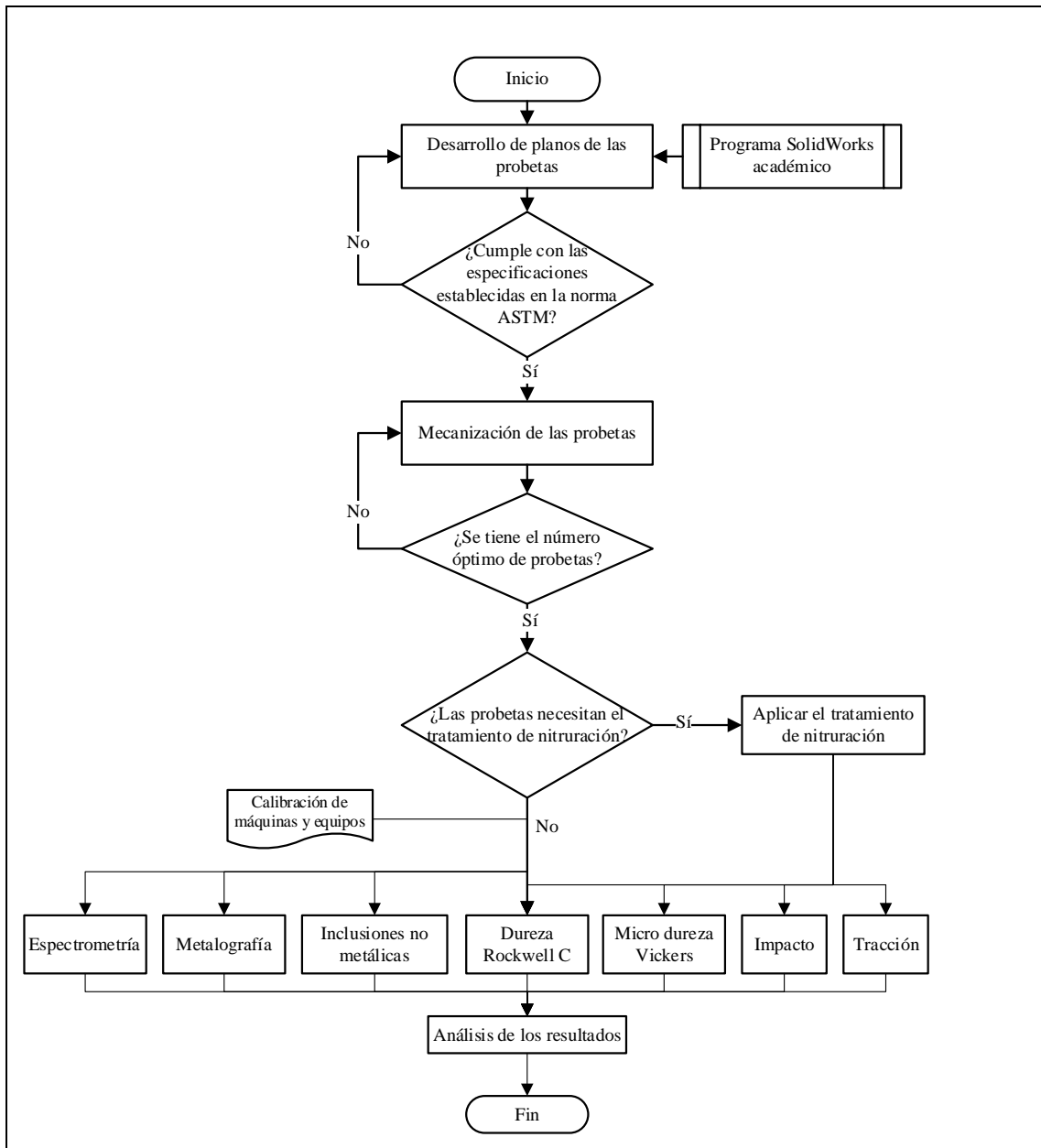


Ilustración 1-3: Metodología de la investigación

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3.6.2. Técnicas e instrumentos de investigación

3.6.2.1. Espectrometría

Este procedimiento consiste en el análisis de la composición química de cada acero. Se seleccionan dos probetas, una por cada material; el grosor de cada espécimen se especifica en la norma ASTM E415-21 y debe estar comprendido entre 10 a 38 mm; en este caso se opta por un grosor de 28 mm.

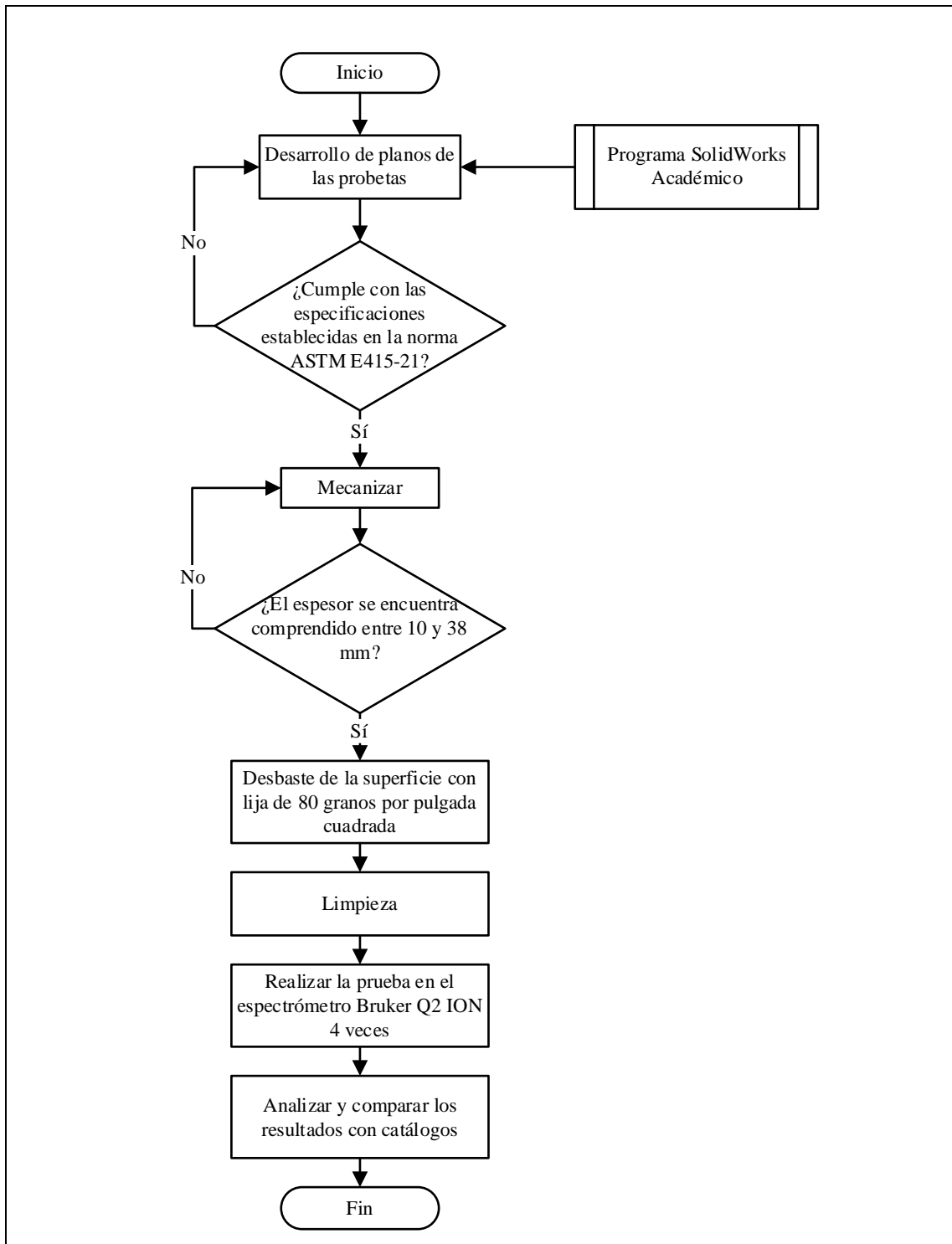


Ilustración 2-3: Procedimiento para espectrometría

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Procedimiento para espectrometría

1) Preparación de muestras

Se realiza el desbaste de la superficie de cada probeta a fin de que esta no presente irregularidades, mediante un lijado grueso, para el cual se utiliza una lija de agua de 80 granos por pulgada cuadrada. A continuación, se limpia con un paño y se lleva al espectrómetro.

2) Espectrometría Óptica

Cada muestra se coloca en el espectrómetro de emisión óptica *Bruker Q2 ION* el cual emplea argón para generar un ambiente inerte sobre la superficie de la probeta; durante este proceso se genera una chispa o flama, la cual excita a los electrones de los orbitales más altos de los elementos químicos de cada acero, una vez que se retira la chispa, los electrones caen al estado fundamental y liberan la energía absorbida en forma de fotones, generando una emisión de luz que se dirige a la red de difracción, en la cual se descompone en diferentes longitudes de onda, y así creando un espectro dentro de la cámara óptica del equipo, finalmente se analiza con ayuda de un computador dichas ondas y se sabe la concentración del elemento presente en los aceros. Este procedimiento se realiza 4 veces, a fin de determinar que exista repetitividad en los datos y así obtener una concentración media de los elementos constituyentes de cada acero.

Espectrómetro

Tabla 3-3: Características del espectrómetro

Espectrómetro	Características
Equipo empleado para determinar la composición química de un elemento. 	Marca: Bruker Número: Q103384-2015 Voltaje: 110 V Potencia: 200 W Frecuencia: 50 – 60 Hz Dimensiones: 600x1280x630 mm Peso: 115 kg Ubicación: Laboratorio de Ingeniería de Materiales – ESPOCH- Riobamba.

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3.6.2.2. Metalografía

El análisis metalográfico se realiza en 2 probetas, de las cuales 1 es del acero AISI 4340 (sin nitrurar); la otra corresponde al acero 34CrNiMo6 (sin nitrurar). Para la ejecución del ensayo se

utiliza el microscopio óptico *Nikon Eclipse E200* que se encuentra en el laboratorio de Materiales en la Facultad de Mecánica – ESPOCH, a fin de obtener fotomicrografías y así poder hacer un correcto análisis.

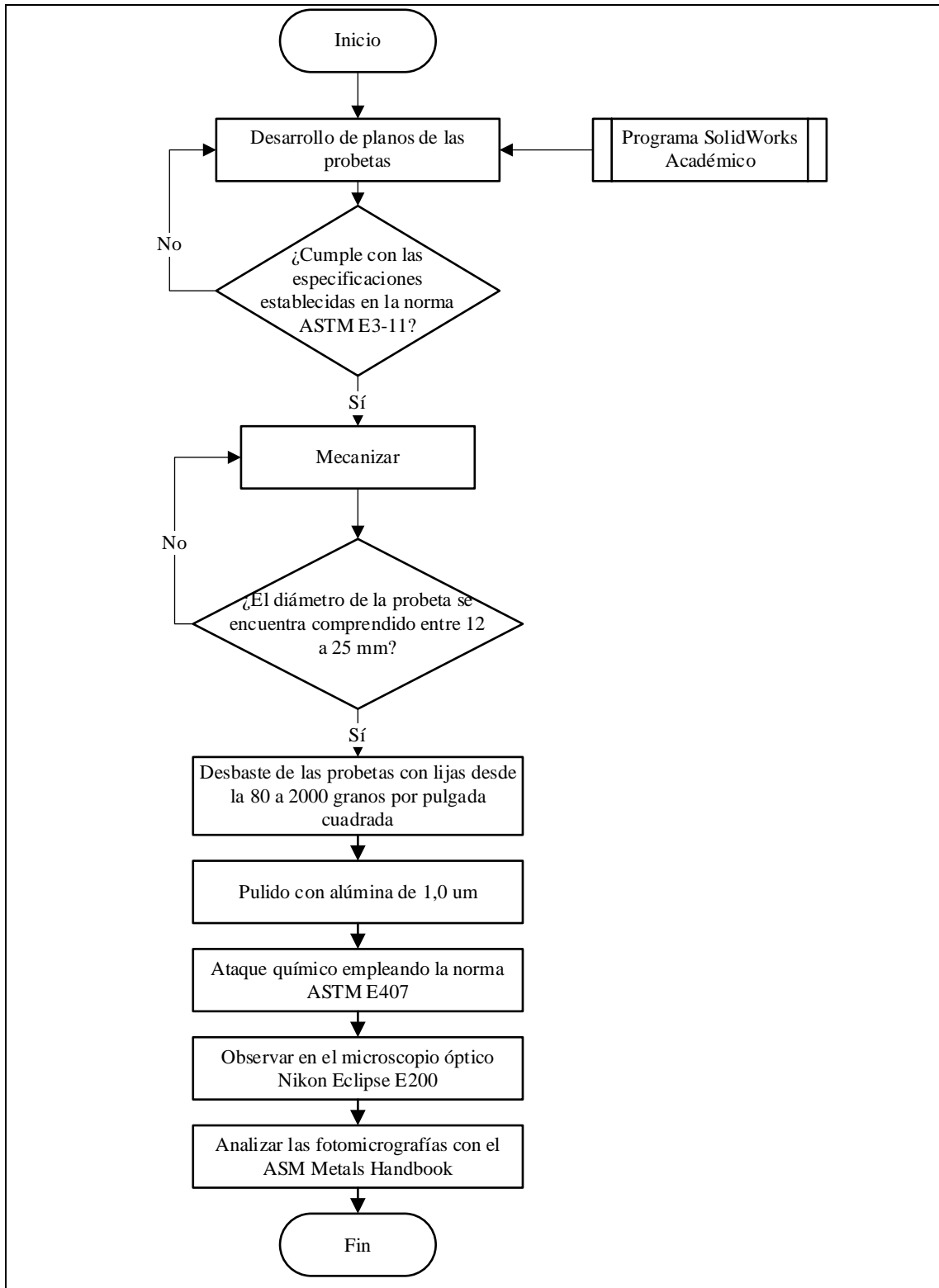


Ilustración 3-3: Procedimiento del ensayo de metalografía

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Procedimiento del ensayo de metalografía

1) Preparación de las muestras

La norma ASTM E3-11 establece que la superficie de las muestras debe estar libre de impurezas e irregularidades que son resultado del proceso de mecanizado; para lograr esto se deben seguir una serie de pasos indicados en la propia norma.

2) Dimensionamiento de las probetas

Para especímenes esféricos se establece que el diámetro debe estar comprendido entre 12 a 25 mm, a fin de facilitar la manipulación de estos durante el proceso de desbaste, bajo esta condición se opta trabajar con probetas que tienen un diámetro de 24 mm y 20 mm de alto.

Fases del ensayo metalográfico

En la normativa correspondiente se establece los siguientes pasos:

a) Extracción de probetas

La empresa provee dos ejes cilíndricos de 38 mm de diámetro y 356 mm de longitud, uno por cada acero; estos ejes deben cortarse de manera perpendicular al eje de simetría empleando una cortadora de cinta; cabe indicar que durante el proceso de corte se utiliza refrigerante, en este caso agua, a fin de evitar que la superficie de la probeta se quemé.

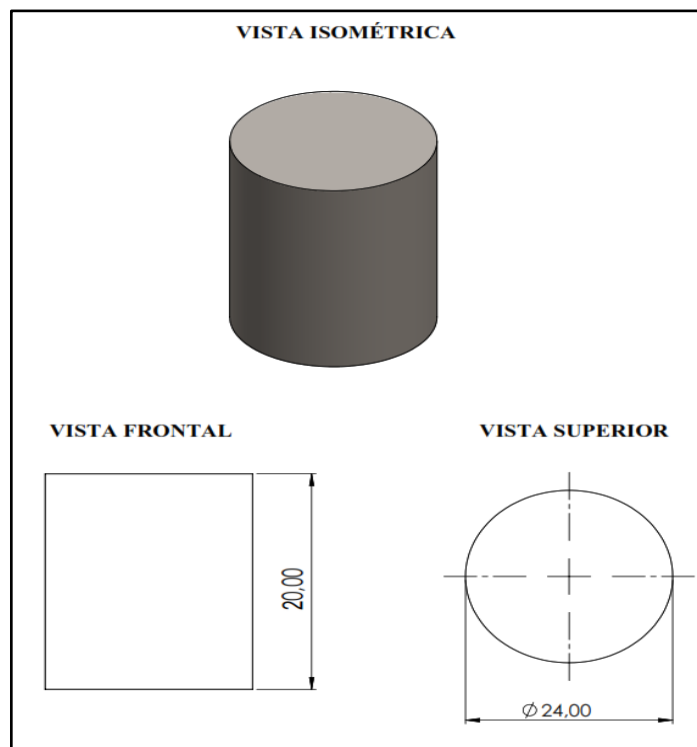



Ilustración 4-3: Probeta para ensayo metalográfico

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Cortadora de Cinta

Tabla 4-3: Características de la cortadora de cinta

Cortadora de Cinta	Características
	<p>Marca: <i>Jet</i></p> <p>Número: JT-414466</p> <p>Potencia: 15 Hp</p> <p>Velocidad de la hoja (135, 197, 256 SFPM).</p> <p>Voltaje: 115 - 230 V.</p> <p>Frecuencia: 60 Hz</p> <p>Accionamiento: Con una poli correa en V.</p> <p>Ubicación: Riobamba.</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

b) Identificación

En esta etapa a fin de evitar que se genere confusiones al momento de realizar el ensayo, se señala con algún distintivo a cada probeta mediante el uso de un lápiz grabador para metales u otra herramienta, en este caso se emplea corrector.

c) Desbaste

Procedimiento que consiste en la eliminación de las huellas dejadas por la cinta de corte sobre la superficie de las probetas, mediante dos subprocesos de lijado: un lijado grueso y un lijado fino, empleando lijas de agua de 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 y 2000 granos por pulgada cuadrada.

Cabe indicar que el lijado se realiza sobre un banco portalijs provisto de un sistema de chorreo de agua que cumple las funciones de refrigerar y limpiar la superficie. Cabe indicar que este proceso se lo realiza en una sola dirección ya sea de arriba abajo o viceversa; además, cada vez que se procede al cambio de lija, es necesario girar la probeta 90° a fin de ir eliminando las rayas dejadas por la lija anterior, como se aprecia en la Ilustración 5-3.

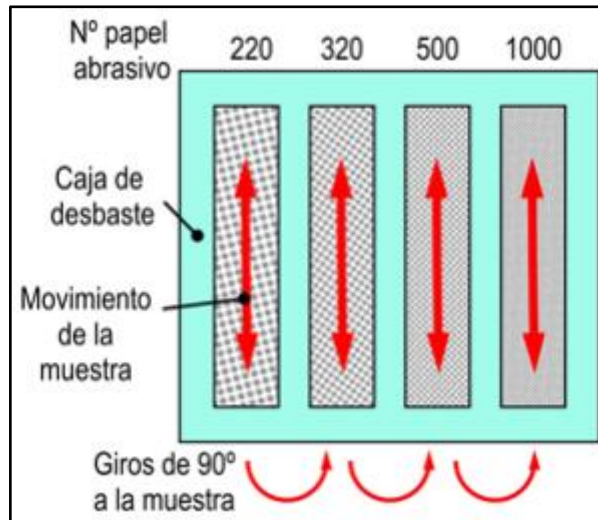


Ilustración 5-3: Proceso de Desbaste

Fuente: Norén Anders, 2018

Banco portaliñas

Mecanismo provisto de un sistema de refrigeración, mismo que consiste en verter agua sobre las lijas con la finalidad de limpiar las impurezas que se ubican sobre estas.



Ilustración 6-3: Banco Portaliñas

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

d) Pulido

Se realiza empleando una máquina pulidora, misma que consta de un disco sobre el cual se encuentra un paño; sobre este último se aplica alúmina de $1,0 \mu m$ (Al_3O_2) que es una solución abrasiva, con el propósito de eliminar las rayas ocasionadas por la lija de 2000 granos por pulgada cuadrada, la probeta ha de moverse en sentido contrario al del giro del paño, como se aprecia en la Ilustración 7-3.



Ilustración 7-3: Alúmina

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

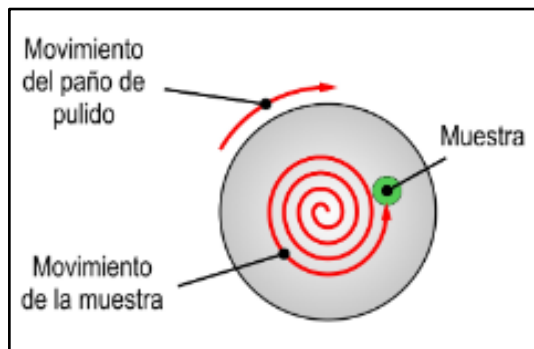



Ilustración 8-3: Proceso de Pulido

Fuente: Norén Anders, 2018

Máquina pulidora

Tabla 5-3: Características de la máquina pulidora

Máquina Pulidora	Características
<p>Equipo provisto con un disco sobre el cual se coloca un paño. Este dispositivo presenta un variador de velocidad.</p> 	<p>Marca: Huayin Modelo: MoPao 160 Voltaje de funcionamiento: 220V Diámetro del disco: 203 mm Velocidad de rotación: 150 y 300 rpm. Dimensiones: 340x650x310 mm Peso: 30 kg Ubicación: Laboratorio de Ingeniería de Materiales – ESPOCH- Riobamba.</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

e) Limpieza

Sobre la superficie pulida se deja caer un flujo constante de agua a fin de eliminar los restos de la sustancia abrasiva, a continuación, se limpia la superficie con algodón hasta que dicha superficie quede con un acabado tipo espejo.

f) Ataque químico

Se realiza una vez que la superficie de la probeta tiene un acabado tipo espejo y a su vez no existe rayas sobre la misma, empleando la sustancia química apropiada, que de acuerdo con la norma ASTM E-407 en el caso de aceros al carbono se utiliza ácido nítrico (1 a 5 mL) y alcohol (100 mL), comúnmente conocido como Nital durante un tiempo comprendido entre 2 a 5 segundos)



Ilustración 9-3: Ataque químico con Nital al 2%

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.



Ilustración 10-3: Probeta atacada químicamente

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

g) Secado

Posterior al ataque químico se procede a secar la superficie empleando un secador de cabello, a fin de lograr una mejor concentración del Nital en la probeta.

Secadora

Tabla 6-3: Características de la secadora

Secadora	Características
	<p>Marca: Nova Brasil</p> <p>Modelo: NV-6610</p> <p>Voltaje: 110 V</p> <p>Potencia: 4000 W</p> <p>Frecuencia: 50- 60 Hz</p> <p>Ubicación: Laboratorio de Ingeniería de Materiales- ESPOCH- Riobamba.</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

h) Observación

Una vez que la superficie esté completamente seca, mediante el uso del microscopio óptico *Nikon Eclipse E200*, el cual consta de lentes objetivos de 4X, 10X, 40X y 100X y con ayuda del software *Mshot Image Analysis System* se observan las imágenes en un computador.

Previo a la observación de las imágenes se procede a medir tanto la altura, así como la longitud de las fotografías de la siguiente manera:

1. Colocar la regla micrométrica en la platina del microscopio.
2. Seleccionar los lentes objetivo 10X y 40X en el microscopio.
3. Con ayuda de la regla micrométrica 100x0,01 mm se mide tanto la altura como la longitud de la foto para los objetivos mencionados anteriormente, como se aprecia en la Ilustración 11-3. Obteniendo los valores que se encuentran en la Tabla 7-3.

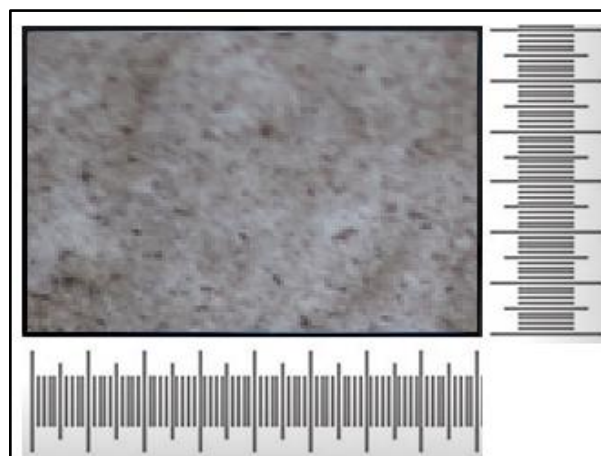


Ilustración 11-3: Dimensionamiento de fotografías

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Tabla 7-3: Dimensiones para el microscopio *Nikon Eclipse E200*

Ampliación	Longitud (micras)	Altura (micras)
10x	732	488
40x	182	121

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4. Se procede a escalar las imágenes, pegándolas en Word y para saber las dimensiones de la imagen se realiza una relación entre su tamaño en micras y el tamaño en centímetros que se desea colocar en el documento, como se aprecia en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3: Escala en Word

Ampliación	Longitud (micras)	Longitud (cm)	Altura (micras)	Altura (cm)
10x	732	8,5	488	5,67
40x	182	8,5	121	5,65

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

5. Para conocer la longitud real de algún componente de la imagen, se grafica un cuadro de fondo blanco en la parte inferior derecha de esta, en el cual se traza una línea horizontal, la longitud de esta línea servirá como un patrón de medición, como se aprecia en la Ilustración 6-3. Este patrón es diferente para cada aumento del microscopio, en este caso se emplean patrones de $100\ \mu\text{m}$ y $40\ \mu\text{m}$ para los aumentos de 10X y 40X respectivamente




Ilustración 12-3: Escala de fotografías

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Microscopio Óptico

Tabla 9-3: Características del microscopio óptico.

Microscopio óptico	Características
<p>Es un microscopio binocular con un poder de resolución de hasta 2000 X, que permite enviar directamente las imágenes al computador mediante la conexión de un cable USB, para lo cual el ordenador debe contar con el software <i>Mshot Image Analysis System</i>.</p> 	<p>Marca: Nikon Modelo: Eclipse E200 Platina: Rectangular con superficie de 216 x 150mm montada en el cuerpo principal. Viaje de platina de 78 x 54mm usa un control coaxial con posición baja Porta-objetivos: Revolver cuádruple tipo inverso. Objetivos: 4X, 10X, 40X y 100X. Voltaje: 110 V. Ubicación: Laboratorio de Ingeniería de Materiales – ESPOCH- Riobamba.</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

i) Procesamiento de imágenes

Se realiza la comparación con la microestructura del *ASM Metals Handbook, Vol 09* así como con el artículo científico: *Microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel repaired by laser remelting* a fin de determinar los microconstituyentes de los aceros.

3.6.2.3. Inclusiones no metálicas

Durante la fundición de los aceros se aplican elementos fundentes motivo por el cual se generan inclusiones no metálicas, que de una u otra manera influyen sobre las propiedades de los aceros. Para el análisis de estas inclusiones se emplea la norma ASTM E45-11, la cual establece el siguiente procedimiento:

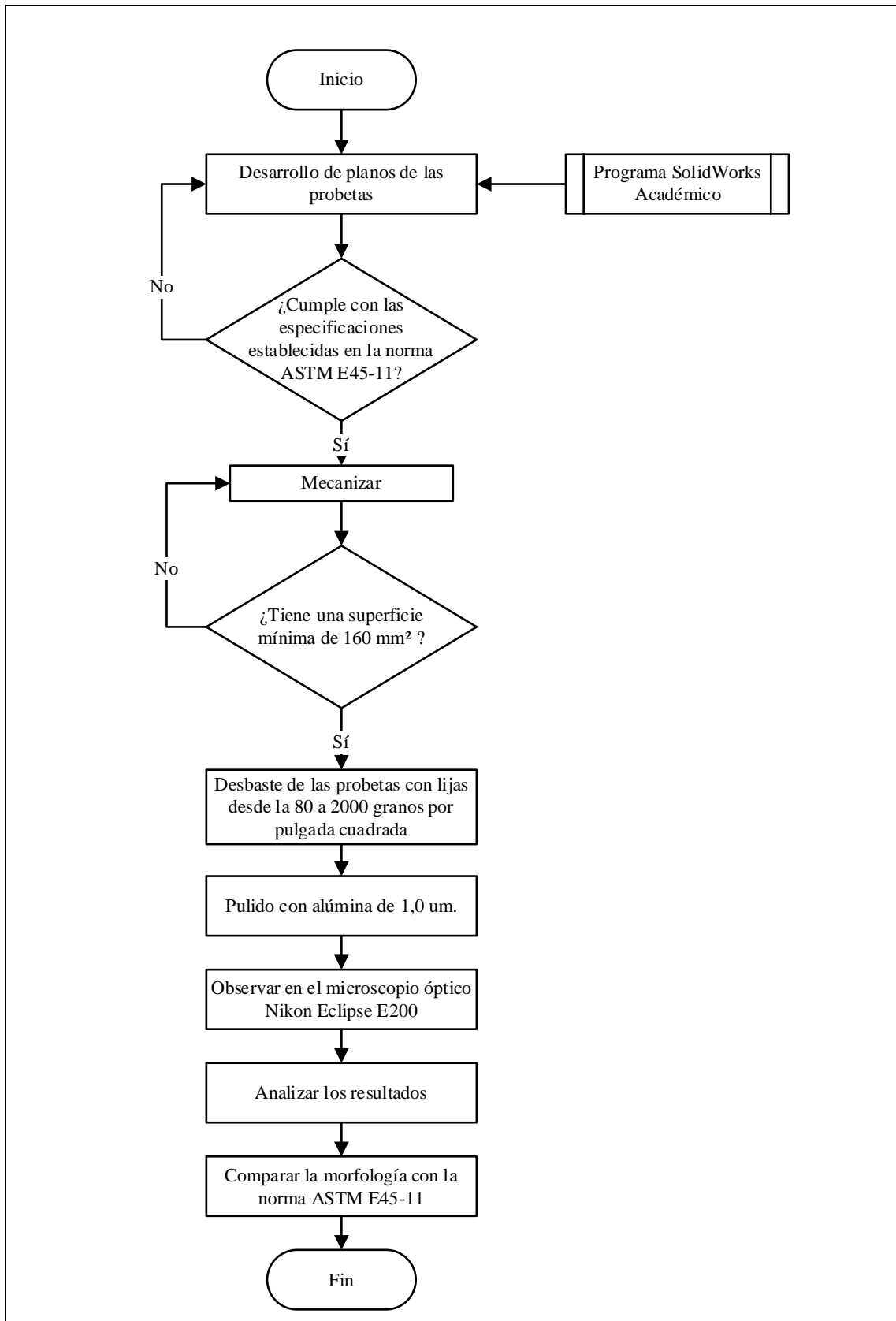


Ilustración 13-3: Procedimiento para análisis de inclusiones no metálicas

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

1. Obtención de las probetas.

Se emplean las probetas cilíndricas del análisis metalográfico, mismas que deben ser cortadas de manera transversal al eje de revolución debido a que en el núcleo del acero se concentra la mayor cantidad de impureza. La norma ASTM E45-11 especifica que la superficie mínima debe ser 160 mm², en este caso se tiene una superficie aproximada de 480 mm², con una longitud de 20 mm y un ancho de 24 mm.



Ilustración 14-3: Probeta para inclusiones no metálicas

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

2. Preparación metalográfica para el análisis de inclusiones no metálicas.

Esta etapa consiste en una serie de pasos, los mismos aplicados en el ensayo metalográfico hasta la fase de pulido; cabe indicar que para el análisis de inclusiones no metálicas no es necesario la aplicación de ataque químico.

3. Observación microscópica.

Previo a la observación se limpia y seca la probeta. Para realizar este proceso se debe cumplir con los siguientes requerimientos.

- Magnificación de la fotografía: Aumento 100X
- Campo de observación: Equivalente a 0,5 mm² definida por un cuadrado de 0,71 mm de lado.
- Se realiza la observación siguiendo un recorrido completo por la superficie de la probeta, como se muestra en la Ilustración 15-3.

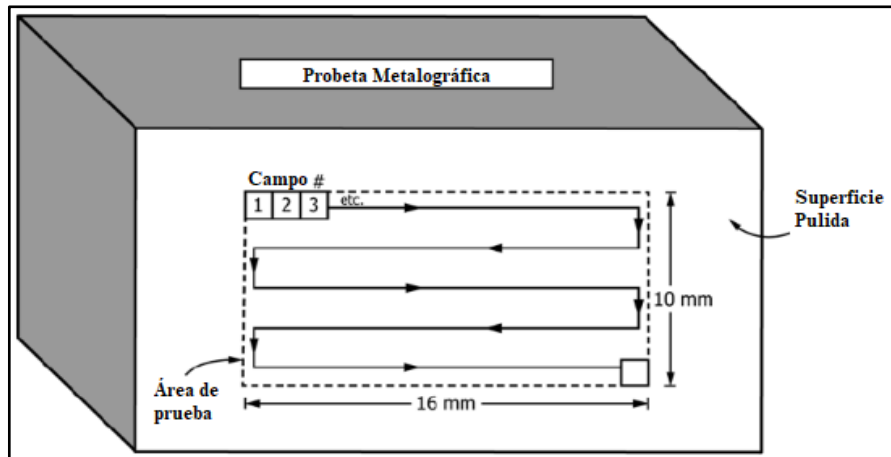


Ilustración 15-3: Recorrido para la observación de Inclusiones no metálicas

Fuente: ASTM E45, 2011

- Se seleccionan aquellas 6 fotografías que contengan la mayor concentración de inclusiones no metálicas.

4. Tipos de Inclusiones no metálicas

De acuerdo con la norma ASTM E45-11 existen 4 tipos de inclusiones no metálicas, estos son:

Tipo A: Indica la presencia de sulfuros; generalmente se encuentra como ramas continuas, como se puede apreciar en la Ilustración 16-3.



Ilustración 16-3: Inclusión Tipo A

Fuente: Evident, 2020

Las inclusiones tipo B, C y D son regularmente óxidos, pero difieren en cuanto a su forma.

Tipo B: También conocido como alúmina, se presenta con al menos tres partículas de óxido redondas de las cuales por lo menos 2 deben estar alineadas con el eje de deformación como se observa a continuación. Adicionalmente, pueden presentar un desfase menor a $15 \mu m$ y una separación menor a $40 \mu m$. Se aprecia en la Ilustración 17-3.

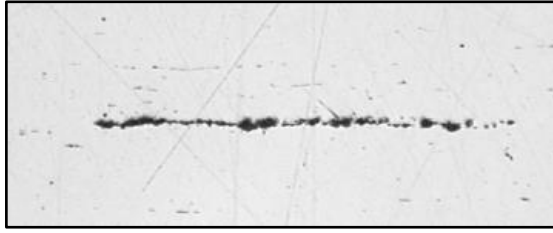


Ilustración 17-3: Inclusión Tipo B

Fuente: Evident, 2020

Tipo C: Están constituidas por silicato y consisten en cadenas segmentadas alargadas paralelamente sobre el eje de deformación como se puede apreciar en la ilustración. Su separación es mayor a $40\ \mu\text{m}$, como se aprecia en la Ilustración 18-3.



Ilustración 18-3: Inclusión Tipo C

Fuente: Evident, 2020

Tipo D: Son óxidos globulares dispersos a lo largo de la superficie, como se observa en la Ilustración 19-3

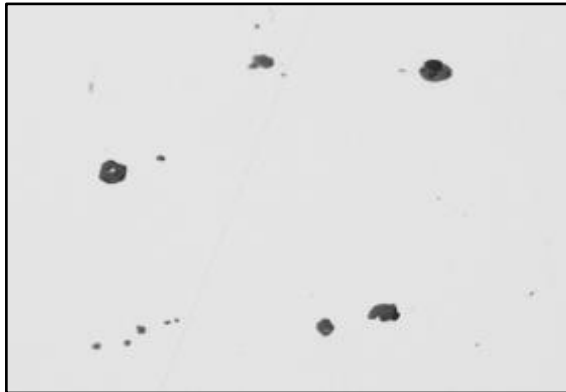


Ilustración 19-3: Inclusión Tipo D

Fuente: Evident, 2020

5. Grado de severidad

El nivel de impureza del acero se determina de dos maneras dependiendo el tipo de inclusiones, teniendo así:

1. Mediante la suma de las longitudes en el caso de las inclusiones no metálicas tipo A, B y C.
2. Por medio del conteo de número de inclusiones no metálicas tipo D.

Estos niveles de severidad van desde 0,5 (menor concentración de impurezas) a 5 (mayor concentración de impurezas), y se clasifican como se muestra en la Tabla 10-3.

Tabla 10-3: Valores mínimos de severidad

	Longitud mm (in)			Número de inclusiones
	Tipos de Inclusiones no metálicas			
Severidad	A	B	C	D
0,5	3,7 (0,15)	1,7 (0,07)	1,8 (0,07)	1
1,0	12,7 (0,50)	7,7 (0,30)	7,6 (0,30)	4
1,5	26,1 (1,03)	18,4 (0,72)	17,6 (0,69)	9
2	43,6 (1,72)	34,3 (1,35)	32,0 (1,26)	16
2,5	64,9 (2,56)	55,5 (2,19)	51,0 (2,01)	25
3,0	89,8 (3,54)	82,2 (3,24)	74,6 (2,94)	36
3,5	118,1 (4,65)	114,7 (4,52)	102,9 (4,05)	49
4,0	149,8 (5,90)	153,0 (6,02)	135,9 (5,35)	64
4,5	189,8 (7,47)	197,3 (7,77)	173,7 (6,84)	81
5,0	223,0 (8,78)	247,6 (9,75)	216,3 (8,52)	100

Fuente: ASTM E45, 2011

Es preciso señalar que en el caso en el que las longitudes de las inclusiones no metálicas sobrepasen los límites establecidos en la tabla indicada anteriormente, estas se reportan como inclusiones *oversize* (fuera de tamaño).

6. Definición de la serie

La serie está definida por el ancho de más del 50% de la longitud de la inclusión (tipos A, B y C), y de más del 50% del diámetro en la inclusión tipo D. Se tiene dos series que son: gruesa y delgada, cuyo rango de anchura se especifica en la Tabla 11-3.

Tabla 11-3: Parámetros de ancho y diámetros para inclusiones

Tipo de Inclusión	Serie delgada		Serie gruesa	
	Ancho mín. µm (in)	Ancho máx. µm (in)	Ancho mín. µm (in)	Ancho máx. µm (in)
A	2,0 (0,00008)	4,0 (0,00016)	> 4,0 (0,00016)	12,0 (0,0005)
B	2,0 (0,00008)	9,0 (0,00035)	> 9,0 (0,00035)	15,0 (0,0006)
C	2,0 (0,00008)	5,0 (0,00020)	> 5,0 (0,00020)	12,0 (0,0005)
D	2,0 (0,00008)	8,0 (0,00030)	> 8,0 (0,00030)	13,0 (0,0005)

Fuente: ASTM E45, 2011

Es preciso indicar que en el caso en el que el ancho de las inclusiones no metálicas sobre pasen los límites establecidos en la serie gruesa, estas se reportan como inclusiones *oversize* (fuera de tamaño).

7. Comparación de la morfología

Finalmente se compara la morfología de las inclusiones encontradas con la morfología descrita en la norma ASTM E45-11.

Procesamiento de imágenes

A fin de obtener la longitud y ancho de las inclusiones se procede de la siguiente manera

1. Copiar y pegar la imagen en Word con las siguientes dimensiones:

Longitud: 7,32 cm

Altura: 4,88 cm

2. Ejecutar el software Image J

3. Abrir la fotografía

4. Escalar la fotografía a mm.

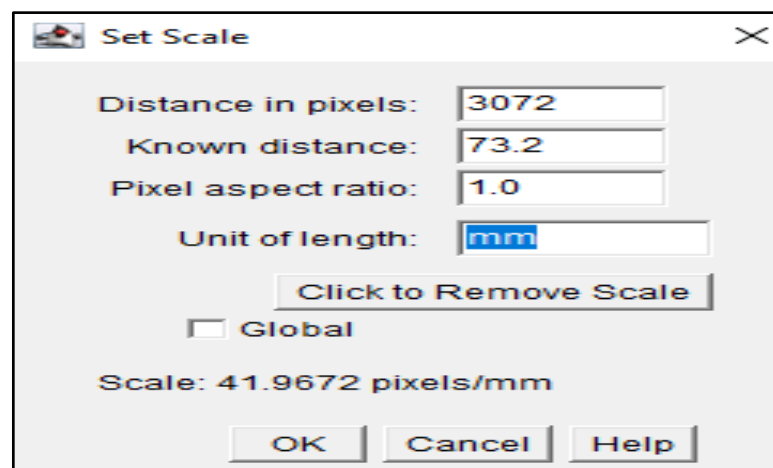


Ilustración 20-3: Escala de fotografía para análisis de inclusiones

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

5. Se coloca una línea sobre lo que se desea medir y se presiona la tecla M.

3.6.2.4. Dureza Rockwell C

Al tratarse de aceros templados, martensíticos, para medir su resistencia a ser penetrados por otro elemento más duro se realiza un ensayo de dureza Rockwell, empleando la escala C, un indentador de diamante y una precarga de 10 kgf (98 N) de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM E18-15.

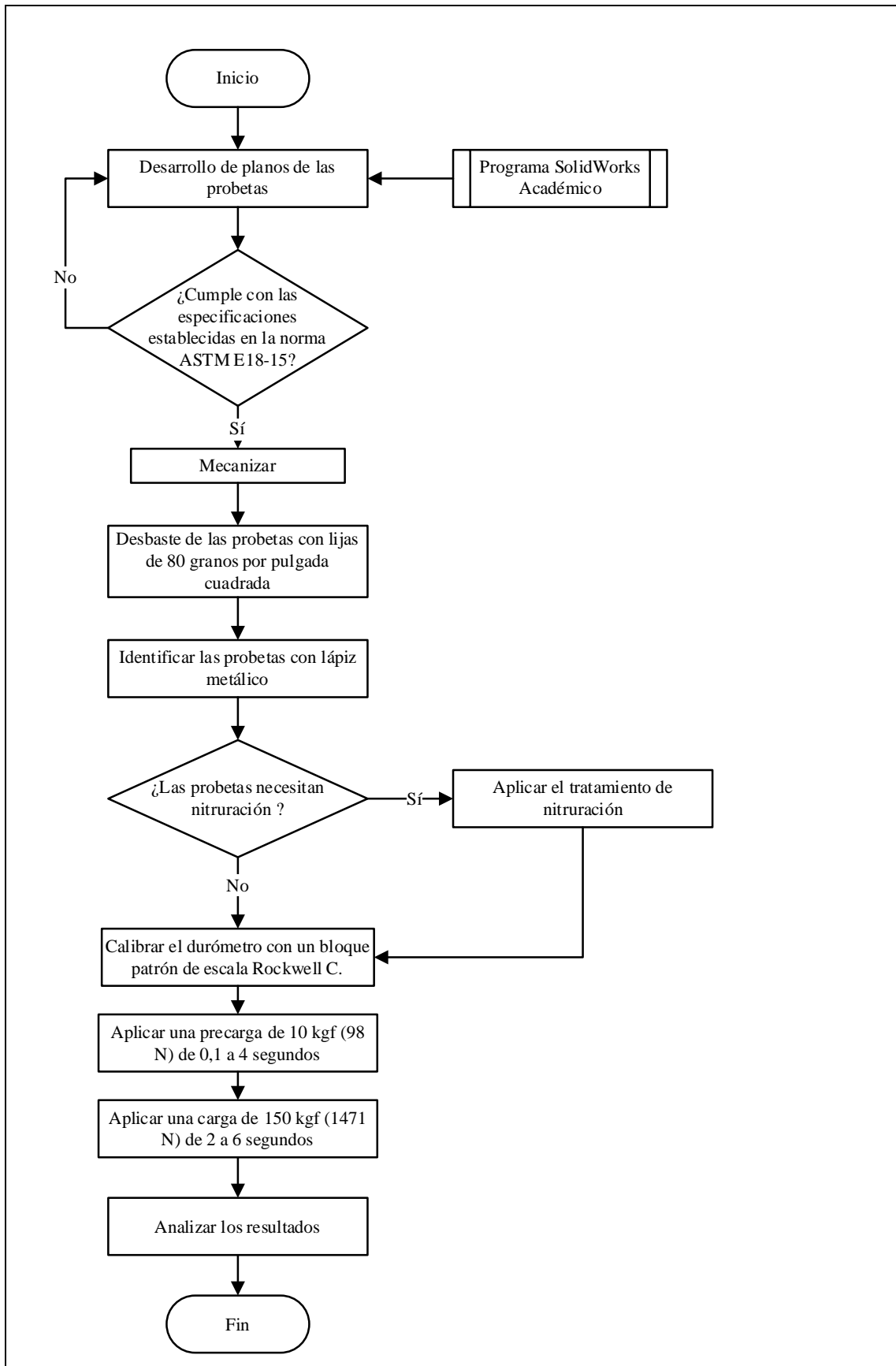


Ilustración 21-3: Procedimiento para ensayo de dureza Rockwell C.

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Fases del ensayo:

1. Preparación de muestras, la norma menciona que la superficie de los especímenes debe ser plana. En cuanto a las dimensiones de las probetas no está normado, sin embargo, se usan las probetas cilíndricas empleadas en el ensayo metalográfico de 24 mm de diámetro y 20 mm de alto.
2. Verificar que el equipo este calibrado, mediante el uso de un bloque patrón que debe estar en la misma escala a fin de obtener valores de resistencia a la penetración precisos.
3. Se pone en contacto el indentador de cono de diamante con la muestra.
4. Se aplica una precarga de 10 kgf sobre la muestra durante un segundo.
5. Se acciona la palanca con el propósito de aplicar una carga de 150 kgf sobre la probeta.
6. Luego de 4 segundos, se retira dicha carga regresando la palanca a su posición original.

Se observa el valor de dureza de manera directa en la pantalla del durómetro. Este procedimiento se aplica tanto para las probetas nitruradas, así como para las no nitruradas, se sugiere realizar 5 mediciones y obtener un valor de dureza medio aplicando la siguiente ecuación.

$$HRC = \frac{HRC_1 + HRC_2 + \dots + HRC_n}{n}$$

Donde:

n= número de veces que se realiza el ensayo

Cabe indicar que la norma establece la separación que debe existir entre cada medición, como se aprecia en la Ilustración 22-3.

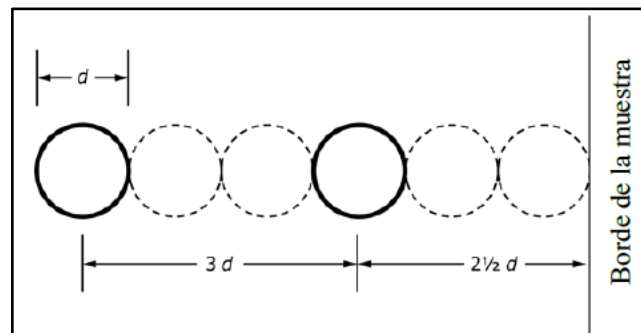


Ilustración 22-3: Distancia entre huellas de indentador


Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Donde:

d = diámetro de la huella del indentador.

Durómetro

Tabla 12-3: Características del durómetro

Durómetro Universal	Características
<p>Es un instrumento de prueba de dureza universal para la medición de la escala de Brinell, Rockwell y Vickers.</p> 	<p>Marca: <i>Huayin</i></p> <p>Modelo: HRBV – 187,5</p> <p>Voltaje: 220 V</p> <p>Prueba de fuerza:</p> <p>Brinell: 1839, 612,9, 306,5 N (187,5, 62,5, 31,25 kgf)</p> <p>Rockwell:</p> <ul style="list-style-type: none">• Ensayo de menor fuerza: 98,07 N (10 kgf).• Ensayo de fuerza total: 14741, 980,7, 588,4 N (150, 100, 60 kgf): <p>Vickers: 980,7, 294,2 N (100,30 kgf)</p> <p>Dimensiones: 480x250x760 mm</p> <p>Ubicación: Laboratorio de Ingeniería de materiales – ESPOCH - Riobamba</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3.6.2.5. Micro Dureza Vickers

Al tratarse de aceros tratados térmicamente con nitruración, se procede a medir la variación de la dureza en la capa de nitruro, desde la superficie hacia el núcleo del acero, para lo que, se emplea la dureza Vickers, con un indentador de cono de diamante y una carga de 10 gf (0,098 N) de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM E384-17. Para realizar este ensayo es preciso realizar un corte longitudinal a las probetas nitruradas empleando la cortadora de cinta.

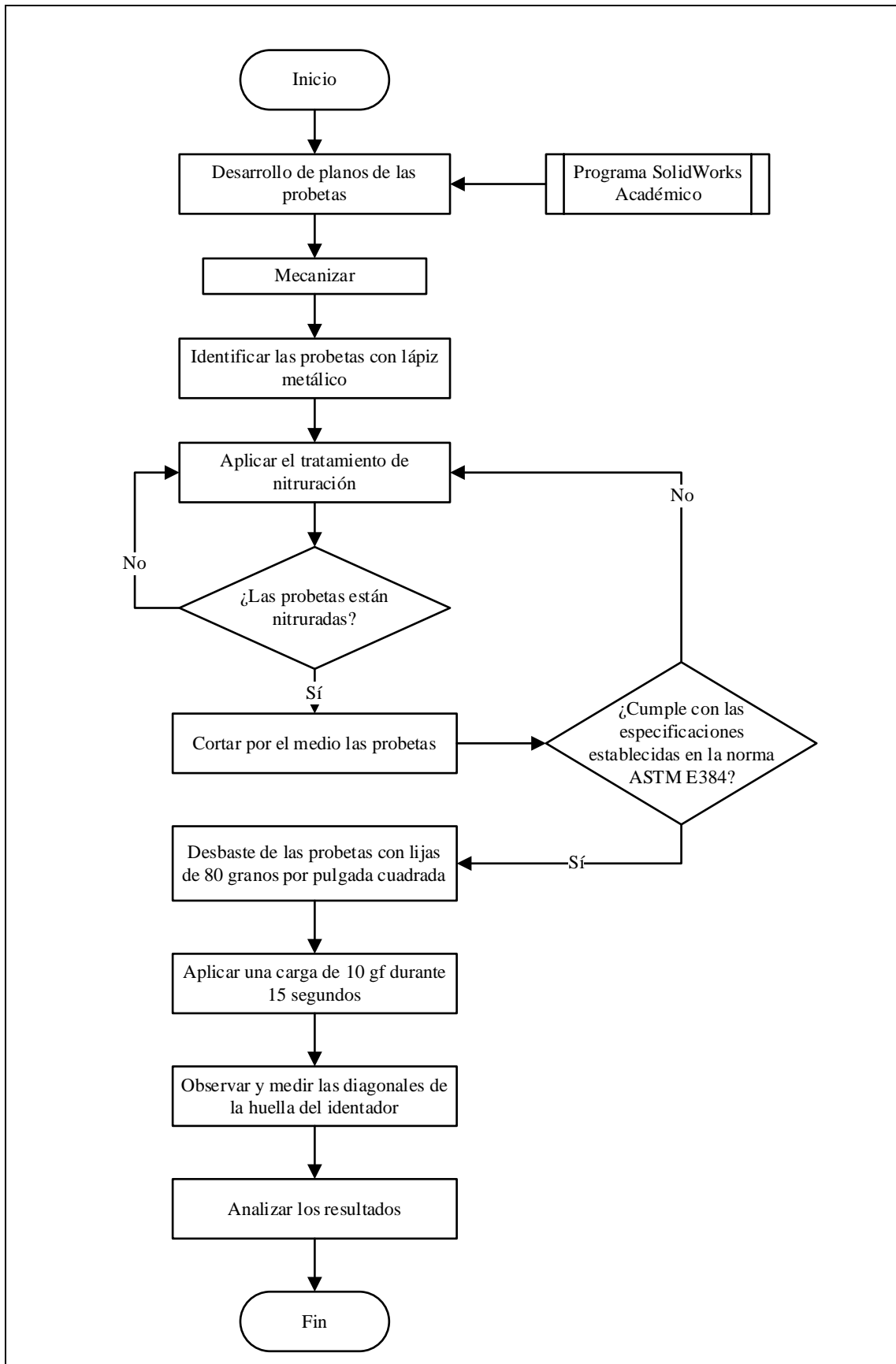


Ilustración 23-3: Procedimiento para ensayo de micro dureza Vickers.

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Fases del ensayo:

1. Preparación de muestras, la norma ASTM 384 especifica que la que la superficie de los especímenes debe ser plana y libre de impurezas. En cuanto a las dimensiones de las probetas no está normado, sin embargo, se usan las probetas cilíndricas empleadas en el ensayo de dureza Rockwell C de 24 mm de diámetro y 20 mm de alto, para medir la dureza de la nitruración de cada material, se realiza un corte en el eje de revolución y así determinar la resistencia desde la superficie hacia el núcleo del material.
2. Verificar que el equipo este calibrado, mediante el uso de un bloque patrón que debe estar en la misma escala a fin de obtener valores de resistencia a la penetración precisos.
3. Se pone en contacto el indentador de cono de diamante en la superficie de la muestra.
4. Se aplica una carga de 10 gf sobre la muestra durante 15 segundos.
5. Con el microscopio del durómetro Vickers se observa y se miden las diagonales de la muestra del indentador sobre la probeta.

El valor de dureza Vickers se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

$$HV = 1854,4 * \frac{F(gf)}{\left(\frac{D_1 + d_2}{2}\right)^2 (\mu m)^2}$$

Donde:

F = carga aplicada

D_1 = diagonal mayor

d_2 = diagonal menor

Cabe indicar que la norma establece la separación que debe existir entre cada medición, como se aprecia en la Ilustración 24-3.

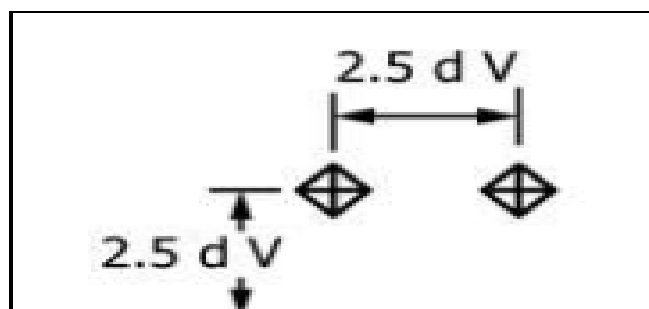


Ilustración 24-3: Distancia entre huellas de indentador

Fuente: ASTM E384, 2017

Donde:

dv = diagonal vickers

Micro durómetro Vickers

Tabla 13-3: Características del durómetro Vickers

Micro durómetro Vickers	Características
<p>Es un instrumento de prueba que permite medir la dureza de elementos delgados.</p> 	<p>Marca: Buehler Modelo: B-M83195 Voltaje: 120 V AC Prueba de fuerza: (10 g, 25g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g, 1 kg) Objetivos: 100 X, 400 X Ubicación: Laboratorio de Ingeniería de materiales – ESPOCH - Riobamba</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpolación

Para obtener una referencia en la variación de la dureza en el proceso de nitruración, los valores de dureza Vickers se transforma en la escala Rockwell C permitiendo así conocer la resistencia del material a diferentes distancias desde la superficie de cada una de las probetas; para dicha transformación se utiliza la tabla de la norma ASTM E-140-02.

Tabla 14-3: Conversión de Dureza

Tabla de conversiones E 140-02							
Dureza Vickers (HRV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Dureza Vickers (HRV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Dureza Vickers (HRV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Dureza Vickers (HRV)	Dureza Rockwell C (HRC)
940	68	595	55	412	42	294	29
900	67	577	54	402	41	286	28
865	66	560	53	392	40	279	27
832	65	544	52	382	39	272	26
800	64	528	51	372	38	266	25
772	63	513	50	363	37	260	24
746	62	498	49	354	36	254	23
720	61	484	48	345	35	248	22
697	60	471	47	336	34	243	21
674	59	458	46	327	33	238	20
653	58	446	45	318	32		
633	57	434	44	310	31		
613	56	423	43	302	30		

Fuente: ASTM E-140, 2002

Al momento de presentar valores que no se encuentren definidos en la tabla anterior, se procede a interpolar los resultados mediante la siguiente ecuación.

$$y_x = y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} (y_1 - y_0)$$

Donde:

y_x = Valor interpolado u obtenido.

y_0 = valor equivalente del x_0 en una tabla o patrón de conversión.

y_1 = valor equivalente del x_1 en una tabla o patrón de conversión.

x = valor conocido en una escala distinta.

x_0 = un valor menor al valor conocido establecido en una tabla o patrón de conversión.

x_1 = valor mayor al valor conocido establecido en una tabla o patrón de conversión.

3.6.2.6. Impacto

Para el dimensionamiento y ejecución del ensayo de Impacto Charpy permitiendo determinar la tenacidad de cada tipo de acero, se aplica la norma ASTM E23.

Dimensionamiento de la probeta

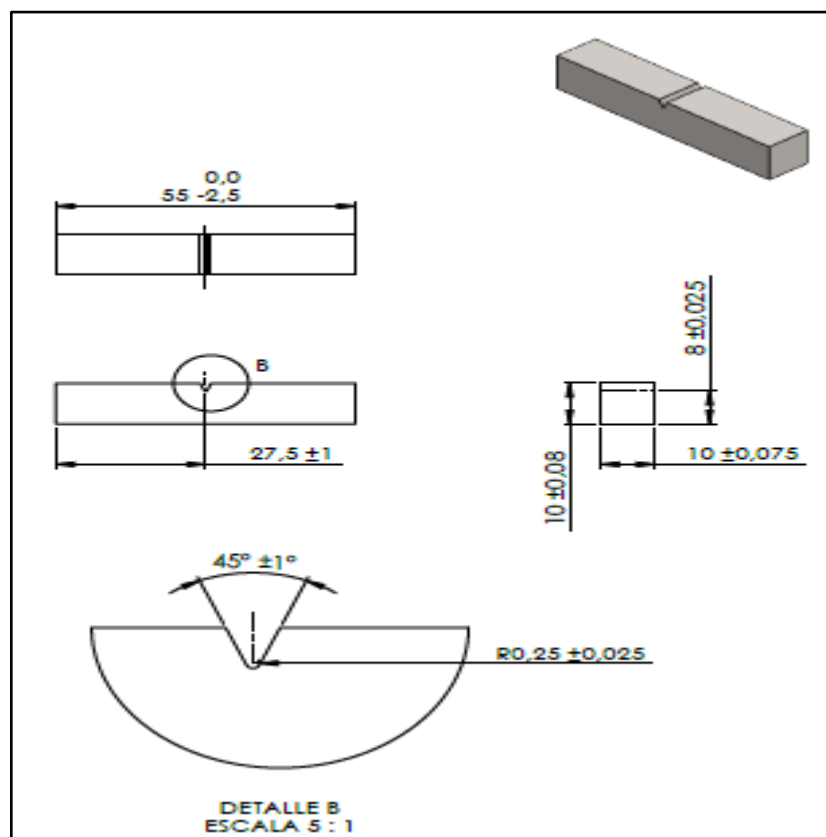


Ilustración 25-3: Probeta para ensayo de Impacto

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Procedimiento para ensayo de Impacto

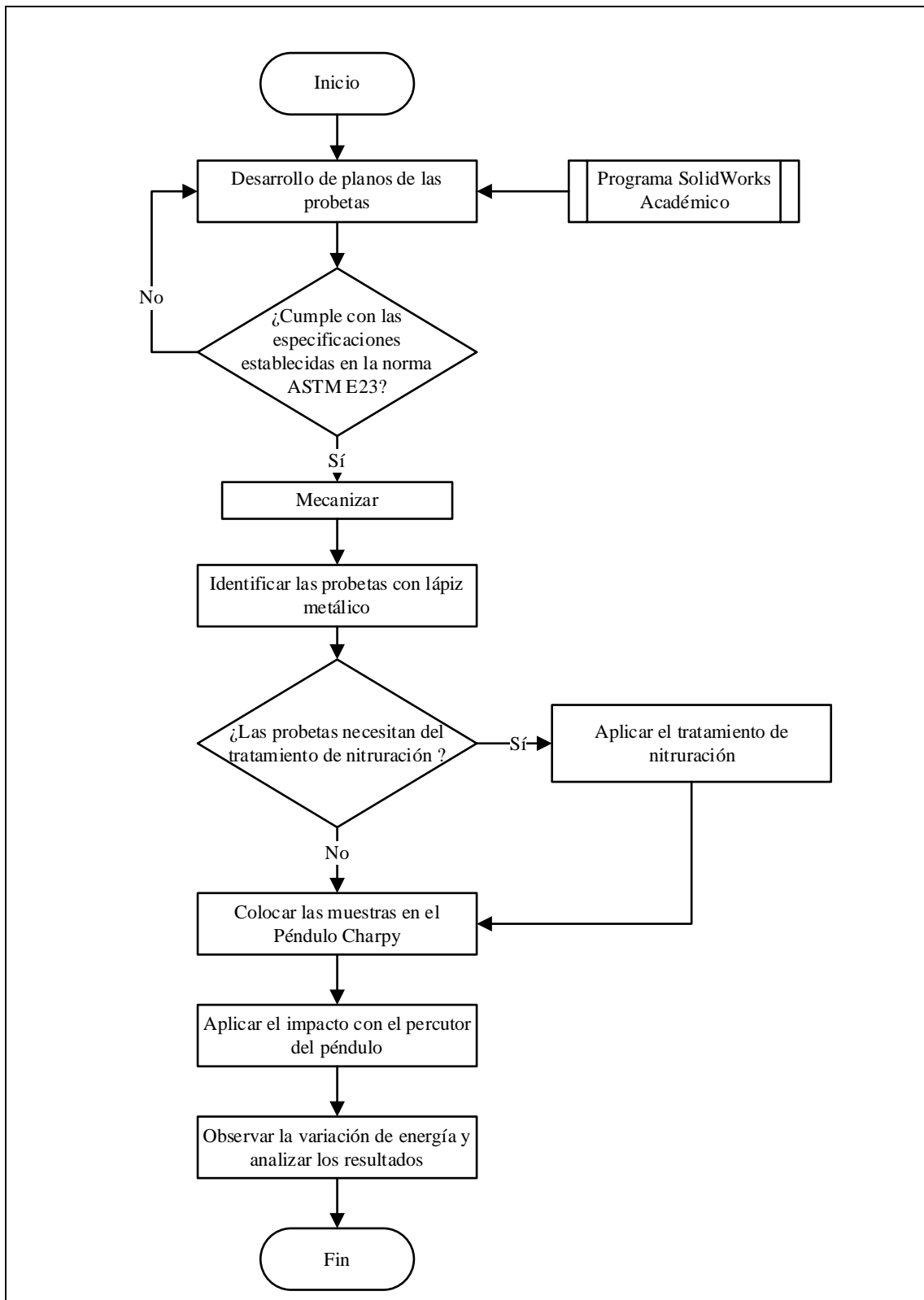


Ilustración 26-3: Procedimiento para ensayo de Impacto

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Marcas de identificación

Se deben colocar la identificación en los extremos a 10 mm o al lado donde la probeta mire hacia arriba cuando esté colocada en los yunques de la máquina, además también se lo puede colocar en el lado opuesto de la muesca de la probeta.

Preparación del Péndulo Charpy

Verificar que la máquina de impacto este calibrada antes de realizar el ensayo correspondiente, principalmente por medio de resultados en registros de ensayos previos, así como que la posición inicial esté marcada en el cero establecido.

Las condiciones óptimas para realizar el ensayo son: la fricción no debe de cambiar a más del 10%, así como la resistencia hacia el viento no debe de exceder al 0,4%.

Temperatura de prueba

La temperatura de prueba es responsabilidad de la persona encargada de efectuar este ensayo, pero se recomienda a una temperatura ambiente de aproximadamente 20°C aplicar una temperatura de prueba de 5°C.

Procedimiento de la prueba de impacto Charpy


Se recomienda colocar la probeta con pinzas autocentrantes, posteriormente se procede a golpear la probeta con el percutor para lograr romperla y obtener la energía de impacto en la báscula de la máquina.

Información de las pruebas de impacto

Para obtener la energía de impacto en los especímenes, se toma la diferencia entre la energía instantánea al momento del impacto y la energía después de romper la probeta, este valor se encuentra en la báscula de la máquina y puede ser corregida por la fricción y resistencia hacia el viento.

Péndulo Charpy

Tabla 15-3: Características del Péndulo Charpy

Péndulo Charpy	Características
<p>Se utiliza en ensayos para determinar la tenacidad de un material</p> 	<p>Marca: <i>Tinius Olsen</i></p> <p>Velocidad de impacto: 5,47 m/s</p> <p>Energía máxima: 406 J</p> <p>Mantenimiento: 2022</p> <p>Ubicación: Laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones del departamento de Ingeniería Mecánica – Escuela Politécnica Nacional -Quito</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3.6.2.7. Tracción

Se emplea la norma ASTM A0370-21: Para dimensionar las probetas, que se someterán a los ensayos de tracción, a fin de obtener el esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, así como la elongación de cada material, mientras que para la ejecución ensayo de tracción se especifica de manera más detallada en la norma ASTM E8.

Dimensionamiento de la probeta

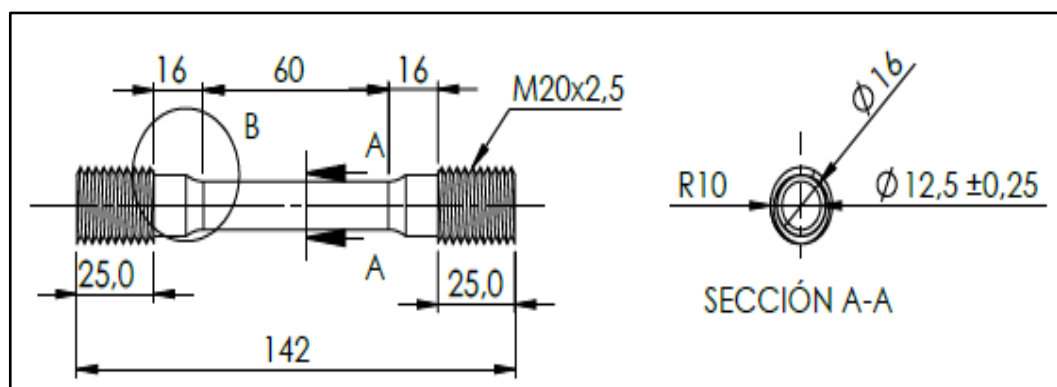


Ilustración 27-3: Probeta para ensayo de tracción

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Procedimiento para ensayo de tracción:

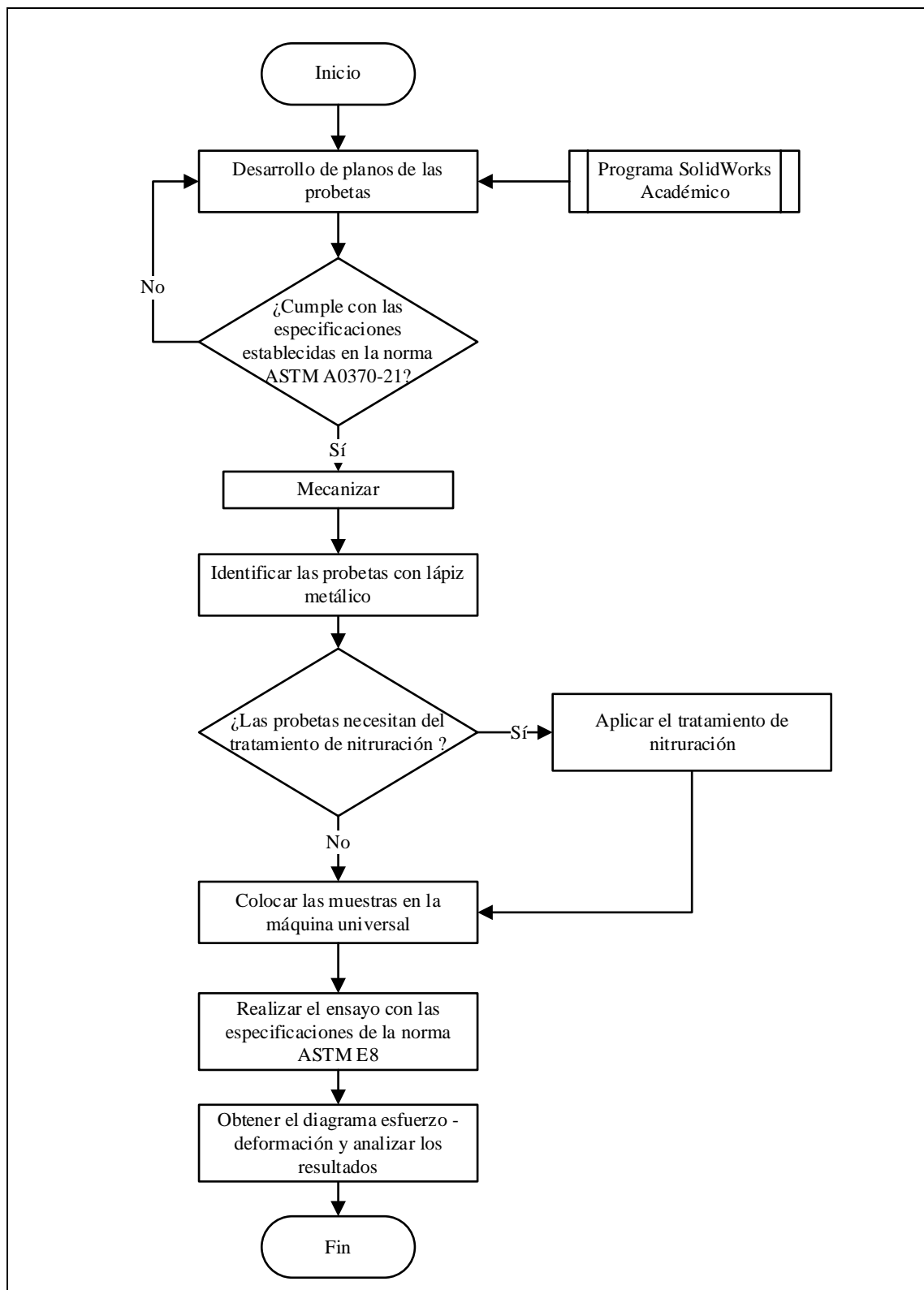


Ilustración 28-3: Procedimiento para ensayo de tracción

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Preparación de la máquina

1. Cuando la máquina universal se encuentre un tiempo prologando de inactividad, se recomienda realizar movimientos de calentamiento de la máquina para evitar o reducir errores al momento de poner en marcha la prueba de tensión.
2. Colocar la probeta en las mordazas de la máquina, procurando que el eje de las mordazas sea el mismo que el de la probeta, así como que el paso de la rosca sea el indicado y ajuste los correcto para que para evitar errores en las respectivas respuestas.
3. Además, se necesita que las fuerzas de sujeción de la probeta no superen el 20% del límite elástico nominal, mientras que las precargas estáticas no deben de superar el 10% del límite elástico nominal.

Diagrama esfuerzo-deformación

El diagrama esfuerzo-deformación se lo obtiene mediante el método autográfico, se grafican automáticamente en la pantalla del computador de la máquina universal, para posteriormente determinar los valores de las propiedades, tales como: esfuerzo de fluencia, carga máxima y resistencia a la tracción.

Máquina Universal

Tabla 16-3: Características de la máquina universal.

Máquina Universal	Características
<p>Es un equipo que aplica carga utilizando un sistema de mordazas, que ayuda a realizar el ensayo de tracción a las probetas a fin de medir las propiedades mecánicas de los materiales. Se pueden medir propiedades tales como la resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia, deformación; entre otras</p> 	<p>Marca: <i>Tinius Olsen</i> Modelo: 600 SL Tipo: Hidráulica Capacidad: 587 kN Calibración: 2022 Ubicación: Laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones del departamento de Ingeniería Mecánica – Escuela Politécnica Nacional -Quito</p>
	<p>Marca: Controls Tipo: Hidráulica Capacidad: 2000 kN Calibración: 2022 Ubicación: Laboratorio Ingeniería Civil - Universidad Técnica de Ambato – Ambato</p>

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3.6.2.8. Análisis estadístico Anova

Como se mencionó previamente, para el análisis de los resultados de los ensayos de dureza, impacto, así como para el de tracción se emplea la técnica de varianza ANOVA a partir de un diseño factorial 2^k , en el cual k representa el número de factores de variabilidad y 2 equivale a los niveles de estudio (un nivel alto y un nivel bajo) que tienen dichos factores; en el presente

trabajo se consideran 2 factores de variabilidad con 2 niveles cada uno, como se aprecia en la Tabla 17-3, obteniendo así un diseño factorial 2².

Tabla 17-3: Factores y niveles de estudio para el análisis ANOVA.

Factores de Variabilidad	Niveles de Estudio
Tratamiento de nitruración (Factor A)	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel alto: Con Nitruración (A+) • Nivel bajo: Sin Nitruración (A-)
Tipo de acero (Factor B)	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel alto: AISI 4340 (B+) • Nivel bajo: 34CrNiMo6 (B-)

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Además, cabe indicar que el modelo 2² consiste en 4 combinaciones que estudian tres efectos de interés, de los cuales dos son efectos principales (ocasionados por cada uno de los factores de variabilidad) y uno constituye el efecto de interacción entre dichos factores. En el presente trabajo se analiza los efectos sobre las propiedades de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6.

Para la aplicación de este modelo estadístico es necesario seguir el siguiente procedimiento:

1. Se plantean las hipótesis nula y alternativa, para los factores A y B, así como para la interacción de estos.
2. Ordenar los datos obtenidos de dureza, tenacidad, esfuerzo de fluencia, resistencia última de tracción y elongación, de acuerdo con la Tabla 18-3.

Tabla 18-3: Datos para el análisis Anova.

	Factores		Combinación de niveles	Réplicas			Total
	A	B		1	2	z	
Niveles	-	-	(A-), (B-)				
	+	-	(A+), (B-)				
	-	+	(A-), (B+)				
	+	+	(A+), (B+)				

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

3. Se hace uso de la nomenclatura de Yates, de acuerdo con el tipo de combinación de niveles de cada factor y su terminología representa la suma total de cada una de estas combinaciones; como se aprecia en la Tabla 19-3.

Tabla 19-3: Nomenclatura Yates

Combinación de niveles	Nomenclatura de Yates
A (-), B (-)	(1)
A (+), B (-)	a
A (-), B (+)	b
A (+), B (+)	ab

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4. Con ayuda de la nomenclatura de Yates, se determinan los contrastes de cada factor, así como el contraste de la interacción de estos; se aplica las siguientes ecuaciones:

$$C_A = a + ab - (1) - b$$

$$C_B = b + ab - (1) - a$$

$$C_{AB} = ab + (1) - a - b$$

Donde:

C_A = Contraste del factor tratamiento de nitruración.

C_B = Contraste del factor tipo de acero

C_{AB} = Contraste de la interacción de ambos factores

$a, b, ab, (1)$ = Nomenclatura de Yates

5. A partir de los contrastes se procede al cálculo tanto de efectos principales de los factores A y B, así como del efecto de interacción de dichos factores; se aplica las siguientes ecuaciones:

$$E_A = \frac{C_A}{2 * n}$$

$$E_B = \frac{C_B}{2 * n}$$

$$E_{AB} = \frac{C_{AB}}{2 * n}$$

Donde:

E_A = Efecto del factor tratamiento de nitruración

E_B = Efecto del factor tipo de acero

E_{AB} = Efecto de la interacción de ambos factores

n = Número de réplicas

6. Se calcula la suma de cuadrados (SC) empleando las siguientes ecuaciones:

$$SC_T = \sum (Y_{ij})^2 - \frac{(Y_{..})^2}{N}$$

$$SC_A = \frac{(C_A)^2}{2^k * n}$$

$$SC_B = \frac{(C_B)^2}{2^k * n}$$

$$SC_{AB} = \frac{(C_{AB})^2}{2^k * n}$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB}$$

Donde:

SC_T = Suma de cuadrados total

$\sum (Y_{ij})^2$ = Suma de cada dato elevado al cuadrado.

$Y..$ = Suma total de datos.

N = Número total de datos.

SC_A = Suma de cuadrados del factor: tratamiento termoquímico.

SC_B = Suma de cuadrados del factor: tipo de acero.

SC_{AB} = Suma de cuadrados de la interacción de ambos factores.

SC_E = Suma de cuadrados del error.

k = Número de factores.

7. Realizar el análisis Anova

a) Se determinan los grados de libertad (GL).

$$GL_A = GL_B = GL_{AB} = m - 1$$

$$GL_T = N - 1$$

$$GL_E = GL_T - GL_A - GL_B - GL_{AB}$$

Donde:

GL_A = Grados de libertad del factor: tratamiento termoquímico.

GL_B = Grados de libertad del factor: tipo de acero.

GL_{AB} = Grados de libertad de la interacción de ambos factores.

GL_E = Grados de libertad del error.

GL_T = Grados de libertad total.

m = Número de niveles.

b) Se calcula los cuadrados medios (CM), al dividir cada suma de cuadrados para su respectivo grado de libertad.

$$CM_A = \frac{SC_A}{GL_A}$$

$$CM_B = \frac{SC_B}{GL_B}$$

$$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{GL_{AB}}$$

$$CM_E = \frac{SC_E}{GL_E}$$

$$CM_T = \frac{SC_T}{GL_T}$$

Donde:

CM_A = Cuadrado Medio del factor: tratamiento termoquímico.

CM_B = Cuadrado Medio del factor: tipo de acero.

CM_{AB} = Cuadrado Medio de la interacción de ambos factores.

CM_E = Cuadrado Medio del error.

CM_T = Cuadrado Medio total.

c) Es preciso hallar el estadístico de Fisher (F_o) al dividir cada cuadrado medio para el cuadrado medio del error.

$$F_{oA} = \frac{CM_A}{CM_E}$$

$$F_{oB} = \frac{CM_B}{CM_E}$$

$$F_{oAB} = \frac{CM_{AB}}{CM_E}$$

Donde:

F_{oA} = Fisher calculado del factor: tratamiento termoquímico.

F_{oB} = Fisher calculado del factor: tipo de acero.

F_{oAB} = Fisher calculado de la interacción de ambos factores.

d) Mediante el uso de la Tabla 20-3 y considerando un nivel de confianza del 95% se determina el valor de Fisher crítico (F_c).

Tabla 20-3: Valores de Fisher para un nivel de confianza del 95 %

		Grados de libertad del factor y de la interacción						
		1	2	3	4	5	6	7
Grados de libertad del error	1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77
	2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35
	3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89
	4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09
	5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88
	6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21
	7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79
	8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50
	9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29
	10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14
	11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01
	12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91
	13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83
	14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76
	15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71

Fuente: Gutiérrez y Salazar, Román, 2008

e) Se compara los valores del estadístico de Fisher calculado con el valor tabulado, y se establece el criterio de decisión (C.D.).

Si $F_o < F_c$; No hay diferencia significativa (NS).

Si $F_o > F_c$; Hay diferencia significativa (S).

f) Se procede a estandarizar los efectos, y a determinar el efecto de referencia, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$Efecto\ Est\acute{a}ndar = \frac{Efecto}{\sigma_{efecto}}$$

$$\sigma_{efecto} = \sqrt{\frac{CM_E}{n * 2^{k-2}}}$$

$$efecto\ de\ referencia = inv.t - student(\alpha/2; GL_E)$$

Donde:

σ_{efecto} = desviación estándar del efecto

g) Finalmente, para poder apreciar de manera ilustrativa los resultados se hace uso del método gráfico de la diferencia mínima significativa o por sus siglas en inglés (LSD).

Se determina el valor LSD tanto para los factores A y B; así como para interacción de ambos.

$$LSD = t_{(\alpha/2;GL_E)} * \sqrt{\frac{CM_E}{u}}$$

Donde:

$t_{(\alpha/2;GL_E)}$ = Estadístico *t* – student.

α = nivel de confianza.

u = datos observados.

Se hallan los límites superior e inferior, así como la media para cada nivel de los factores A y B, así como también para las 4 combinaciones resultantes.

$$L.S. = \bar{X} + LSD$$

$$L.I. = \bar{X} - LSD$$

Donde:

L.S. = Límite superior.

L.I. = Límite inferior.

\bar{X} = media estadística.

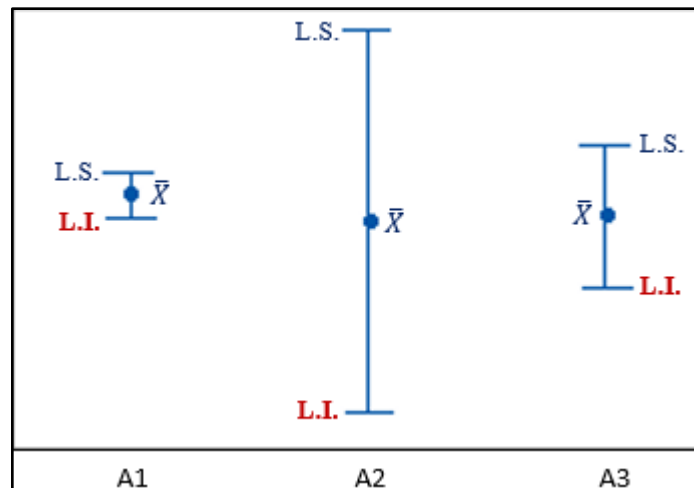


Ilustración 29-3: LSD Gráfico

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos luego de la ejecución de los ensayos descritos en el capítulo anterior, con el objeto de analizar las propiedades mecánicas tanto en el acero AISI 4340 así como en el 34CrNiMo6 antes y después de la aplicación del tratamiento termoquímico de nitruración por sales.

4.1. Espectrometría

En la Tabla 1-4 y Tabla 2-4 se observan las composiciones químicas de los materiales, mismas que se comparan con los valores proporcionados por el catálogo de Thyssenkrupp Steel, a fin de determinar si los elementos corresponden a los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6.

4.1.1. Espectrometría del acero AISI 4340

Tabla 1-4: Composición química del acero AISI 4340

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	S [%]	P [%]
Análisis Bruker	0,397	0,262	0,762	0,753	2,105	0,217	<0,0030	<0,0030
Thyssenkrupp Steel	0,38-0,43	0,15-0,3	0,6-0,8	0,7-0,9	1,65-2,00	0,2-0,3	≤0,04	≤0,035

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

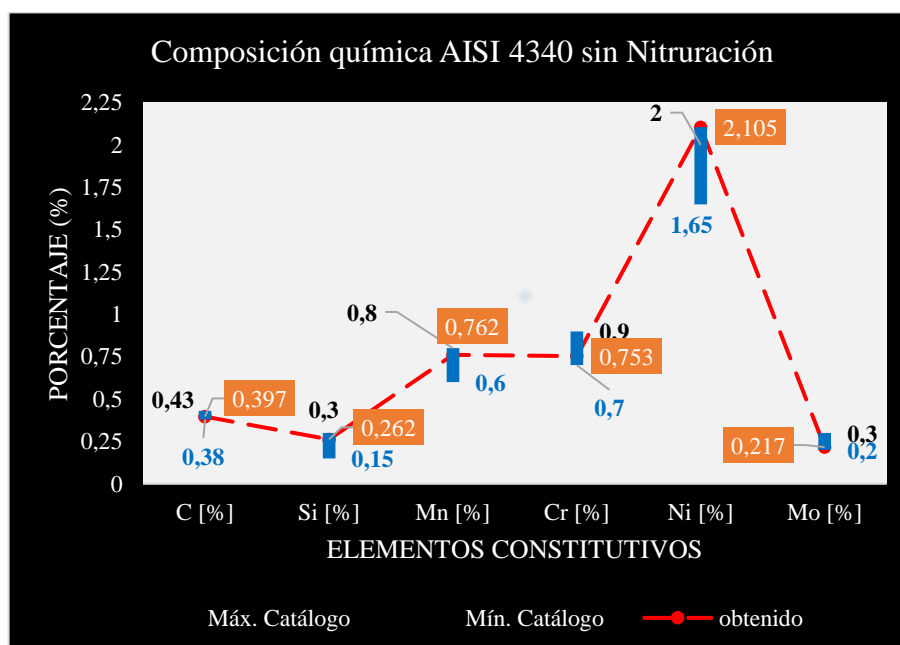


Ilustración 1-4: Composición química del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.1.2. Espectrometría del acero 34CrNiMo6

Tabla 2-4: Composición química del acero 34CrNiMo6

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	S [%]	P [%]
Análisis Bruker	0,347	0,378	0,779	1,488	1,616	0,222	<0,0030	<0,0030
Thyssenkrupp Steel	0,3-0,38	≤0,4	0,5-0,8	1,3-1,7	1,3-1,7	0,15-0,3	≤0,035	≤0,035

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

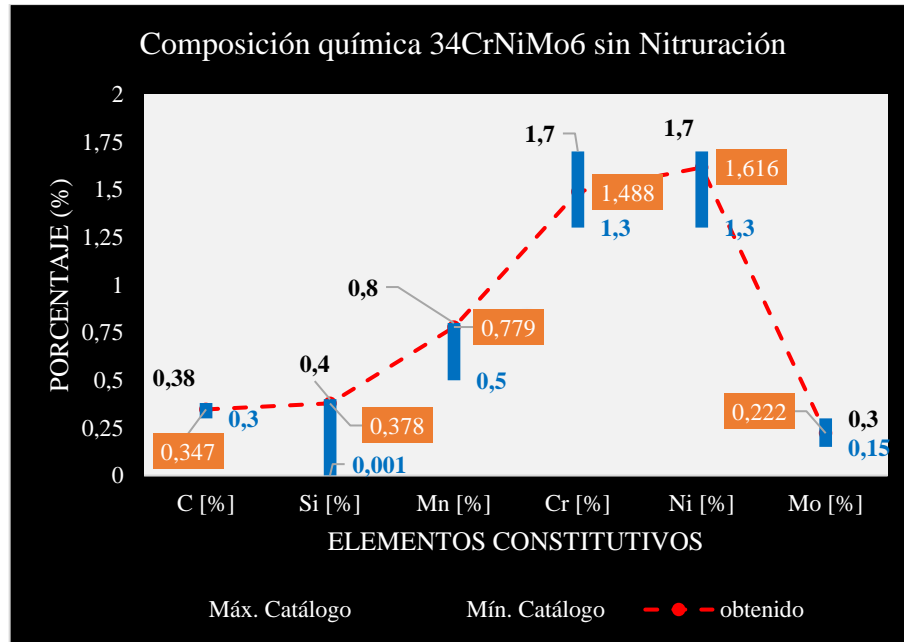


Ilustración 2-4: Composición química del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.2. Metalografía

Mediante el uso del microscopio *Nikon Eclipse E200* se obtuvo dos ilustraciones para definir las microestructuras de los Aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6, con lentes objetivos de 10X y 40X. Se determina la mejor fotomicrografía de cada acero y por cada lente objetivo y se las compara con las fotomicrografías del *ASM Metals Handbook, Vol 09*, y de esta manera determinar el microconstituyente de ambos aceros.

4.2.1. Metalografía del Acero AISI 4340



Ilustración 3-4: Microestructura del acero AISI 4340, lente objetivo 10x.

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

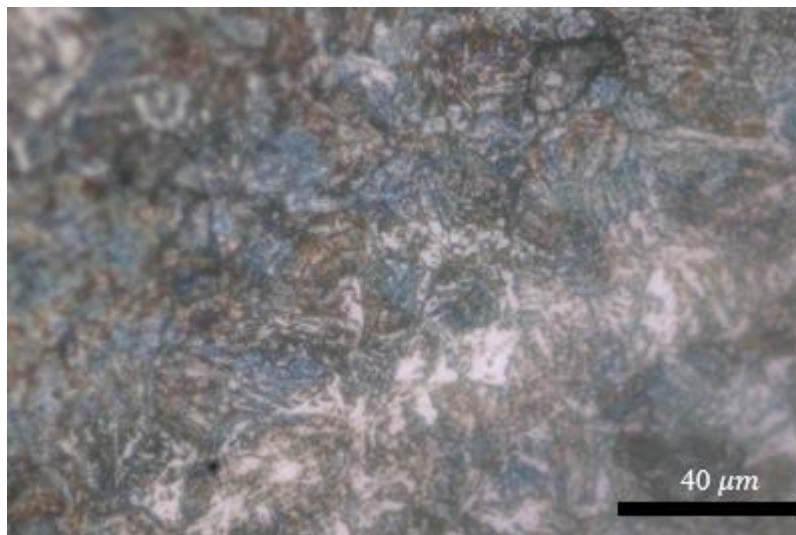


Ilustración 4-4: Microestructura del acero AISI 4340, lente objetivo 40x.

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.



Ilustración 5-4: Microestructura del acero AISI 4340

Fuente: American Society For Metals, 1972.

Interpretación: Haciendo la comparación con la microestructura del *ASM Metals Handbook, Vol 09* se obtiene que el acero AISI 4340 presenta una concentración predominante del microconstituyente martensita, tal y como se muestra en la Ilustración 5-4.

4.2.2. Metalografía del acero 34CrNiMo6



Ilustración 6-4: Microestructura del acero 34CrNiMo6, lente objetivo 10X.

Realizado por: Casanova, B.; Muñoz A. 2022

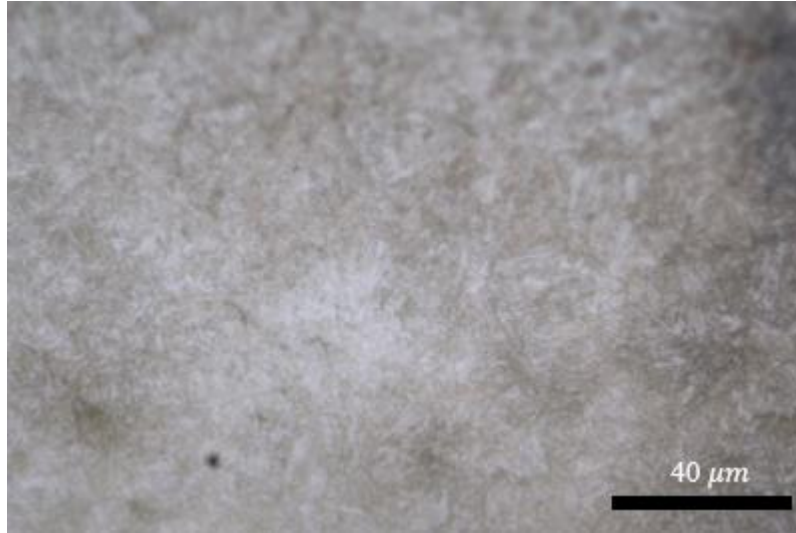


Ilustración 7-4: Microestructura del acero 34CrNiMo6, lente objetivo 40X.

Realizado por: Casanova, B.; Muñoz A. 2022



Ilustración 8-4: Microestructura con predominancia de martensita.

Fuente: American Society For Metals, 1972.

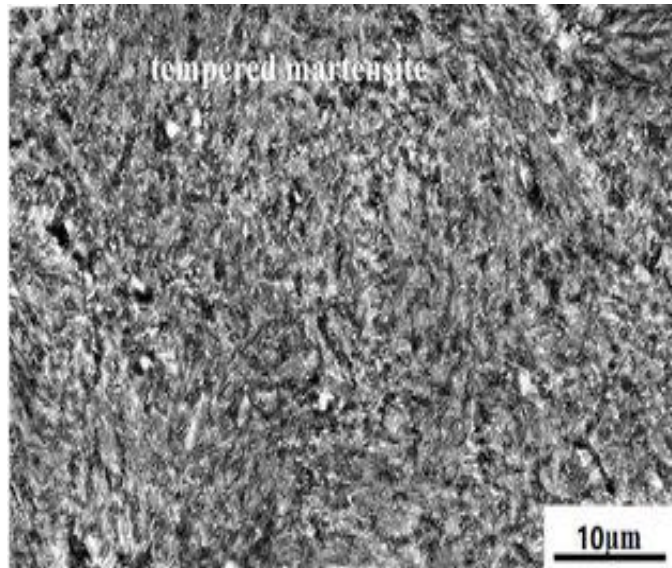


Ilustración 9-4: Microestructura del acero 34CrNiMo6.

Fuente: Liang et al., 2020.

Interpretación: Haciendo la comparación con la microestructura del *ASM Metals Handbook, Vol 09* se obtiene que el acero 34CrNiMo6 presenta una concentración predominante del microconstituyente martensita, tal y como se muestra en la Ilustración 8-4, además de otra comparación con el artículo científico: *Microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel repaired by laser remelting*, como se indica en la Ilustración 9-4.

4.3. Inclusiones no metálicas

Para las inclusiones no metálicas se tomaron 6 fotomicrografías tanto para el acero AISI 4340 y el acero 34 CrNiMo6, donde se identifica los tipos de inclusiones, así como la serie a la que pertenece.

4.3.1. Inclusiones no metálicas del acero AISI 4340

Se encontró en cada una de las seis fotomicrografías con el tipo de inclusión D, grado de severidad y serie que se resumen en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Inclusiones no metálicas del acero AISI 4340

Fotomicrografía	Número de óxidos	Tipo de inclusión	Diámetro (µm)	Severidad	Serie
1	102	D	9,44	5	Gruesa
2	136	D	8,52	5	Gruesa
3	27	D	8,16	2,5	Gruesa
4	126	D	9,94	5	Gruesa
5	137	D	7,42	5	Delgada
6	80	D	8,62	4	Gruesa

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se determinó que en todas las fotomicrografías las inclusiones de tipo D u óxidos globulares, donde en la fotomicrografía 1 existen 102 óxidos globulares con una severidad de 5 con una serie gruesa, fotomicrografía 2 existen 136 óxidos globulares con una severidad de 5 con una serie gruesa, fotomicrografía 3 existen 27 óxidos globulares con una severidad de 2,5 con una serie gruesa, fotomicrografía 4 existen 126 óxidos globulares con una severidad de 5 con una serie gruesa, fotomicrografía 5 existen 137 óxidos globulares con una severidad de 5 con una serie delgada y la fotomicrografía 6 existen 80 óxidos globulares con una severidad de 4 con una serie gruesa, como existe una severidad alta en las 5 fotomicrografías esto provoca que el acero AISI 4340 sus propiedades se vean afectadas, es decir que su valor nominal se verá reducido y tendrá mayores probabilidades de fallar.

Posteriormente se procese a comprar cada una de las fotomicrografías con su respectiva morfología que se encuentra en la Norma ASTM E45.



Ilustración 10-4: Fotomicrografía 1 del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 3-4 se obtiene inclusiones del tipo D, son 102 óxidos globulares con una severidad de 5 de serie gruesa, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 11-4.

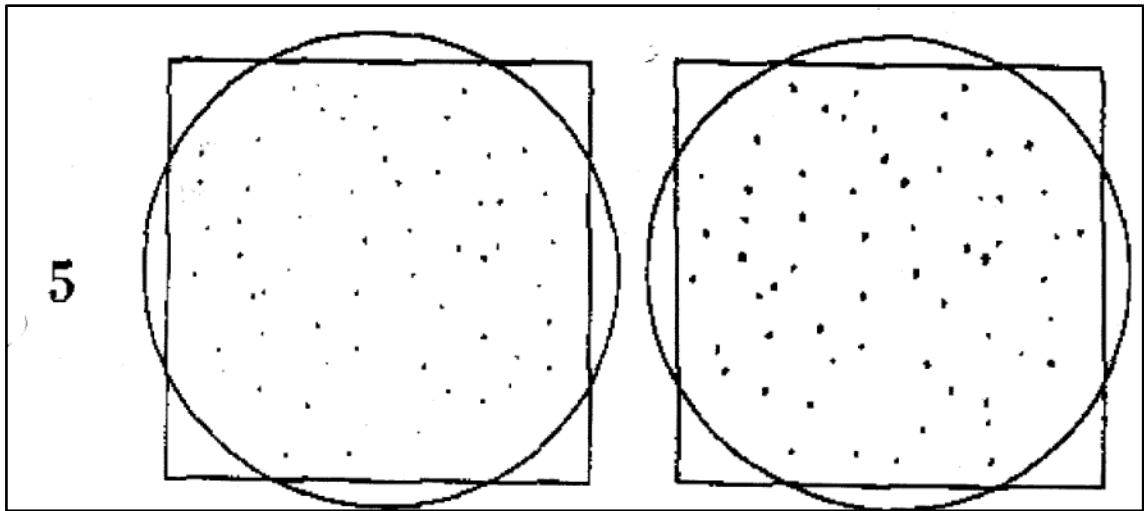


Ilustración 11-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 5

Fuente: ASTM E45-11, 2011

Interpretación: Con 102 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 5, así como de serie gruesa, así como en la Ilustración 11-4 en la fotomicrografía derecha.

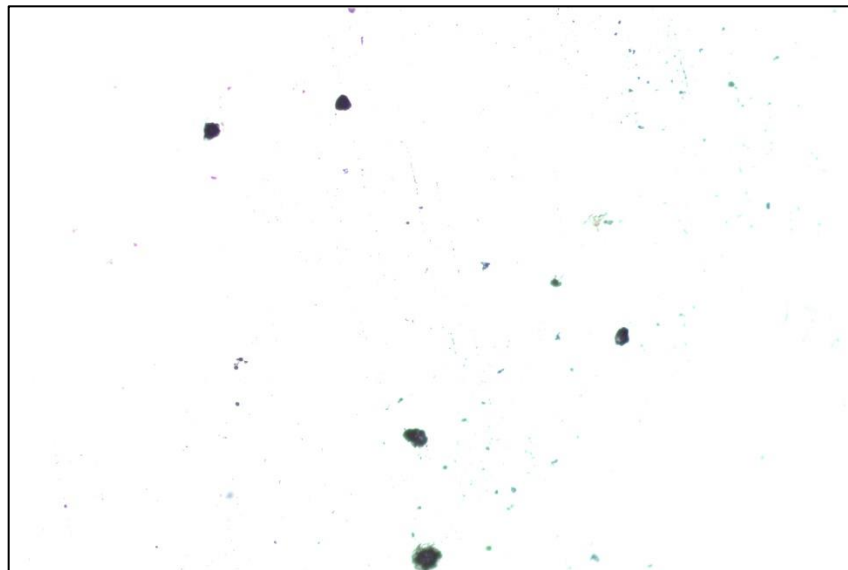


Ilustración 12-4: Fotomicrografía 2 del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 3-4 se obtiene inclusiones del tipo D, son 136 óxidos globulares con una severidad de 5 de serie gruesa, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 12-4.

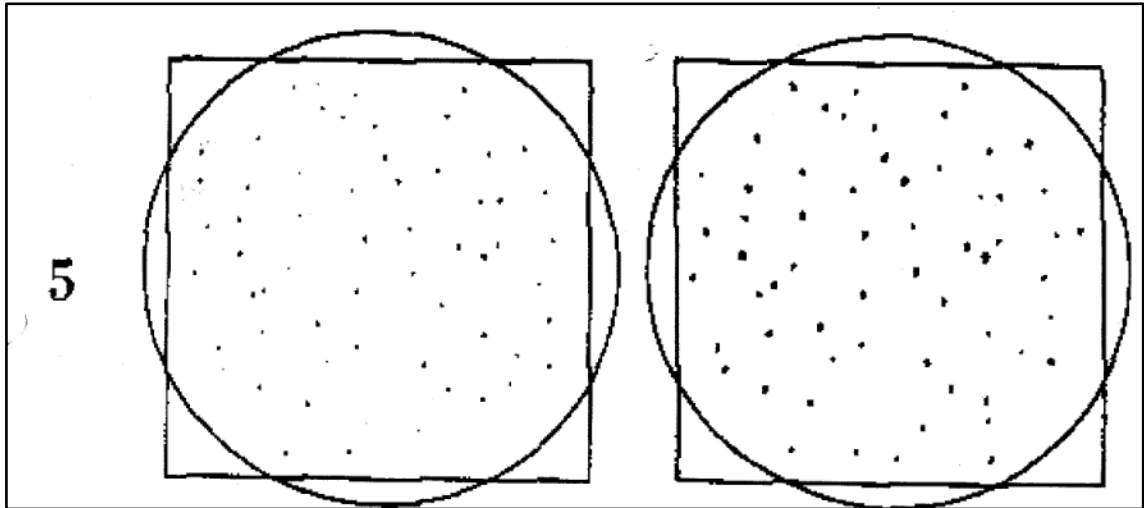


Ilustración 13-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 5

Fuente: ASTM E45-11, 2011

Interpretación: Con 136 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 5, así como de serie gruesa, así como en la Ilustración 13-4 en la fotomicrografía derecha.

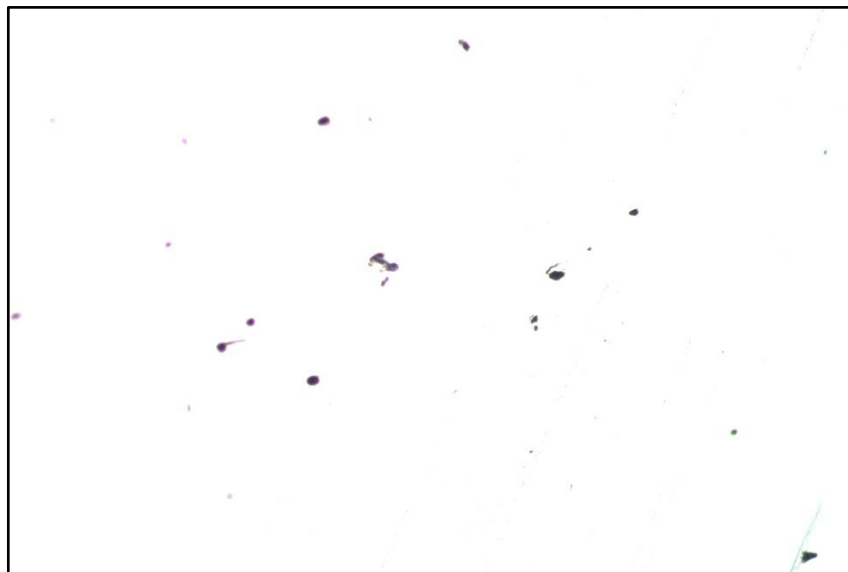


Ilustración 14-4: Fotomicrografía 3 del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 3-4 se obtiene inclusiones del tipo D, son 27 óxidos globulares con una severidad de 2,5 de serie gruesa, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 14-4.

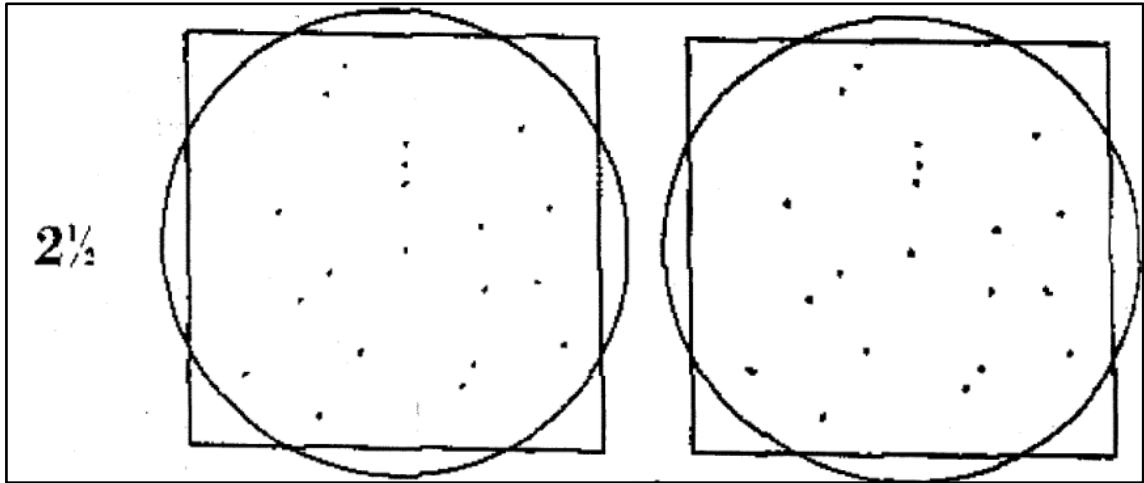


Ilustración 15-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 2,5

Fuente: ASTM E45-11, 2011

Interpretación: Con 27 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 2,5, así como de serie gruesa, así como en la Ilustración 15-4 en la fotomicrografía derecha.

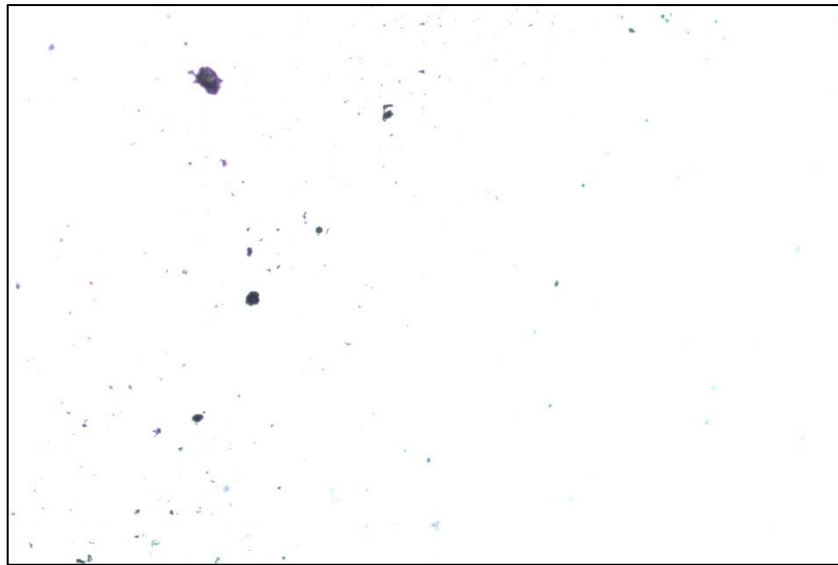


Ilustración 16-4: Fotomicrografía 4 del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 3-4 se obtiene inclusiones del tipo D, son 126 óxidos globulares con una severidad de 5 de serie gruesa, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 16-4.

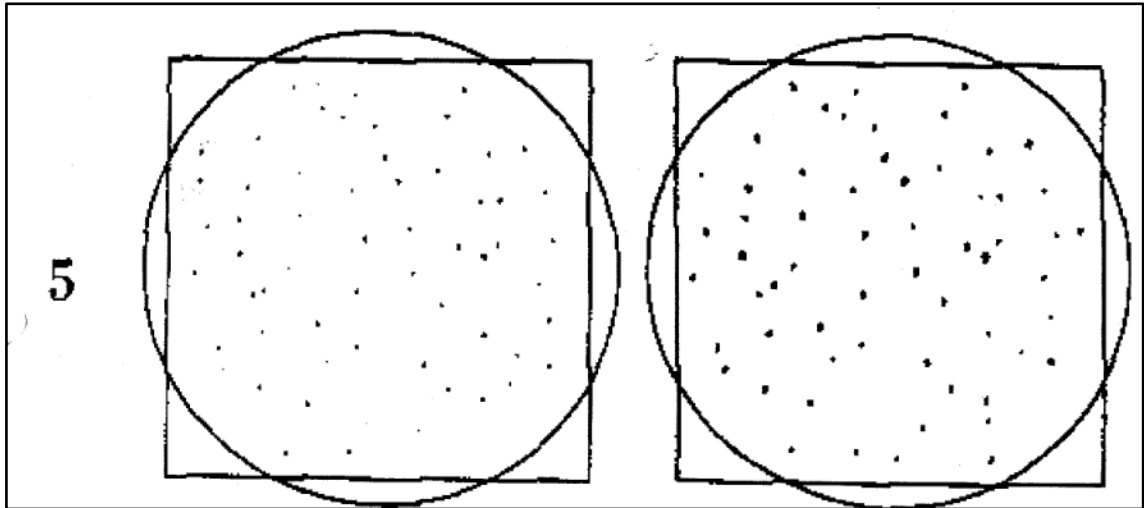


Ilustración 17-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 5

Fuente: ASTM E45-11, 2011

Interpretación: Con 126 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 5, así como de serie gruesa, así como en la Ilustración 17-4 en la fotomicrografía derecha.

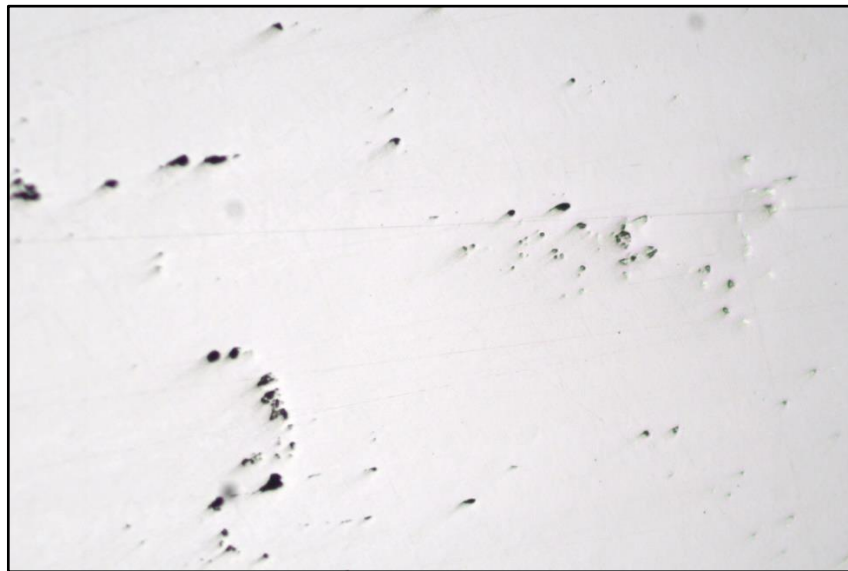


Ilustración 18-4: Fotomicrografía 5 del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 3-4 se obtiene inclusiones del tipo D, son 137 óxidos globulares con una severidad de 5 de serie delgada, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 18-4.

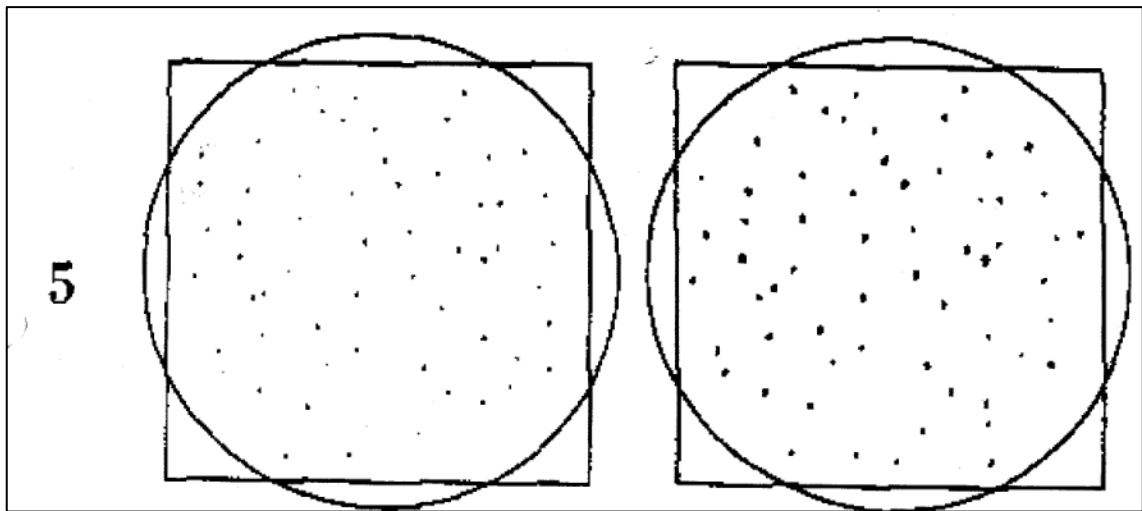


Ilustración 19-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 5

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 137 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 5, así como de serie delgada, así como en la Ilustración 19-4 en la fotomicrografía izquierda.



Ilustración 20-4: Fotomicrografía 6 del acero AISI 4340

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 3-4 se obtiene inclusiones del tipo D, son 80 óxidos globulares con una severidad de 4 de serie gruesa, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 20-4.

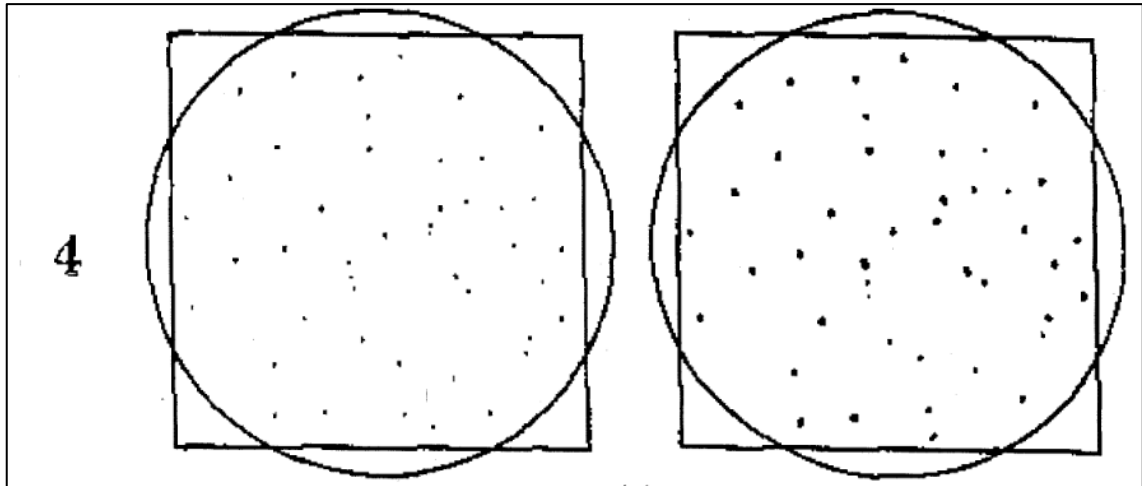


Ilustración 21-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 4

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 80 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 4, así como de serie gruesa, así como en la Ilustración 21-4 en la fotomicrografía derecha.

4.3.2. Inclusiones no metálicas del acero 34CrNiMo6

Se encontró en cada una de las seis fotomicrografías varios tipos de inclusiones, grado de severidad y serie que se resumen en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Inclusiones no metálicas del acero 34CrNiMo6.

Fotomicrografía	Tipo de Inclusión	Longitud (mm)	Número de óxidos	Severidad	Ancho (μm)	Serie
1	A	4,666		0,5	2,946	Delgada
	B	10,626		1,0	7,581	Delgada
	C	22,184		1,5	5,004	Gruesa
	D		78	4,0		Gruesa
2	A	6,841		0,5	6,434	Gruesa
	B	8,948		1,0	7,434	Delgada
	C	46,996		2,0	10,717	Gruesa
	D		42	3,0		Delgada
3	A	8,826		0,5	7,114	Gruesa
	B	10,059		1,0	5,005	Delgada
	C	17,101		1,0	4,289	Delgada
	D		38	3,0		Delgada
4	A	14,329		1,0	11,854	Gruesa
	B	6,798		0,5	7,863	Delgada
	C	31,127		1,5	10,723	Gruesa
	D		72	4,0		Delgada
5	A	15,510		1,0	11,678	Gruesa
	B	12,533		1,0	11,432	Gruesa
	C	20,618		1,5	10,011	Gruesa
	D		40	3,0		Delgada
6	A	13,226		1,0	6,435	Gruesa
	B	15,764		1,0	7,318	Delgada
	C	17,781		1,5	4,290	Delgada
	D		74	4,0		Delgada

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se determinó que en la fotomicrografía 1 existen los 4 tipos de inclusiones, A, B, C y D, donde existen 78 óxidos globulares con una severidad de 4 con una serie gruesa, siendo la mayor de los demás tipos de inclusiones, en la fotomicrografía 2 existen los 4 tipos de inclusiones, A, B, C y D, donde existen 42 óxidos globulares con una severidad de 3 con una serie delgada, siendo la mayor de los demás tipos de inclusiones, en la fotomicrografía 3 existen los 4 tipos de inclusiones, A, B, C y D, donde existen 38 óxidos globulares con una severidad de 3 con una serie delgada, siendo la mayor de los demás tipos de inclusiones, en la fotomicrografía 4 existen los 4 tipos de inclusiones, A, B, C y D, donde existen 72 óxidos globulares con una severidad de 4 con una serie delgada, siendo la mayor de los demás tipos de inclusiones, en la fotomicrografía 5 existen los 4 tipos de inclusiones, A, B, C y D, donde existen 40 óxidos globulares con una severidad de 3 con una serie delgada, siendo la mayor de los demás tipos de inclusiones, en la fotomicrografía 6 existen los 4 tipos de inclusiones, A, B, C y D, donde existen 74 óxidos globulares con una severidad de 4 con una serie delgada, siendo la mayor de los demás tipos de inclusiones, como existe una severidad alta en las 6 fotomicrografías esto provoca que el acero 34CrNiMo6 sus propiedades se vean afectadas, es decir que su valor nominal se verá reducido y tendrá mayores probabilidades de fallar.

Posteriormente se procese a comparar cada una de las fotomicrográficas con su respectiva morfología que se encuentra en la Norma ASTM E45.



Ilustración 22-4: Fotomicrografía 1 del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 4-4 se obtiene los 4 tipos de inclusiones, donde el tipo A es de severidad 0,5 con serie delgada, el tipo B presenta una severidad de 1 con serie delgada, el tipo C presenta una severidad de 1,5 con serie gruesa y por último el tipo D son 78 óxidos globulares con una severidad de 4 de serie gruesa, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 23-4, Ilustración 24-4, Ilustración 25-4 e Ilustración 26-4.

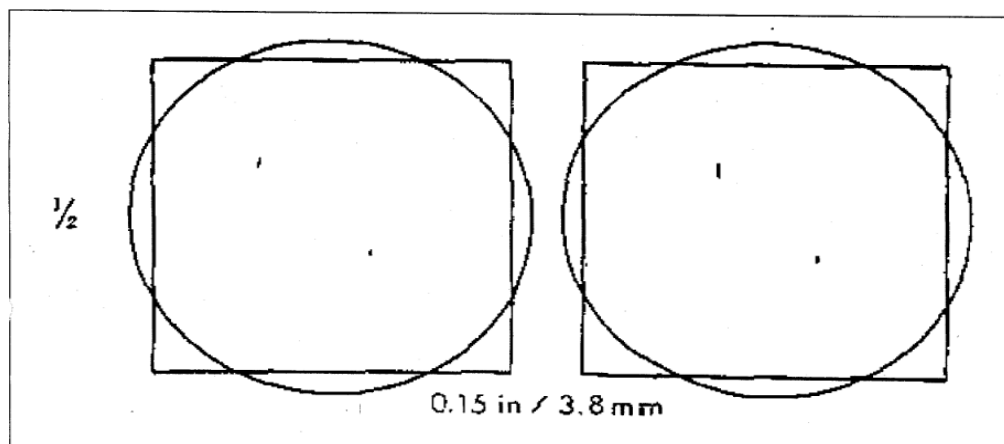


Ilustración 23-4: Inclusión no metálica tipo A, severidad 0,5

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 4,666 mm se comprueba que tiene una severidad de 0,5, así como un ancho de 2,946 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 23-4 en la fotomicrografía izquierda.

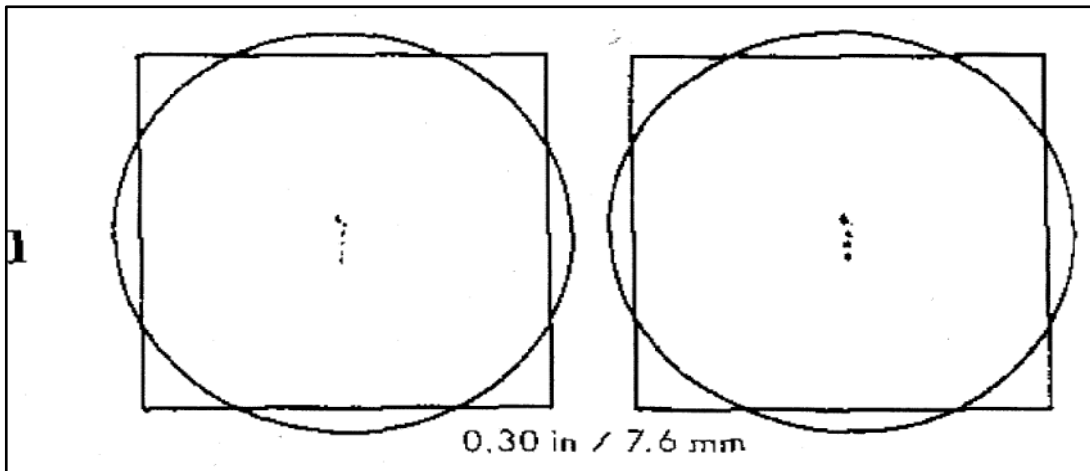


Ilustración 24-4: Inclusión no metálica tipo B, severidad 1

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 10,626 mm se comprueba que tiene una severidad de 1, así como un ancho de 7,581 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 24-4 en la fotomicrografía izquierda.

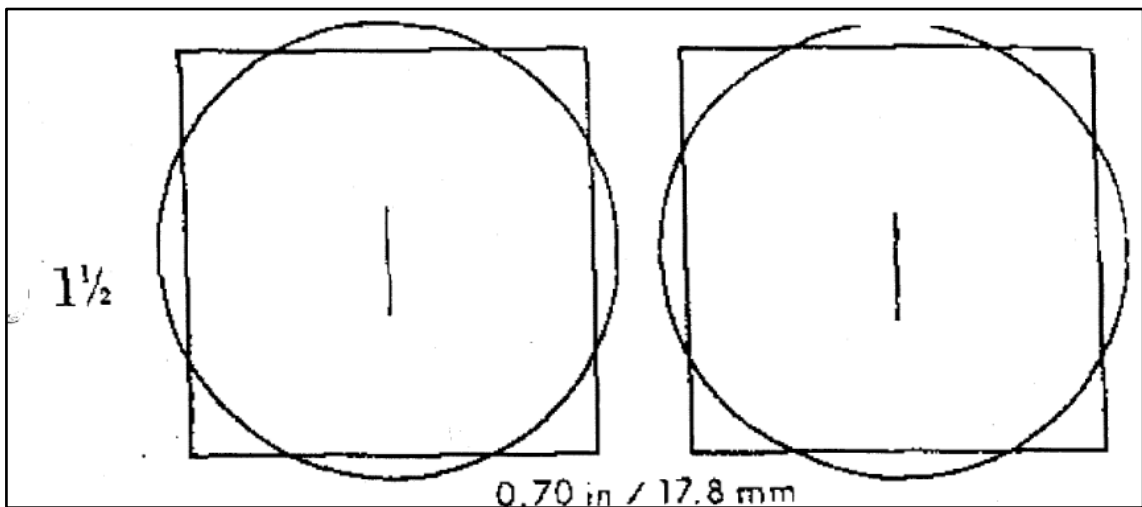


Ilustración 25-4: Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 22,184 mm se comprueba que tiene una severidad de 1,5; así como un ancho de 5,004 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 25-4 en la fotomicrografía derecha.

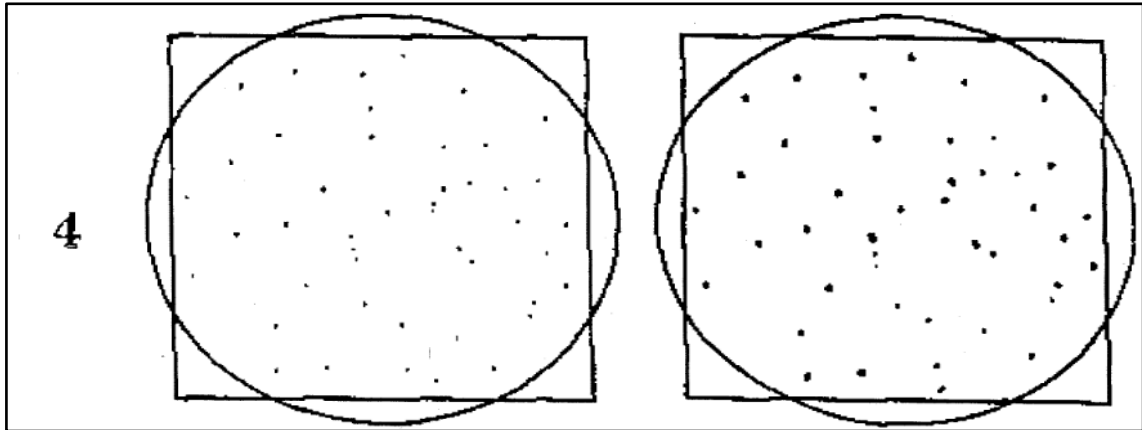


Ilustración 26-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 4.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 78 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 4, así como de serie gruesa, así como en la Ilustración 26-4 en la fotomicrografía derecha.



Ilustración 27-4: Fotomicrografía 2 del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 4-4 se obtiene los 4 tipos de inclusiones, donde el tipo A es de severidad 0,5 con serie gruesa, el tipo B presenta una severidad de 1 con serie delgada, el tipo C presenta una severidad de 2 con serie gruesa y por último el tipo D son 42 óxidos globulares con una severidad de 3 de serie delgada, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 28-4, Ilustración 29-4, Ilustración 30-4 e Ilustración 31-4.

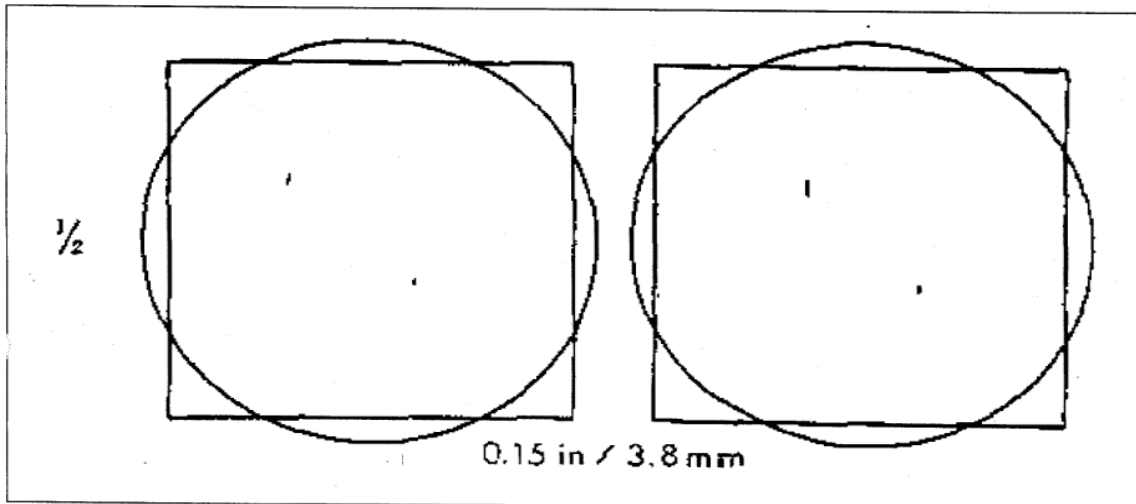


Ilustración 28-4: Inclusión no metálica tipo A, severidad 0,5.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 6,841 mm se comprueba que tiene una severidad de 0,5, así como un ancho de 6,434 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 28-4 en la fotomicrografía derecha.

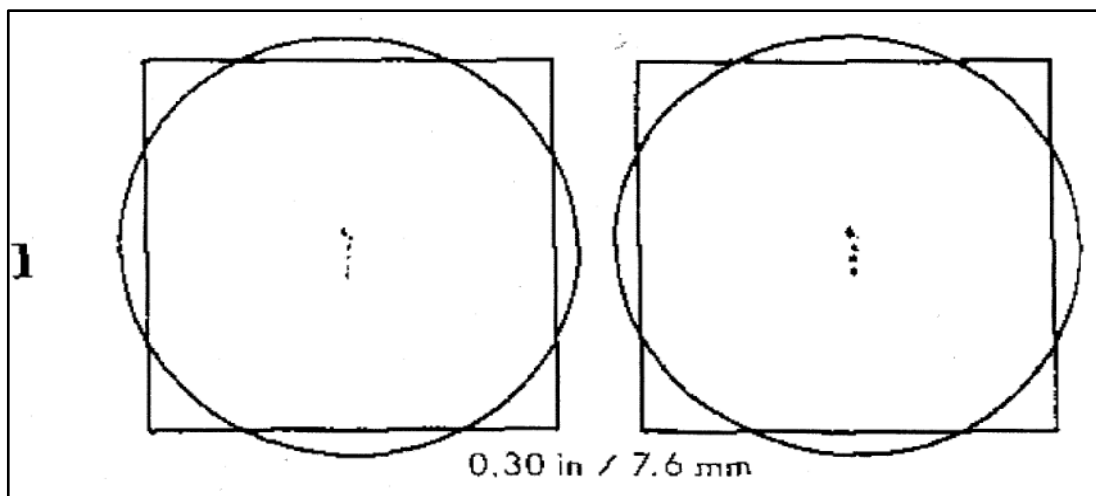


Ilustración 29-4: Inclusión no metálica tipo B, severidad 1.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 8,948 mm se comprueba que tiene una severidad de 1, así como un ancho de 7,434 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 29-4 en la fotomicrografía izquierda.

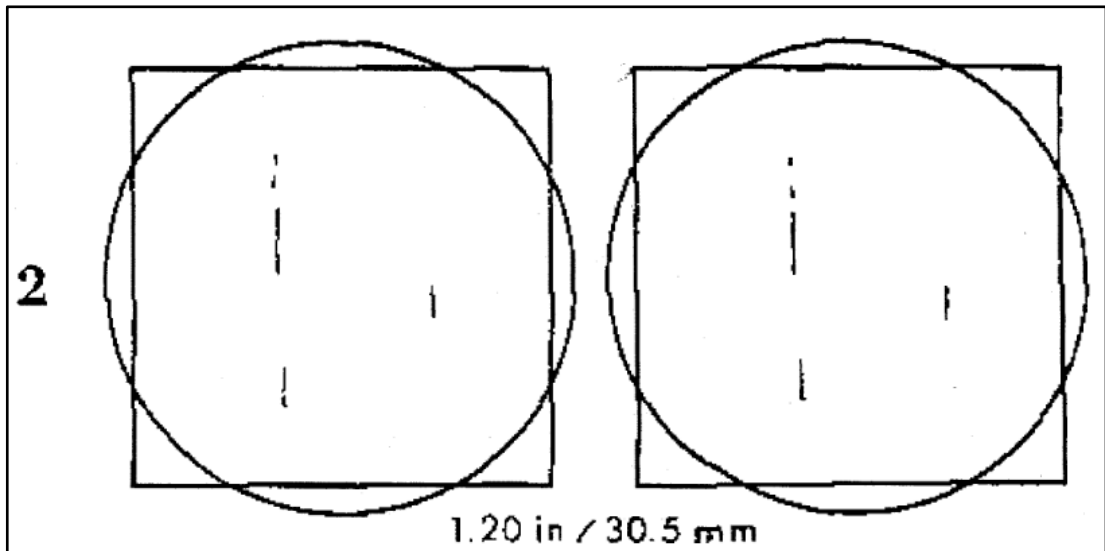


Ilustración 30-4: Inclusión no metálica tipo C, severidad 2

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 46,996 μm se comprueba que tiene una severidad de 2; así como un ancho de 10,717 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 30-4 en la fotomicrografía derecha.

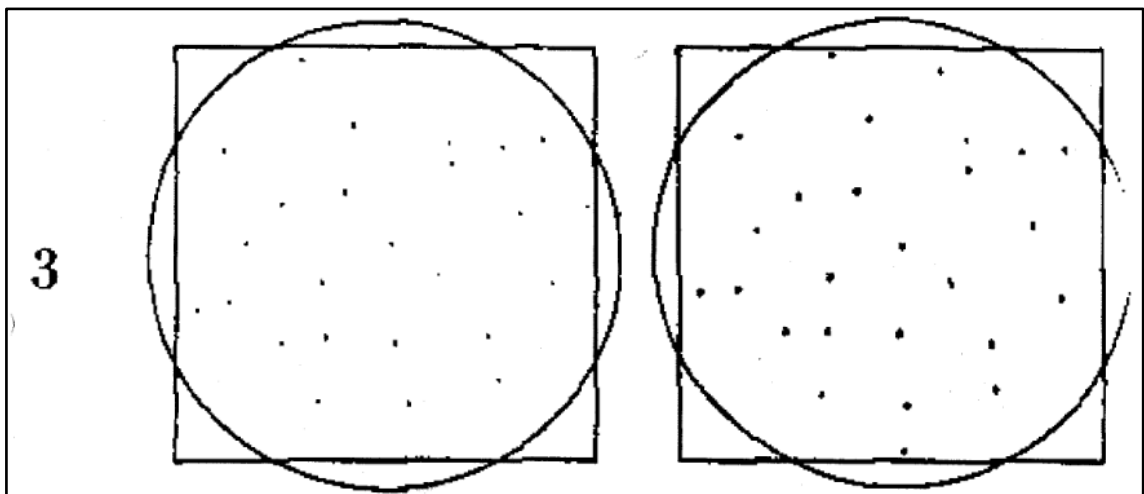


Ilustración 31-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 3.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 42 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 3, así como de serie delgada, así como en la Ilustración 31-4 en la fotomicrografía izquierda.



Ilustración 32-4: Fotomicrografía 3 del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 4-4 se obtiene los 4 tipos de inclusiones, donde el tipo A es de severidad 0,5 con serie gruesa, el tipo B presenta una severidad de 1 con serie delgada, el tipo C presenta una severidad de 1 con serie delgada y por último el tipo D son 38 óxidos globulares con una severidad de 3 de serie delgada, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 33-4, Ilustración 34-4, Ilustración 35-4 e Ilustración 36-4.

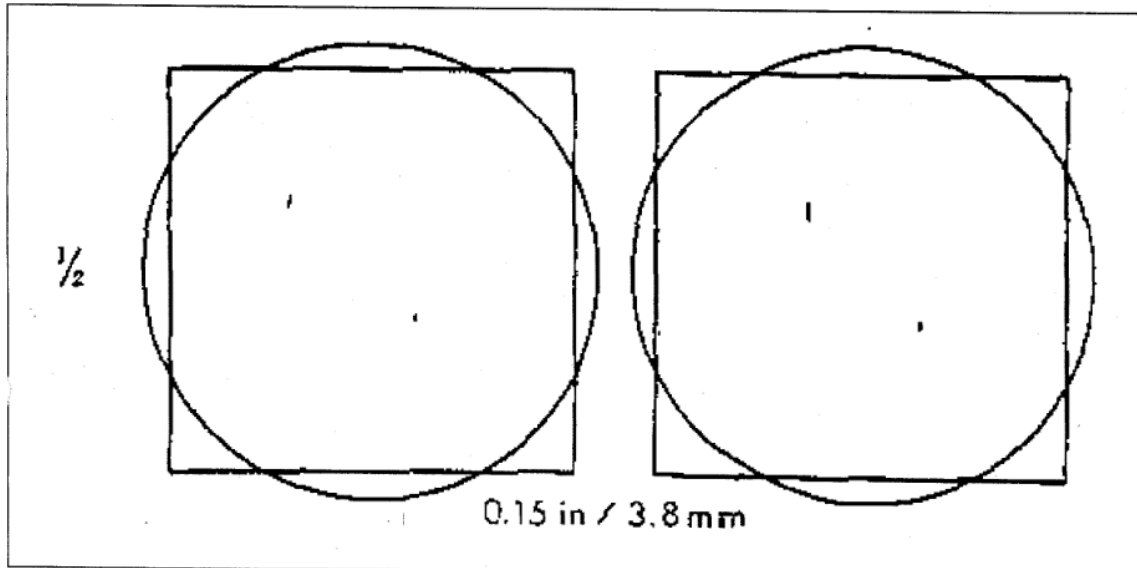


Ilustración 33-4: Inclusión no metálica tipo A, severidad 0,5

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 8,826 mm se comprueba que tiene una severidad de 0,5, así como un ancho de 7,114 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 33-4 en la fotomicrografía derecha.

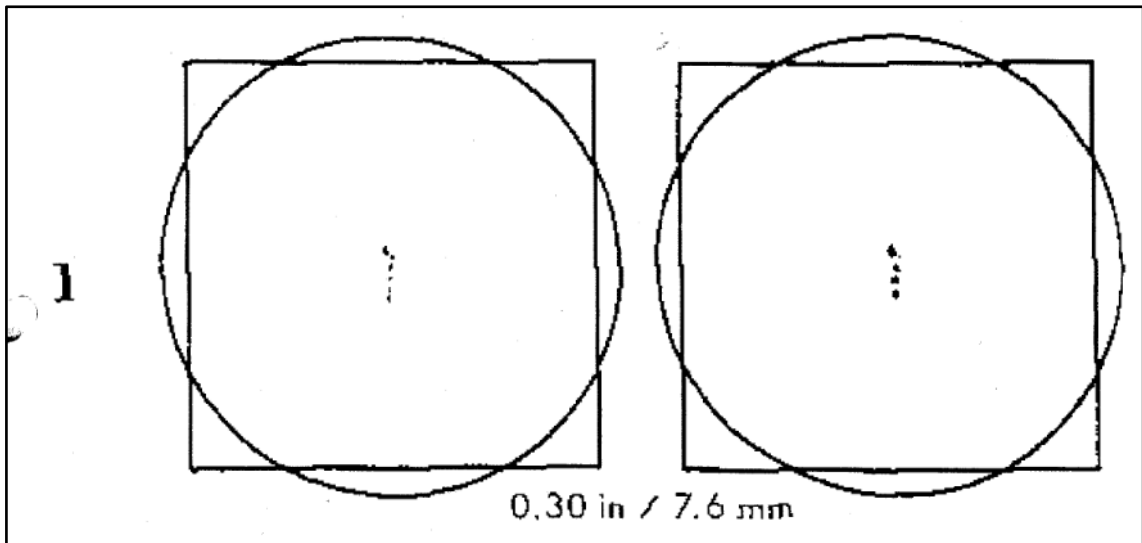


Ilustración 34-4: Inclusión no metálica tipo B, severidad 1

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 10,059 mm se comprueba que tiene una severidad de 1, así como un ancho de 5,005 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 34-4 en la fotomicrografía izquierda.

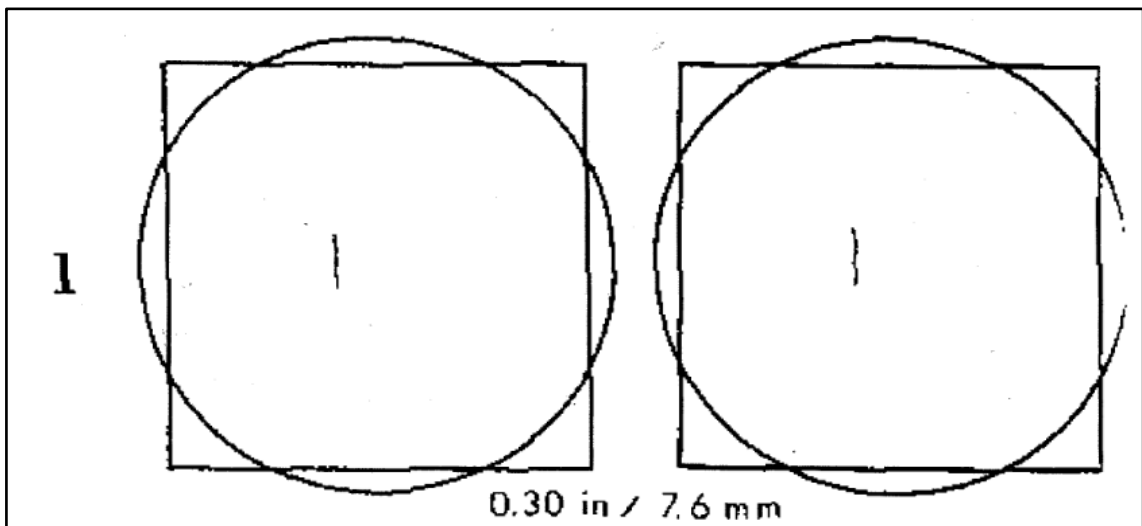


Ilustración 35-4: Inclusión no metálica tipo C, severidad 1

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 17,101 mm se comprueba que tiene una severidad de 1; así como un ancho de 4,289 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 35-4 en la fotomicrografía izquierda.

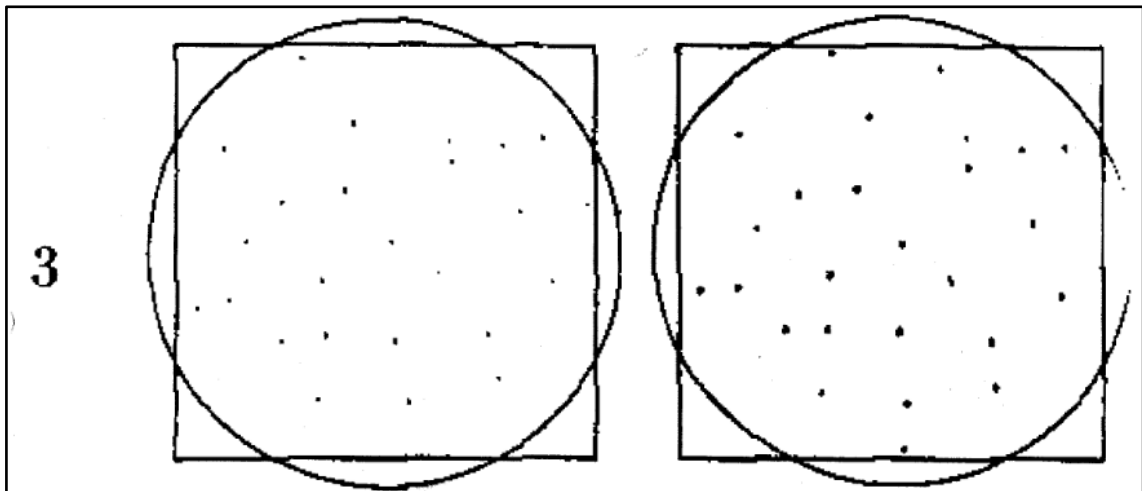


Ilustración 36-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 3

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 38 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 3, así como de serie delgada, así como en la Ilustración 36-4 en la fotomicrografía izquierda.



Ilustración 37-4: Fotomicrografía 4 del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 4-4 se obtiene los 4 tipos de inclusiones, donde el tipo A es de severidad 1 con serie gruesa, el tipo B presenta una severidad de 0,5 con serie delgada, el tipo C presenta una severidad de 1,5 con serie gruesa y por último el tipo D son 72 óxidos globulares con una severidad de 4 de serie delgada, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 38-4, Ilustración 39-4, Ilustración 40-4 e Ilustración 41-4.

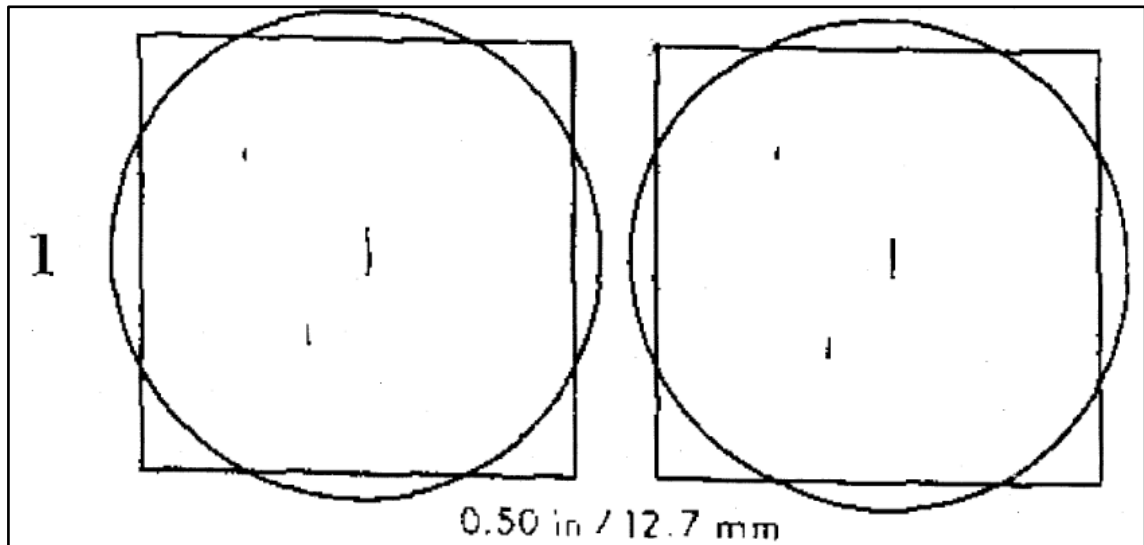


Ilustración 38-4: Inclusión no metálica tipo A, severidad 1.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 14,329 mm se comprueba que tiene una severidad de 1, así como un ancho de 11,854 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 38-4 en la fotomicrografía derecha.

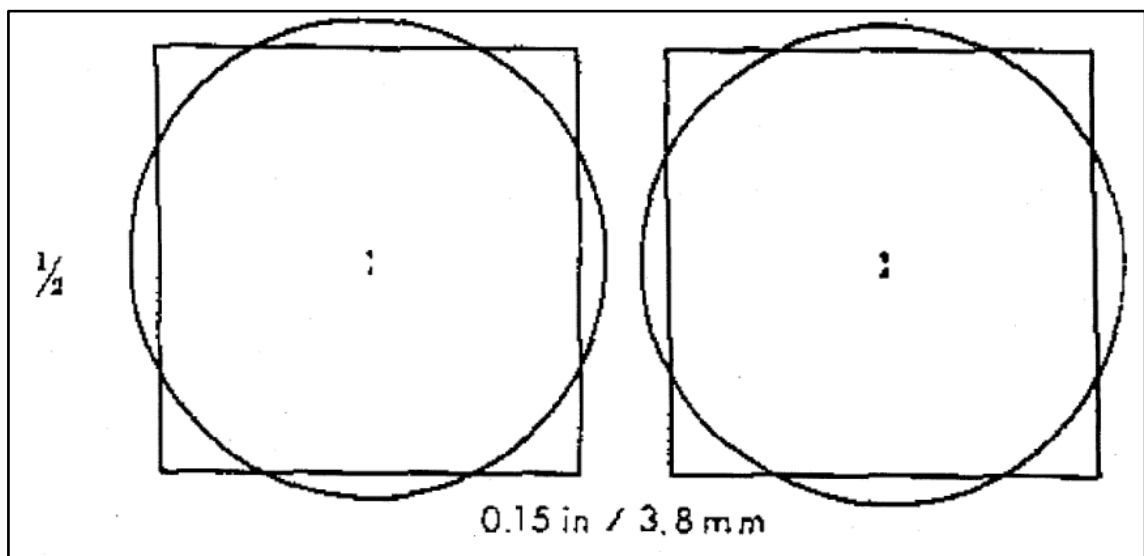


Ilustración 39-4: Inclusión no metálica tipo B, severidad 0,5.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 6,798 mm se comprueba que tiene una severidad de 0,5; así como un ancho de 7,863 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 39-4 en la fotomicrografía izquierda.

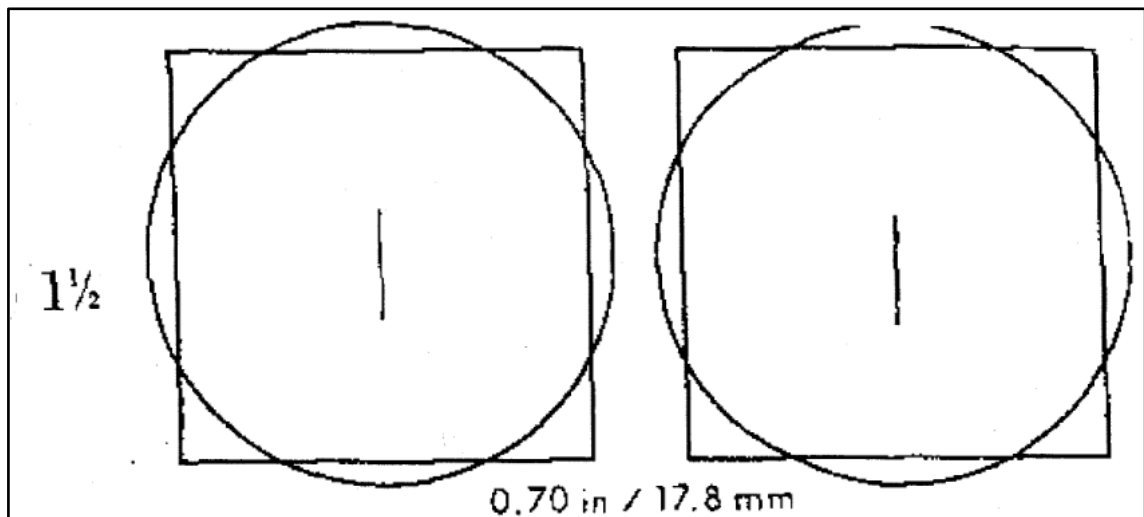


Ilustración 40-4: Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 31,127 mm se comprueba que tiene una severidad de 1,5; así como un ancho de 10,723 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 40-4 en la fotomicrografía derecha.

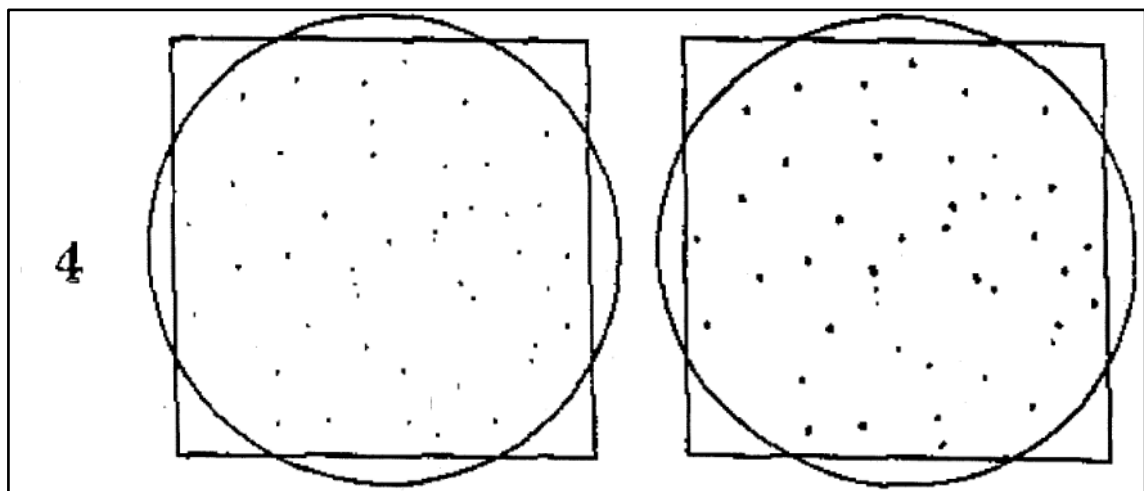


Ilustración 41-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 4

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 72 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 4, así como de serie delgada, así como en la Ilustración 32-4 en la fotomicrografía izquierda.



Ilustración 42-4: Fotomicrografía 5 del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 5-4 se obtiene los 4 tipos de inclusiones, donde el tipo A es de severidad 1 con serie gruesa, el tipo B presenta una severidad de 1 con serie gruesa, el tipo C presenta una severidad de 1,5 con serie gruesa y por último el tipo D son 40 óxidos globulares con una severidad de 3 de serie delgada, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 43-4, Ilustración 44-4, Ilustración 45-4 e Ilustración 46-4.

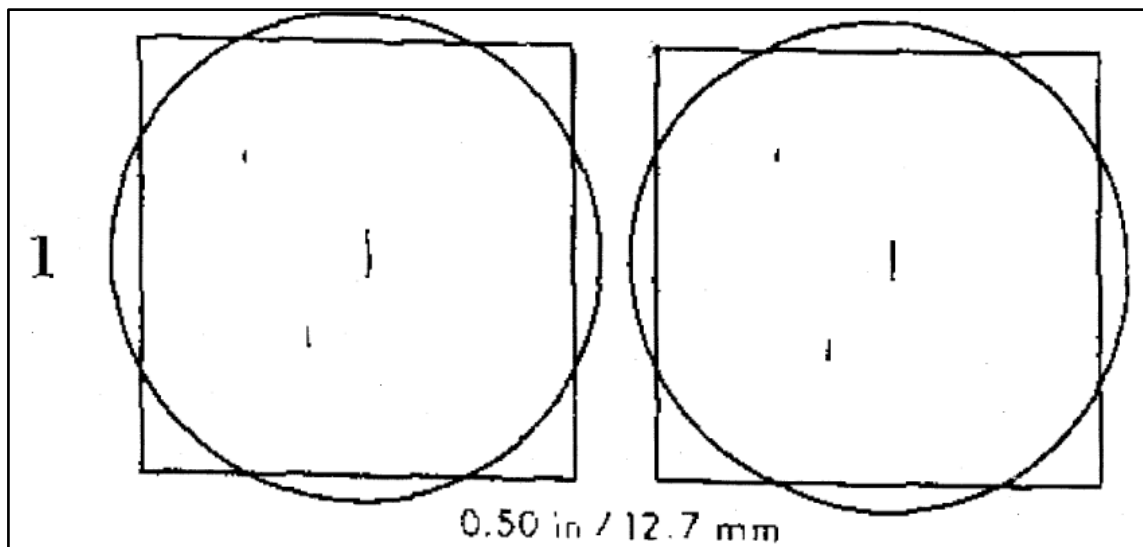


Ilustración 43-4: Inclusión no metálica tipo A, severidad 1

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 15,510 mm se comprueba que tiene una severidad de 1, así como un ancho de 11,678 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 43-4 en la fotomicrografía derecha.

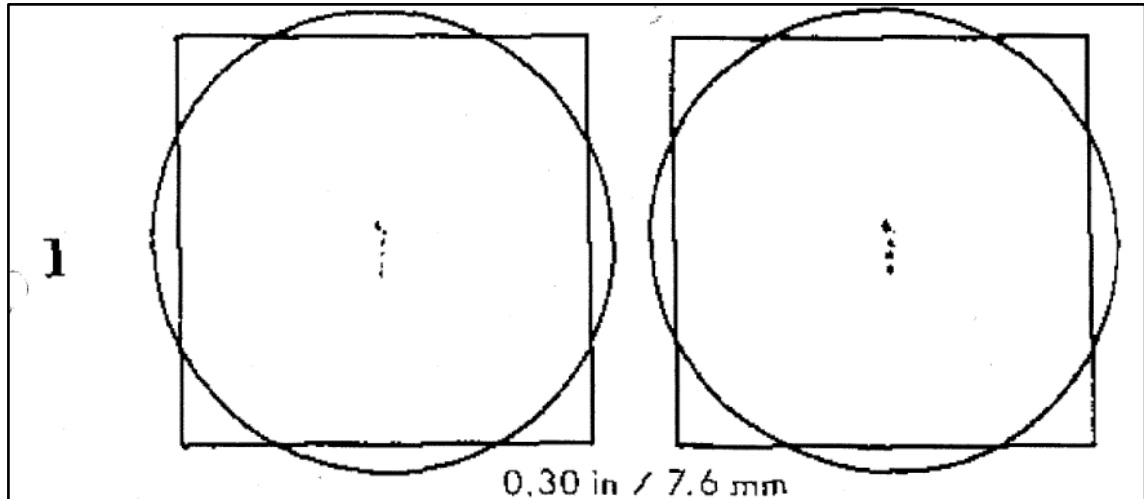


Ilustración 44-4: Inclusión no metálica tipo B, severidad 1

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 12,533 mm se comprueba que tiene una severidad de 1; así como un ancho de 11,432 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 44-4 en la fotomicrografía derecha.

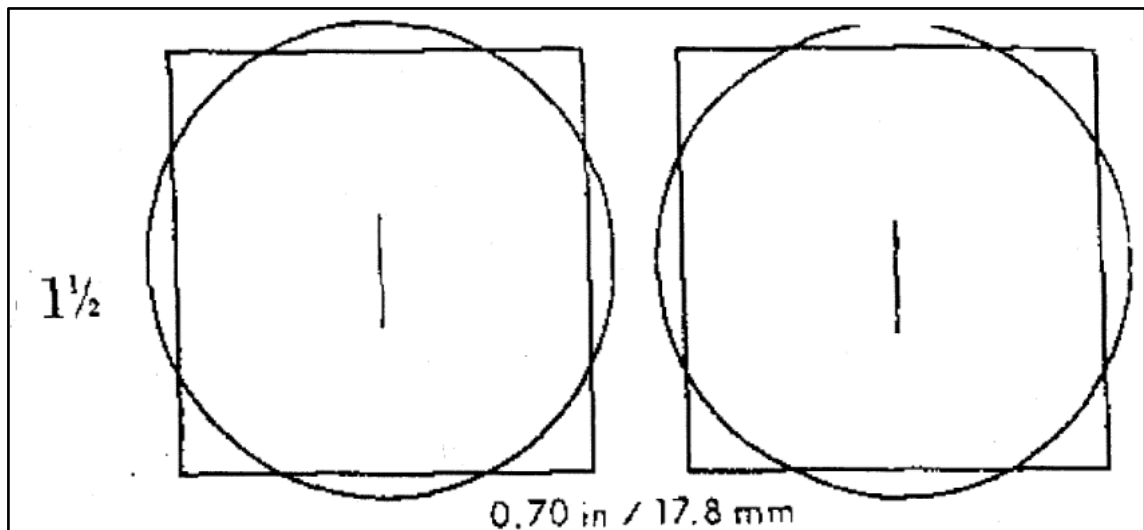


Ilustración 45-4: Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 20,618 mm se comprueba que tiene una severidad de 1,5; así como un ancho de 10,011 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 45-4 en la fotomicrografía derecha.

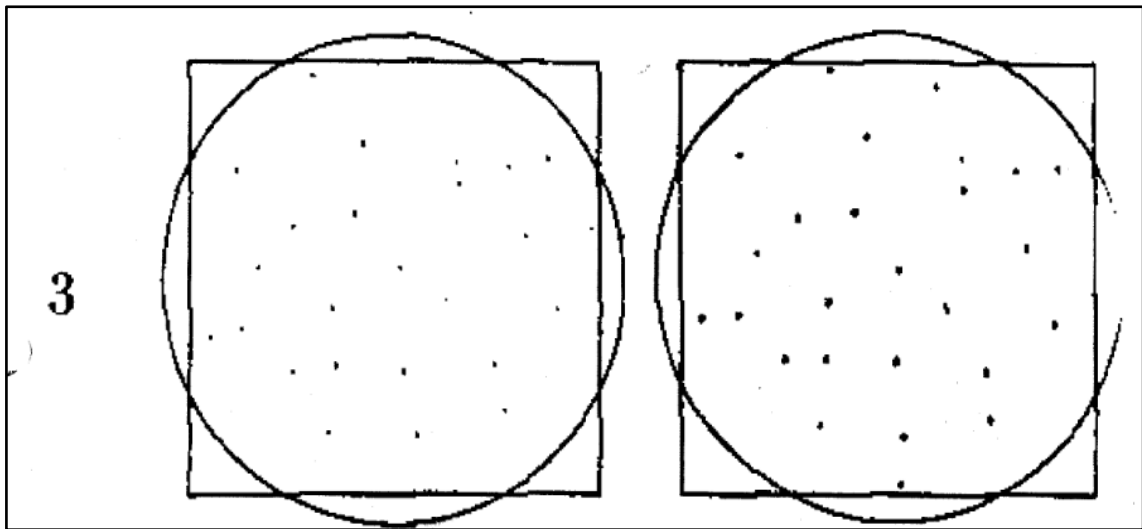


Ilustración 46-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 3.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 40 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 3, así como de serie delgada, así como en la Ilustración 46-4 en la fotomicrografía izquierda.



Ilustración 47-4: Fotomicrografía 6 del acero 34CrNiMo6

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Como se detalla en la Tabla 4-4 se obtiene los 4 tipos de inclusiones, donde el tipo A es de severidad 1 con serie gruesa, el tipo B presenta una severidad de 1 con serie delgada, el

tipo C presenta una severidad de 1,5 con serie delgada y por último el tipo D son 74 óxidos globulares con una severidad de 4 de serie delgada, por lo que se compara con su respectiva morfología de la Norma ASTM E45 con la Ilustración 48-4, Ilustración 49-4, Ilustración 50-4 e Ilustración 51-4.

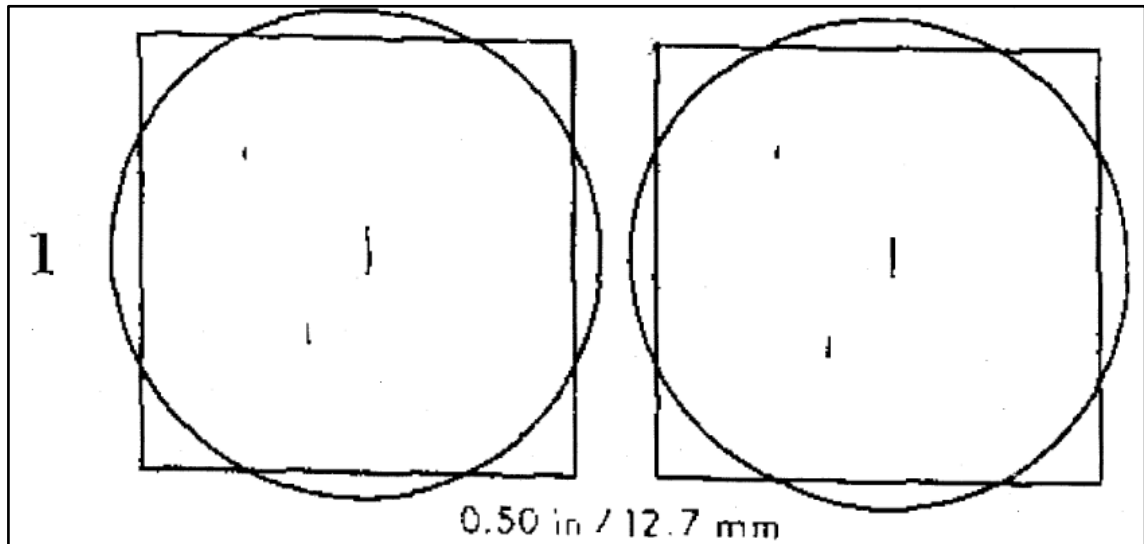


Ilustración 48-4: Inclusión no metálica tipo A, severidad 1.

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 13,226 mm se comprueba que tiene una severidad de 1, así como un ancho de 6,435 μm con lo cual se determina que es de serie gruesa, así como en la Ilustración 48-4 en la fotomicrografía derecha.

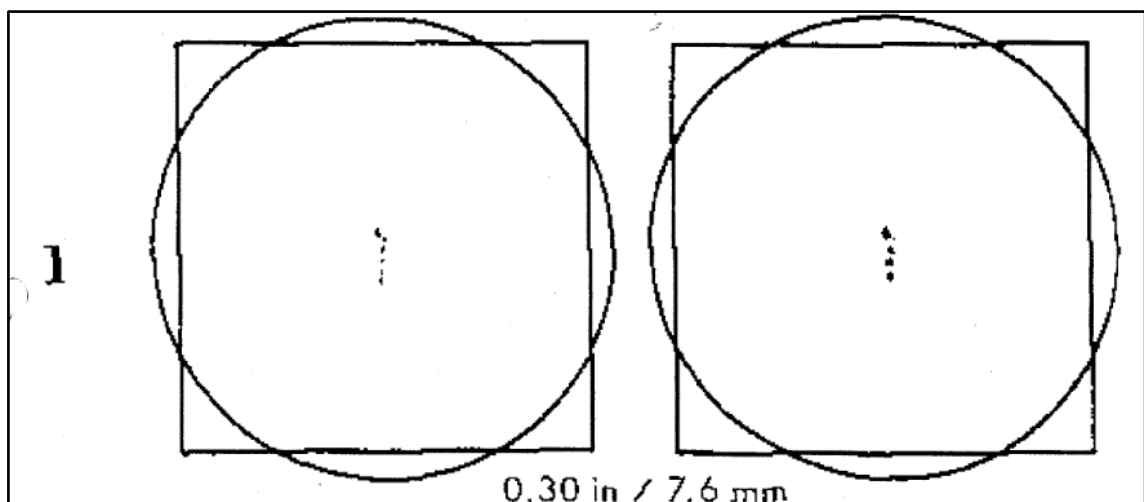


Ilustración 49-4: Inclusión no metálica tipo B, severidad 1

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 15,764 mm se comprueba que tiene una severidad de 1; así como un ancho de 7,318 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 49-4 en la fotomicrografía izquierda.

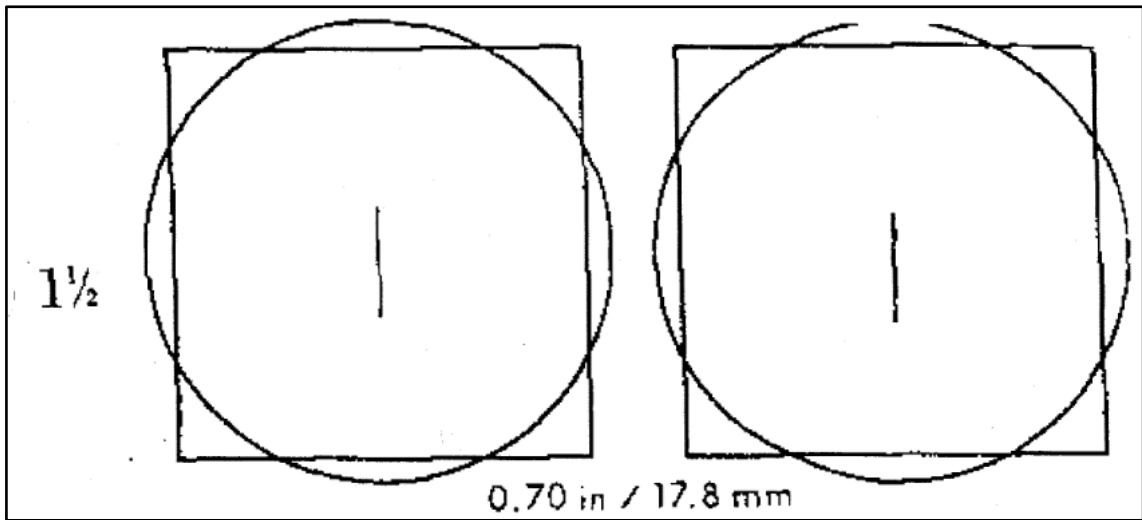


Ilustración 50-4: Inclusión no metálica tipo C, severidad 1,5

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con una longitud de 17,781 mm se comprueba que tiene una severidad de 1,5; así como un ancho de 4,290 μm con lo cual se determina que es de serie delgada, así como en la Ilustración 50-4 en la fotomicrografía izquierda.

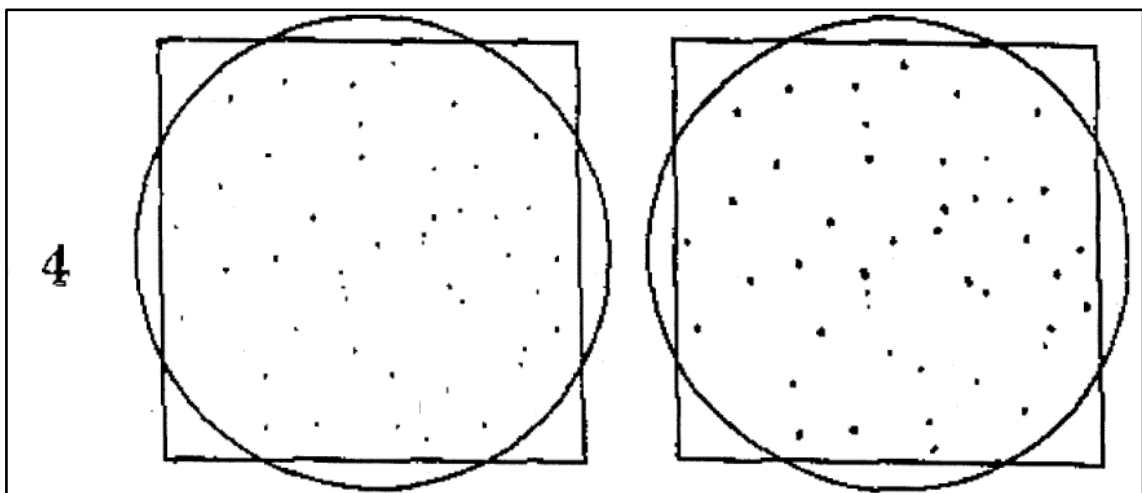


Ilustración 51-4: Inclusión no metálica tipo D, severidad 4

Fuente: ASTM E45-11, 2011.

Interpretación: Con 74 óxido globulares se comprueba que tiene una severidad de 4, así como de serie delgada, así como en la Ilustración 51-4 en la fotomicrografía izquierda.

4.4. Dureza Rockwell C

En la Tabla 5-4 se indica los resultados obtenidos a partir de los ensayos de dureza en el laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo antes y después de la aplicación del nitrurado, aplicando una carga de 150 kgf (1471 N).

Tabla 5-4: Resultados del Ensayo de Dureza Rockwell C

Tratamiento de Nitruración (A)	Tipo de Acero (B)	
	AISI 4340 (B+)	34CrNiMo6 (B-)
Con Nitruración (A+)	Dureza (HRC)	
	37,60	36,20
	36,00	38,20
	34,80	36,40
Sin Nitruración (A-)	35,20	39,00
	33,00	36,00
	34,00	38,00
	34,00	37,00
	34,00	37,00

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.1. Hipótesis

Factor A:

Ho: La dureza media debido al tratamiento de nitruración es igual.

Ha: La dureza media debido al tratamiento de nitruración es diferente.

Factor B:

Ho: La dureza media debido al tipo de acero es igual.

Ha: La dureza media debido al tipo de acero es diferente.

Factor AB:

Ho: La dureza media debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es igual.

Ha: La dureza media debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es diferente.

Tabla 6-4: Nomenclatura de Yates para Dureza Rockwell C

Factores		Combinación de niveles	Dureza (HRC)				Total	Nomenclatura de Yates
			Réplicas					
A	B		1	2	3	4		
-	-	A (-), B (-)	36,00	38,00	37,00	37,00	148,00	(1)
+	-	A (+), B (-)	36,20	38,20	36,40	39,00	149,80	a
-	+	A (-), B (+)	33,00	34,00	34,00	34,00	135,00	b
+	+	A (+), B (+)	37,60	36,00	34,80	35,20	143,60	ab

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Número total de Datos

$$N = 16$$

Número de réplicas

$$n = 4$$

4.4.2. Contrastes

Tabla 7-4: Contrastes para análisis de dureza Rockwell C

Sustitución en las ecuaciones	Contrastes
$C_A = 149,80 + 143,60 - 148,00 - 135,00$	$C_A = 10,40$
$C_B = 135,00 + 143,60 - 148,00 - 149,80$	$C_B = -19,20$
$C_{AB} = 143,60 + 148,00 - 149,80 - 135,00$	$C_{AB} = 6,80$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.3. Efectos de los factores A y B, así como su interacción

Tabla 8-4: Efectos para análisis de dureza Rockwell C

Sustitución en las ecuaciones	Efectos
$E_A = \frac{C_A}{2 * 4}$	$E_A = 1,3$
$E_B = \frac{C_B}{2 * 4}$	$E_B = -2,4$
$E_{AB} = \frac{C_{AB}}{2 * 4}$	$E_{AB} = 0,85$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

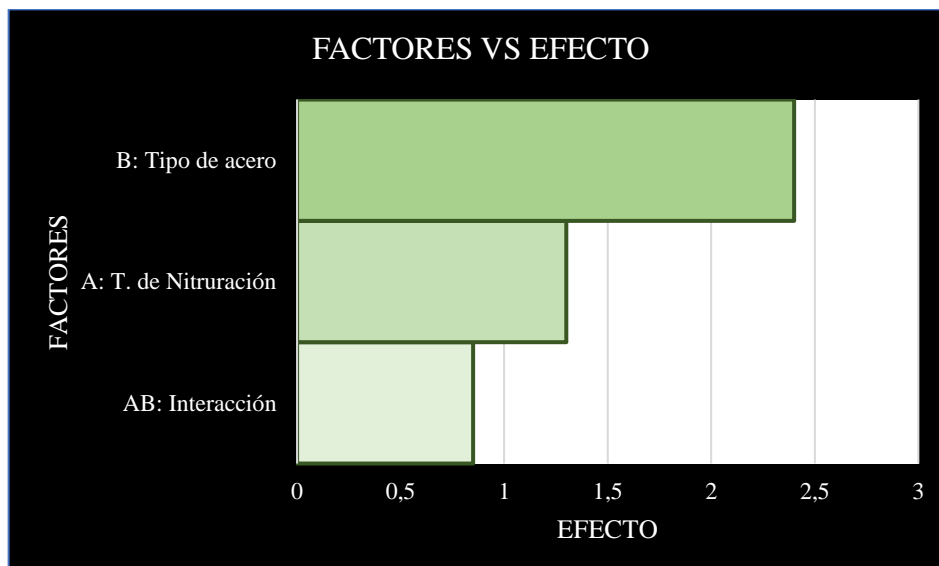


Ilustración 52-4: Efecto de los factores sobre la dureza

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4. Análisis de varianza

4.4.4.1. Suma de Cuadrados

Tabla 9-4: Suma de cuadrados para análisis de dureza Rockwell C

Sustitución en las ecuaciones	Suma de cuadrados
$SC_T = 20810,48 - \frac{(576,40)^2}{16}$	$SC_T = 45,67$
$SC_A = \frac{(10,40)^2}{2^2 * 4}$	$SC_A = 6,76$
$SC_B = \frac{(-19,20)^2}{2^2 * 4}$	$SC_B = 23,04$
$SC_{AB} = \frac{(6,80)^2}{2^2 * 4}$	$SC_{AB} = 2,89$
$SC_E = 45,67 - 6,76 - 23,04 - 2,89$	$SC_E = 12,98$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4.2. Grados de Libertad

Tabla 10-4: Grados de libertad para análisis de dureza Rockwell C

Sustitución en las ecuaciones	Grados de libertad
$GL_A = 2 - 1$	$GL_A = 1$
$GL_B = 2 - 1$	$GL_B = 1$
$GL_{AB} = 2 - 1$	$GL_{AB} = 1$
$GL_T = 16 - 1$	$GL_T = 15$
$GL_E = 15 - 1 - 1 - 1$	$GL_E = 12$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4.3. Cuadrados medios

Tabla 11-4: Cuadrados medios para análisis de dureza Rockwell C

Sustitución en las ecuaciones	Cuadrados medios
$CM_A = \frac{6,76}{1}$	$CM_A = 6,76$
$CM_B = \frac{23,04}{1}$	$CM_B = 23,04$
$CM_{AB} = \frac{2,89}{1}$	$CM_{AB} = 2,89$
$CM_E = \frac{12,98}{12}$	$CM_E = 1,08$
$CM_T = \frac{45,67}{15}$	$CM_T = 3,04$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4.4. Efectos Estandarizados

Tabla 12-4: Efectos estandarizados dureza Rockwell C

Factores	Efectos Estandarizados
AB	1,63
A	2,50
B	4,62

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4.5. Efecto de referencia

efecto de referencia = 2,18

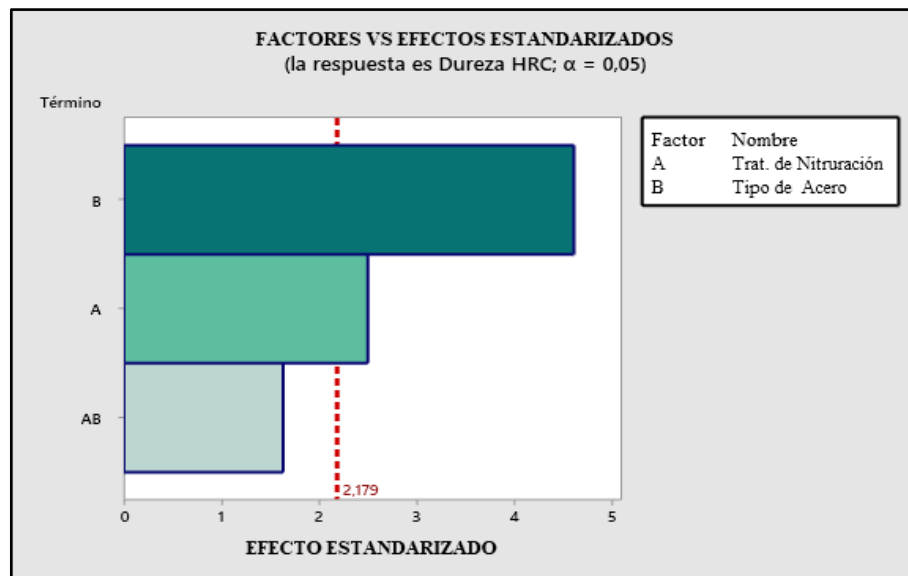


Ilustración 53-4: Efecto estandarizado de los factores sobre la dureza

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se puede identificar que tanto el factor A (tratamiento de nitruración) y el factor B (tipo de acero) inciden en gran medida sobre la variable respuesta (dureza); por otra parte, existe poca incidencia de la interacción de ambos factores sobre la dureza.

4.4.4.6. Fisher Calculado

Tabla 13-4: Fisher Calculado para análisis de dureza Rockwell C

Sustitución en las ecuaciones	Fisher calculado
$F_{oA} = \frac{6,76}{1,08}$	$F_{oA} = 6,25$
$F_{oB} = \frac{23,04}{1,08}$	$F_{oB} = 21,30$
$F_{oAB} = \frac{2,89}{1,08}$	$F_{oAB} = 2,67$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4.7. Fisher tabulado

$$F_c = 4,75$$

4.4.4.8. Tabla Anova

Tabla 14-4: Análisis Anova del ensayo de dureza Rockwell C

F.V.	F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fo	Fc	C.D
Tratamiento de Nitruración:	A	6,76	1	6,76	6,25	4,75	S
Tipo de Acero:	B	23,04	1	23,04	21,30		S
Interacción:	AB	2,89	1	2,89	2,67		NS
Error:	Error	12,98	12	1,08			
TOTAL:	TOTAL	45,67	15	3,04			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.4.4.9. Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100$$

$$R^2 = 71,58 \%$$

Interpretación: Se puede apreciar tanto mediante los efectos de los factores sobre la variable respuesta (dureza), así como con el criterio de decisión que el factor de tratamiento de nitruración (A) incide de manera muy significativa en la variabilidad de la dureza del acero, sin embargo, no se puede deducir fácilmente si habrá mayor o menor dureza con uno o con otro material antes y después del tratamiento, por lo que se requiere realizar las gráficas LSD.

4.4.5. LSD Gráfico

Cálculo de LSD_{AB}

Se determina el valor de $t_{(\alpha/2;GL_E)}$

$$t_{(\alpha/2;GL_E)} = 2,18$$

Se sustituyen valores en la ecuación

$$LSD_{AB} = 2,18 * \sqrt{\frac{1,08}{4}}$$

Tabla 15-4: Datos para el método gráfico LSD

	Combinaciones de niveles			
	A-B-	A+B-	A-B+	A+B+
LS	38,13	38,58	34,88	37,03
MEDIA	37,00	37,45	33,75	35,90
LI	35,87	36,32	32,62	34,77
LSD AB	1,13			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

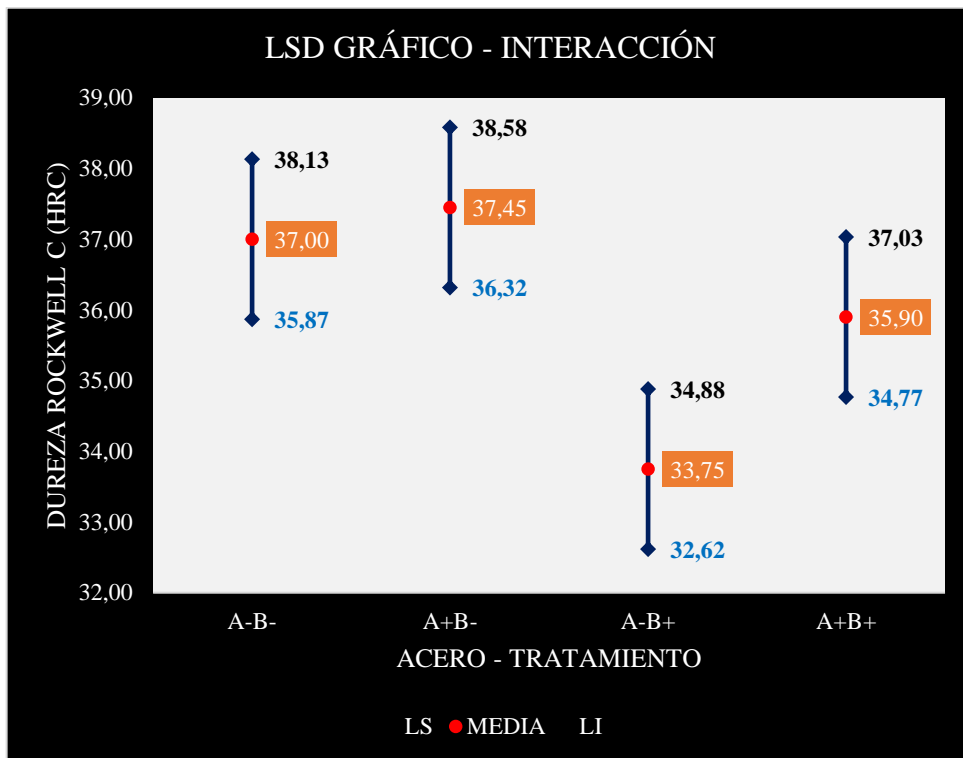


Ilustración 54-4: Análisis gráfico de la dureza de los aceros con y sin nitruración

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

- A partir de la ilustración se observa que después de la nitruración del acero 34CrNiMo6 (B-) el incremento de la dureza media es mínimo, pasando de 37,00 HRC a 37,45 HRC. En cambio, para el acero AISI 4340 (B+), el valor de la dureza media incrementa 6,37 %, pasando de 33,75 HRC a 35,90 HRC.
- Al comparar ambos aceros sin nitruración (A-), se aprecia que la dureza del acero 34CrNiMo6 es 8,78 % mayor en comparación a la del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 37,00 HRC y 33,75 HRC respectivamente.
- En contraste a lo anterior, realizando la comparación de ambos aceros con nitruración (A+) se aprecia que la dureza del acero 34CrNiMo6 es 4,14% mayor en comparación a la del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 37,45 HRC y 35,90 HRC respectivamente. Sin embargo, al analizar los rangos en que oscila la dureza en cada acero (De 36,32 HRC a 38,58 HRC en caso del acero 34CrNiMo6 y de 34,77 HRC a 37,03 HRC para el acero AISI 4340), se dice que no hay diferencia significativa, lo que quiere decir que la dureza en ambos aceros luego de la nitruración es equivalente.

4.5. Micro Dureza Vickers

4.5.1. Variación de dureza en el acero AISI 4340 Nitrurado

Tabla 16-4: Micro Dureza en el AISI 4340 Nitrurado

Tabla Resumen			
Micro Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Carga (10 gf)	Distancia desde la superficie (μm)
338,64	34,29	10	500
352,79	35,86	10	400
378,44	38,64	10	300
425,71	43,24	10	200
474,72	47,28	10	100
560,877	53,05	10	40
613,02	56,00	10	20

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

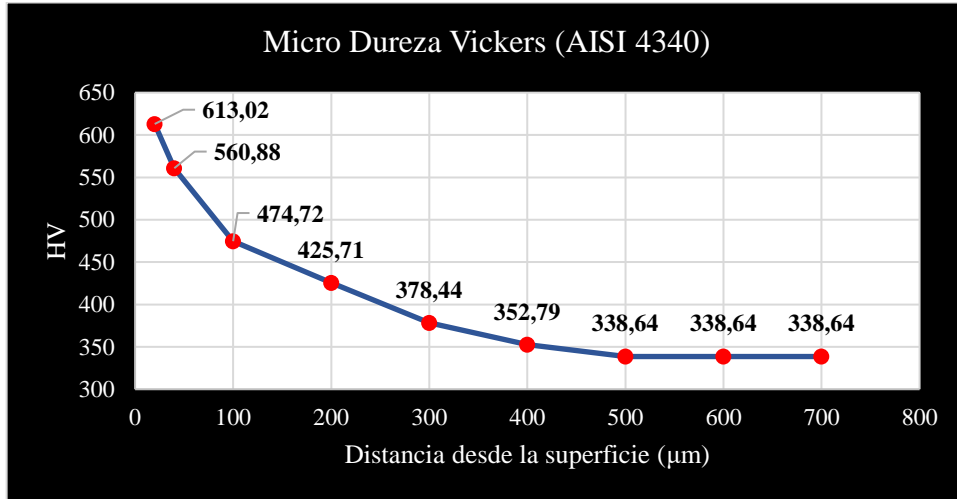


Ilustración 55-4: Micro Dureza Vickers en el acero AISI 4340 Nitrurado

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

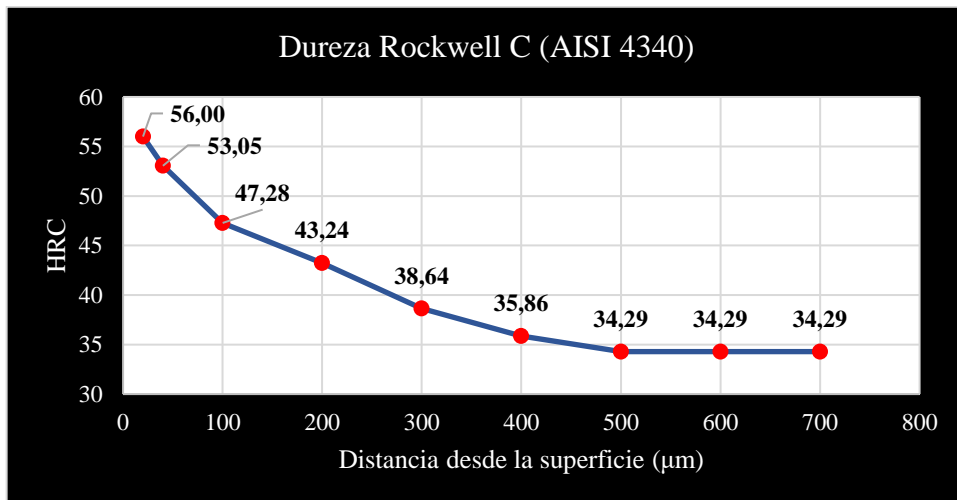


Ilustración 56-4: Dureza Rockwell C en el acero AISI 4340 Nitrurado

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

- A partir de la ilustración se observa que después de la nitruración del acero AISI 4340 la dureza cerca de la superficie es de 56 HRC; pero, mientras se acerca al núcleo del acero esta dureza decrece hasta cerca de 34,29 HRC.

4.5.2. Variación de dureza en el acero 34CrNiMo6 Nitrurado

Tabla 17-4: Micro Dureza en el 34CrNiMo6 Nitrurado

Tabla Resumen			
Micro Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Carga (10 gf)	Distancia desde la superficie (μm)
362,73	36,97	10	500
401,03	40,90	10	400
419,33	42,66	10	300
452,73	45,56	10	200
515,11	50,14	10	100
580,90	54,21	10	40
672,79	58,942	10	20

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

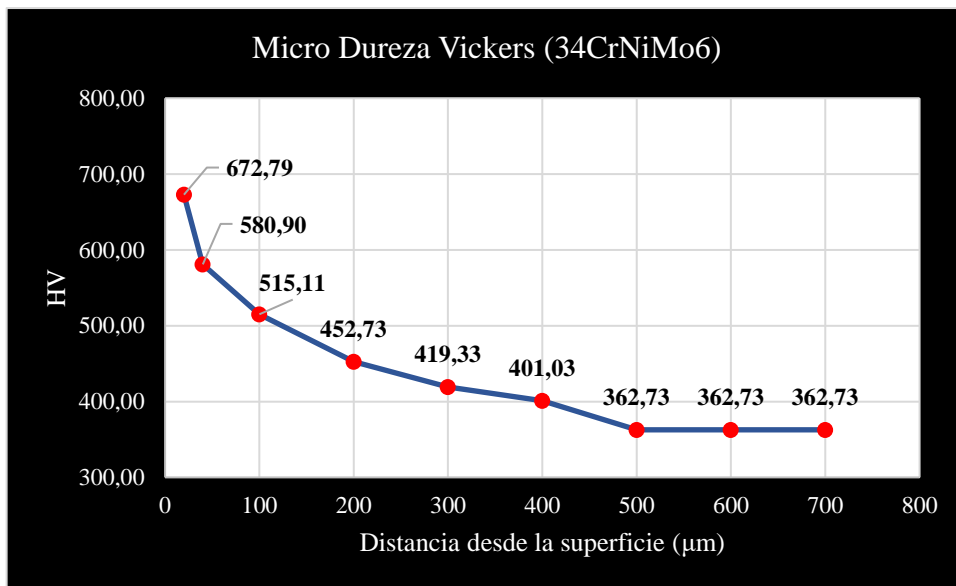


Ilustración 57-4: Micro Dureza Vickers en el acero 34CrNiMo6 Nitrurado

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

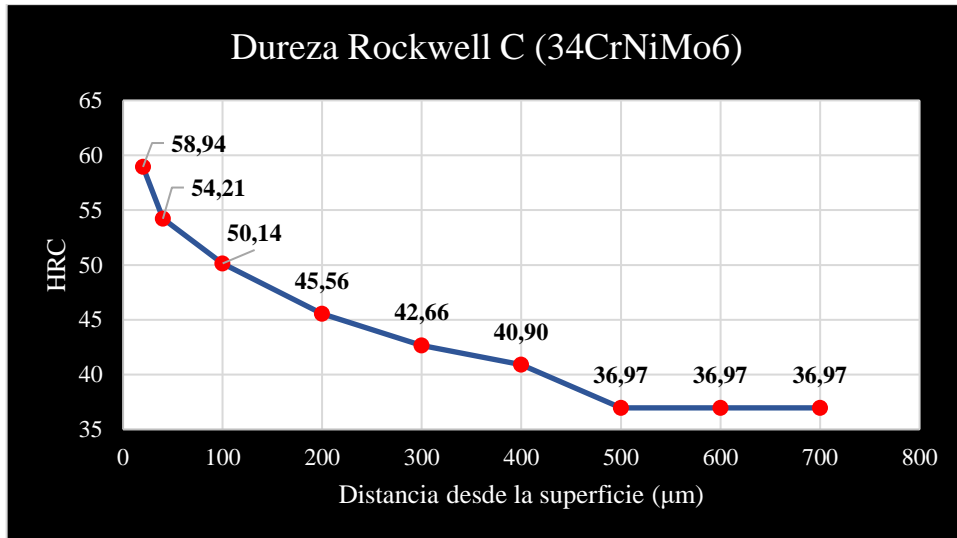


Ilustración 58-4: Dureza Rockwell C en el acero 34CrNiMo6 Nitrurado

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

- A partir de la ilustración se observa que después de la nitruración del acero 34CrNiMo6 la dureza cerca de la superficie es de 58,94 HRC; pero, mientras se acerca al núcleo del acero esta dureza decrece hasta cerca de 36,97 HRC.

4.6. Tenacidad

Tabla 18-4: Resultados de tenacidad

Tratamiento de Nitruración (A)	Tipo de Acero (B)	
	AISI 4340 (B+)	34CrNiMo6 (B-)
Con Nitruración (A+)	Tenacidad (J)	
	73,00	122,00
	71,00	5,00
	79,00	122,00
Sin Nitruración (A-)	73,00	3,00
	133,00	79,00
	136,00	76,00
	73,00	122,00
	71,00	5,00

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.1. Hipótesis

Factor A:

Ho: La tenacidad media debido al tratamiento de nitruración es igual.

Ha: La tenacidad media debido al tratamiento de nitruración es diferente.

Factor B:

Ho: La tenacidad media debido al tipo de acero es igual.

Ha: La tenacidad media debido al tipo de acero es diferente.

Factor AB:

Ho: La tenacidad media debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es igual.

Ha: La tenacidad media debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es diferente.

Tabla 19-4: Nomenclatura de Yates para tenacidad

Factores		Combinación de niveles	Tenacidad (J)				Total	Nomenclatura de Yates
			Réplicas					
A	B		1	2	3	4		
-	-	A (-), B (-)	79,00	76,00	87,00	79,00	321,00	(1)
+	-	A (+), B (-)	122,00	5,00	122,00	3,00	252,00	a
-	+	A (-), B (+)	133,00	136,00	138,00	141,00	548,00	b
+	+	A (+), B (+)	73,00	71,00	79,00	73,00	296,00	ab

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Número total de Datos

$$N = 16$$

Número de réplicas

$$n = 4$$

4.6.2. Contrastes

Tabla 20-4: Contrastes para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Contrastes
$C_A = 252,00 + 296,00 - 321,00 - 548,00$	$C_A = -321,00$
$C_B = 548,00 + 296,00 - 321,00 - 252,00$	$C_B = 271,00$
$C_{AB} = 296,00 + 321,00 - 252,00 - 548,00$	$C_{AB} = -183,00$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.3. Efectos de los factores A y B, así como su interacción

Tabla 21-4: Efectos para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Efectos
$E_A = \frac{C_A}{2 * 4}$	$E_A = -40,13$
$E_B = \frac{C_B}{2 * 4}$	$E_B = 33,88$
$E_{AB} = \frac{C_{AB}}{2 * 4}$	$E_{AB} = -22,88$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

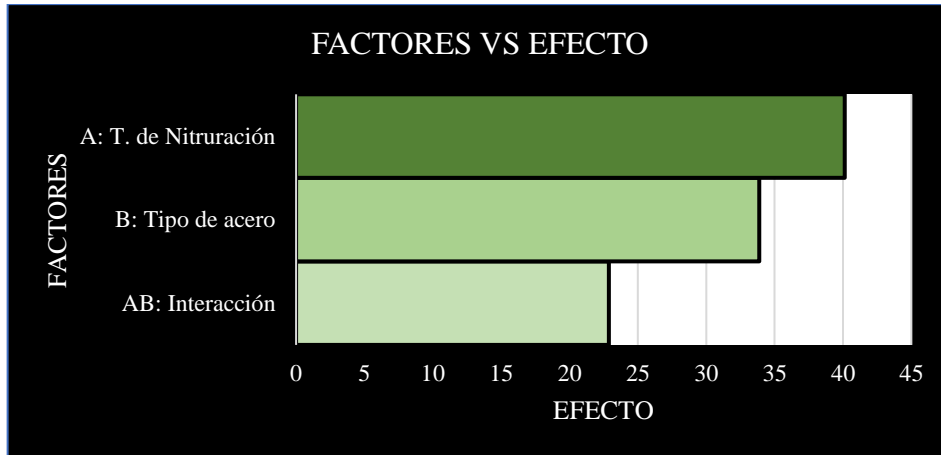


Ilustración 59-4: Efecto de los factores sobre la tenacidad

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4. Análisis de varianza

4.6.4.1. Suma de Cuadrados

Tabla 22-4: Suma de cuadrados para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Suma de cuadrados
$SC_T = 152679 - \frac{(1417)^2}{16}$	$SC_T = 27185,94$
$SC_A = \frac{(-321,00)^2}{2^2 * 4}$	$SC_A = 6440,06$
$SC_B = \frac{(271)^2}{2^2 * 4}$	$SC_B = 4590,06$
$SC_{AB} = \frac{(-183,00)^2}{2^2 * 4}$	$SC_{AB} = 2093,06$
$SC_E = 27185,94 - 6440,06 - 4590,06 - 2093,06$	$SC_E = 14062,75$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4.2. Grados de Libertad

Tabla 23-4: Grados de libertad para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Grados de libertad
$GL_A = 2 - 1$	$GL_A = 1$
$GL_B = 2 - 1$	$GL_B = 1$
$GL_{AB} = 2 - 1$	$GL_{AB} = 1$
$GL_T = 16 - 1$	$GL_T = 15$
$GL_E = 15 - 1 - 1 - 1$	$GL_E = 12$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4.3. Cuadrados medios

Tabla 24-4: Cuadrados medios para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Cuadrados medios
$CM_A = \frac{6440,06}{1}$	$CM_A = 6440,06$
$CM_B = \frac{4590,06}{1}$	$CM_B = 4590,06$
$CM_{AB} = \frac{2093,06}{1}$	$CM_{AB} = 2093,06$
$CM_E = \frac{14062,75}{12}$	$CM_E = 1171,90$
$CM_T = \frac{27185,94}{15}$	$CM_T = 1812,40$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4.4. Efectos Estandarizados

Tabla 25-4: Efectos estandarizados de la tenacidad

Factores	Efectos Estandarizados
AB	1,34
A	1,98
B	2,34

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4.5. Efecto de referencia

efecto de referencia = 2,18

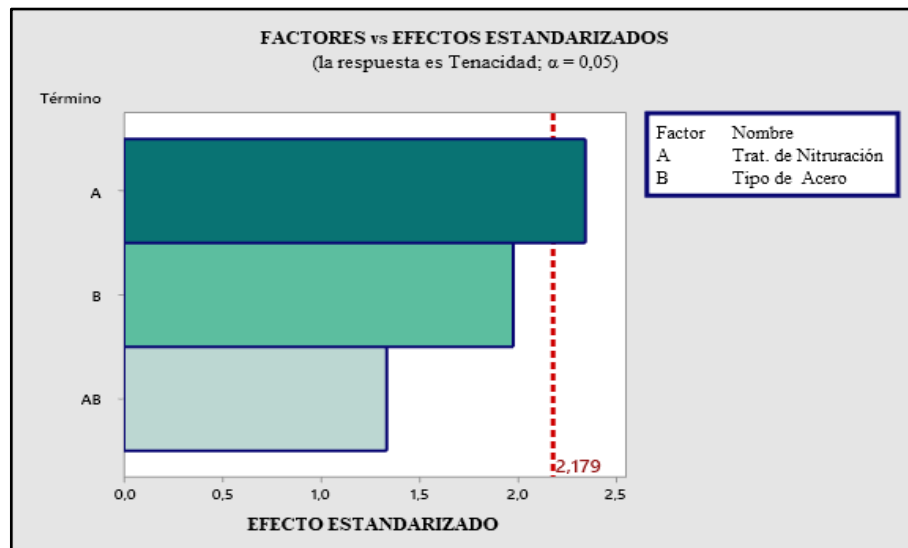


Ilustración 60-4: Efecto estandarizado de los factores sobre la tenacidad

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se puede identificar que el factor A (tratamiento de nitruración) incide en gran medida sobre la variable respuesta (tenacidad); por otra parte, existe poca incidencia de la

interacción de ambos factores sobre la dureza, así como del factor B (tipo de acero) sobre la tenacidad del material.

4.6.4.6. Fisher Calculado

Tabla 26-4: Fisher calculado para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Fisher calculado
$F_{oA} = \frac{6440,06}{1171,90}$	$F_{oA} = 5,50$
$F_{oB} = \frac{4590,06}{1171,90}$	$F_{oB} = 3,92$
$F_{oAB} = \frac{2093,06}{1171,90}$	$F_{oAB} = 1,79$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4.7. Fisher tabulado

$$F_c = 4,75$$

4.6.4.8. Tabla Anova

Tabla 27-4: Análisis Anova de tenacidad

F.V.	F.V.	SC	GL	CM	Fo	Fc	CD
Tratamiento de Nitruración:	A	6440,06	1	6440,06	5,50	4,75	S
Tipo de Acero:	B	4590,06	1	4590,06	3,92		NS
Interacción:	AB	2093,06	1	2093,06	1,79		NS
Error	Error	14062,75	12	1171,90			
TOTAL	TOTAL	27185,94	15	1812,40			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.6.4.9. Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100$$

$$R^2 = 48,27 \%$$

Interpretación: Se puede apreciar tanto mediante los efectos de los factores sobre la variable respuesta (tenacidad), así como con el criterio de decisión que los factores A y B inciden de manera significativa en la variabilidad de la tenacidad del acero, sin embargo, no se puede deducir fácilmente si uno u otro material era más tenaz antes y después del tratamiento, por lo que se requiere realizar las gráficas LSD.

4.6.5. LSD Gráfico

Cálculo de LSD_{AB}

Se determina el valor de $t_{(\alpha/2;GLE)}$

$$t_{(\alpha/2;GLE)} = 2,18$$

Se sustituyen valores en la ecuación.

$$LSD_{AB} = 2,18 * \sqrt{\frac{1171,90}{4}}$$

Tabla 28-4: Datos para el método gráfico LSD

	Combinaciones de niveles			
	A-B-	A+B-	A-B+	A+B+
LS	117,54	100,29	174,29	111,29
MEDIA	80,25	63,00	137,00	74,00
LI	42,96	25,71	99,71	36,71
LSD AB	37,29			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

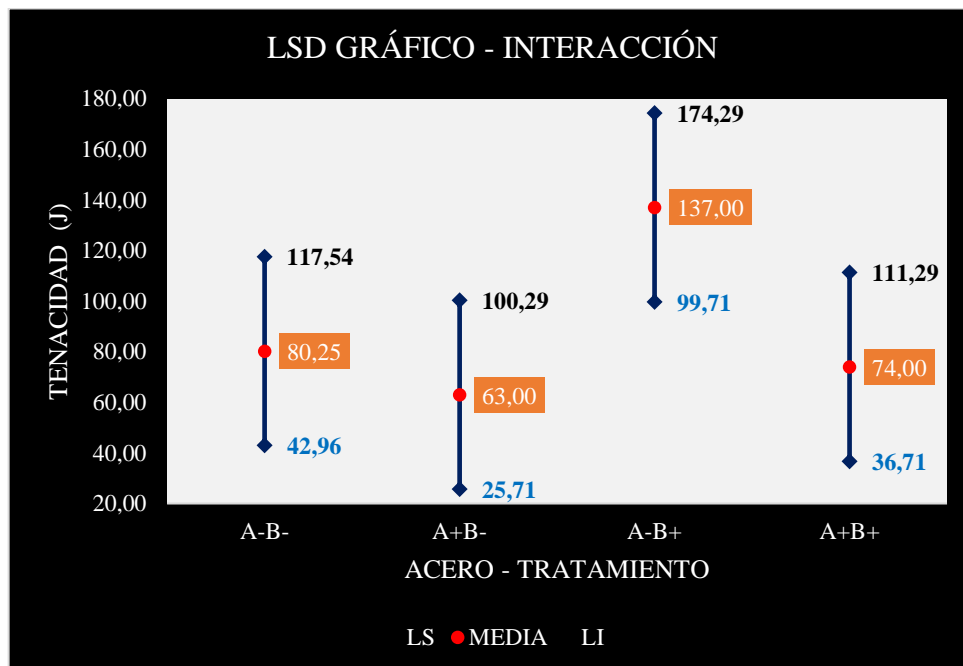


Ilustración 61-4: Análisis gráfico de la tenacidad de los aceros con y sin nitruración

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

- A partir de la ilustración 6-4 se observa que después de la nitruración del acero 34CrNiMo6 (B-) la tenacidad media disminuye 21,5 %, pasando de 80,25 J a 63,00 J. De

manera similar sucede con el acero AISI 4340 (B+), cuya tenacidad media disminuye un 46 %, pasando de 137,00 J a 74,00 J.

- Al comparar ambos aceros sin nitruración (A-), se aprecia que la tenacidad media del acero AISI 4340 es 41,4% mayor en comparación a la del acero 34CrNiMo6, dichos valores equivalen a 137,00 J y 80,25 J respectivamente.
- Realizando la comparación de ambos aceros con nitruración (A+) se aprecia que la tenacidad del acero AISI 4340 es 14,9% mayor en comparación a la del acero 34CrNiMo6, dichos valores equivalen a 74,00 J y 63,00 J respectivamente. Sin embargo, al analizar los rangos en que oscila la tenacidad en cada acero (De 25,71 J a 100,29 J en caso del acero 34CrNiMo6 y de 36,71 J a 111,29 J para el acero AISI 4340), se dice que no hay diferencia significativa, lo que quiere decir que la tenacidad en ambos aceros luego de la nitruración es equivalente.

4.7. Esfuerzo de Fluencia

Tabla 29-4: Esfuerzo de fluencia obtenido del ensayo de tracción

Tratamiento de nitruración (A)	Tipo de Acero (B)	
	AISI 4340 (B+)	34CrNiMo6 (B-)
Esfuerzo de fluencia (MPa)		
Con Nitruración (A+)	996,80	1059,00
	1000,60	1055,80
	1049,70	1011,30
	1059,30	942,70
	844,22	1098,01
Sin Nitruración (A-)	1143,90	1055,80
	1434,10	1065,80
	1431,40	1058,20
	1054,90	1012,00
	1193,33	973,54

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.1. Hipótesis

Factor A:

Ho: El esfuerzo de fluencia medio debido al tratamiento de nitruración es igual.

Ha: El esfuerzo de fluencia medio debido al tratamiento de nitruración es diferente.

Factor B:

Ho: El esfuerzo de fluencia medio debido al tipo de acero es igual.

Ha: El esfuerzo de fluencia medio debido al tipo de acero es diferente.

Factor AB:

Ho: El esfuerzo de fluencia medio debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es igual.

Ha: El esfuerzo de fluencia medio debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es diferente.

Tabla 30-4: Nomenclatura de Yates para el esfuerzo de fluencia

Factores		Combinación de niveles	Esfuerzo de fluencia (MPa)					Total	Nomenclatura de Yates
			Réplicas						
A	B		1	2	3	4	5		
-	-	A (-), B (-)	1055,80	1065,80	1058,20	1012,00	973,54	5165,34	-1
+	-	A (+), B (-)	1059,00	1055,80	1011,30	942,70	1098,01	5166,81	a
-	+	A (-), B (+)	1143,90	1434,10	1431,40	1054,90	1193,33	6257,63	b
+	+	A (+), B (+)	996,80	1000,60	1049,70	1059,30	844,22	4950,62	ab

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Número total de Datos

$$N = 20$$

Número de réplicas

$$n = 5$$

4.7.2. Contrastes

Tabla 31-4: Contrastes para análisis de esfuerzo de fluencia

Sustitución en las ecuaciones	Contrastes
$C_A = 5166,81 + 4950,62 - 5165,34 - 6257,63$	$C_A = -1305,54$
$C_B = 6257,63 + 4950,62 - 5165,34 - 5166,81$	$C_B = 876,10$
$C_{AB} = 4950,62 + 5165,34 - 5166,81 - 6257,63$	$C_{AB} = -1308,48$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.3. Efectos de los factores A y B, así como su interacción

Tabla 32-4: Efectos para análisis de esfuerzo de fluencia

Sustitución en las ecuaciones	Efectos
$E_A = \frac{C_A}{2 * 5}$	$E_A = -130,55$
$E_B = \frac{C_B}{2 * 5}$	$E_B = 87,61$
$E_{AB} = \frac{C_{AB}}{2 * 5}$	$E_{AB} = -130,85$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

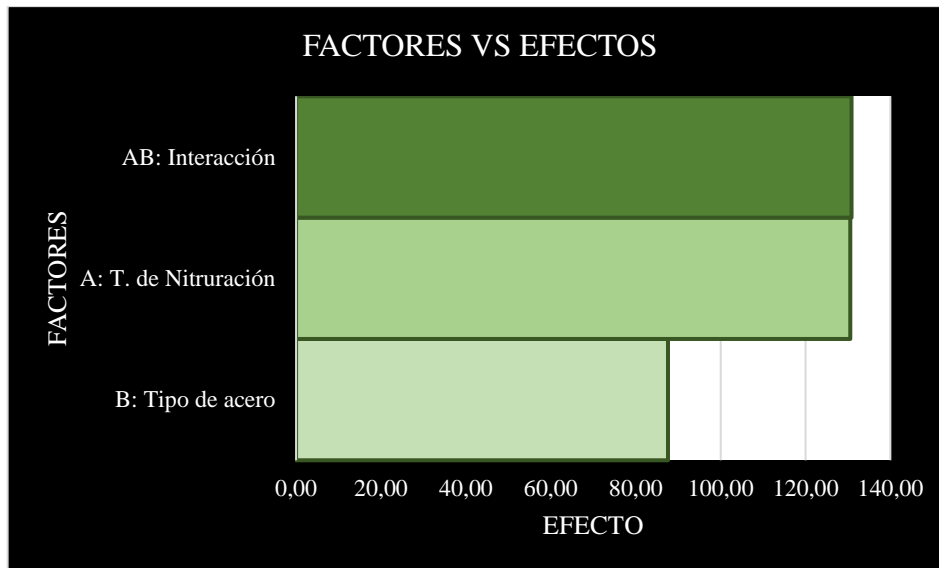


Ilustración 62-4: Efecto de los factores sobre el esfuerzo de fluencia

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4. Análisis de varianza

4.7.4.1. Suma de Cuadrados

Tabla 33-4: Suma de cuadrados para análisis de esfuerzo de fluencia

Sustitución en las ecuaciones	Suma de cuadrados
$SC_T = 23577997,3 - \frac{(21540,40)^2}{20}$	$SC_T = 378555,69$
$SC_A = \frac{(-1305,54)^2}{2^2 * 5}$	$SC_A = 85221,73$
$SC_B = \frac{(876,10)^2}{2^2 * 5}$	$SC_B = 38377,56$
$SC_{AB} = \frac{(-1308,48)^2}{2^2 * 5}$	$SC_{AB} = 85606,00$
$SC_E = 378555,69 - 85221,73 - 38377,56 - 85606,00$	$SC_E = 169350,40$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4.2. Grados de Libertad

Tabla 34-4: Grados de libertad para análisis de esfuerzo de fluencia

Sustitución en las ecuaciones	Grados de libertad
$GL_A = 2 - 1$	$GL_A = 1$
$GL_B = 2 - 1$	$GL_B = 1$
$GL_{AB} = 2 - 1$	$GL_{AB} = 1$
$GL_T = 20 - 1$	$GL_T = 19$
$GL_E = 19 - 1 - 1 - 1$	$GL_E = 16$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4.3. Cuadrados medios

Tabla 35-4: Cuadrados medios para análisis de esfuerzo de fluencia

Sustitución en las ecuaciones	Cuadrados medios
$CM_A = \frac{85221,73}{1}$	$CM_A = 85221,73$
$CM_B = \frac{38377,56}{1}$	$CM_B = 38377,56$
$CM_{AB} = \frac{285606,00}{1}$	$CM_{AB} = 85606,00$
$CM_E = \frac{169350,40}{16}$	$CM_E = 10584,40$
$CM_T = \frac{378555,69}{19}$	$CM_T = 19923,98$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4.4. Efectos Estandarizados

Tabla 36-4: Efectos estandarizados del esfuerzo de fluencia

Factores	Efectos Estandarizados
B	1,90
A	2,84
AB	2,84

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4.5. Efecto de referencia

efecto de referencia = 2,12

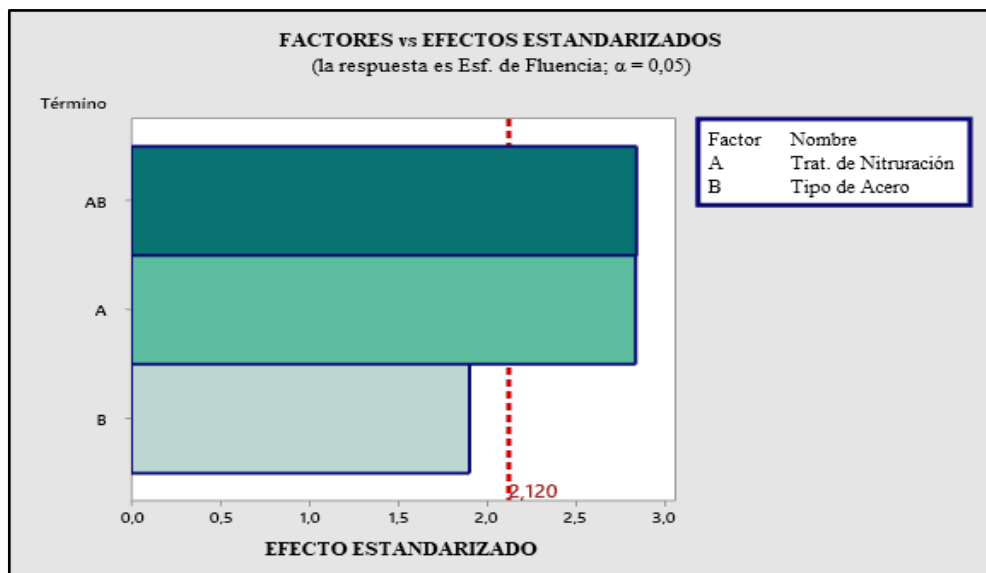


Ilustración 63-4: Efecto estandarizado de los factores sobre el esfuerzo de fluencia

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se puede identificar que el factor A (tratamiento de nitruración), así como la interacción de ambos factores inciden en gran medida sobre la variable respuesta (esfuerzo de fluencia); sin embargo, el factor B (tipo de acero) no incide de manera significativa sobre el esfuerzo de fluencia.

4.7.4.6. Fisher Calculado

Tabla 37-4: Fisher calculado para análisis de tenacidad

Sustitución en las ecuaciones	Fisher calculado
$F_{oA} = \frac{85221,73}{10584,40}$	$F_{oA} = 8,05$
$F_{oB} = \frac{38377,56}{10584,40}$	$F_{oB} = 3,63$
$F_{oAB} = \frac{85606,00}{10584,40}$	$F_{oAB} = 8,09$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4.7. Fisher tabulado

$$F_c = 4,49$$

4.7.4.8. Tabla Anova

Tabla 38-4: Análisis Anova del esfuerzo de fluencia

F.V.	F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fo	Fc	C.D.
Tratamiento de Nitruración:	A	85221,73	1	85221,73	8,05	4,49	S
Tipo de Acero:	B	38377,56	1	38377,56	3,63		NS
Interacción:	AB	85606,00	1	85606,00	8,09		S
Error	Error	169350,40	16	10584,40			
TOTAL	TOTAL	378555,69	19	19923,98			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.7.4.9. Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100$$

$$R^2 = 55,26 \%$$

Interpretación: Se puede apreciar tanto mediante los efectos de los factores sobre la variable respuesta (esfuerzo de fluencia), así como con el criterio de decisión que la incidencia del factor B sobre el esfuerzo de fluencia no es significativa; sin embargo, no se puede deducir fácilmente si habrá mayor o menor fluencia con uno o con otro material antes y después del tratamiento, por lo que se requiere realizar las gráficas LSD.

4.7.5. LSD Gráfico

Cálculo de LSD_{AB}

Se determina el valor de $t(\alpha/2;GL_E)$

$$t(\alpha/2;GL_E) = 2,12$$

Se sustituyen valores en la ecuación

$$LSD_{AB} = 2,12 * \sqrt{\frac{10584,40}{5}}$$

Tabla 39-4: Datos para el método gráfico LSD

	A-B-	A+B-	A-B+	A+B+
LS	1130,60	1130,90	1349,06	1087,66
MEDIA	1033,07	1033,36	1251,53	990,12
LI	935,53	935,83	1153,99	892,59
LSD AB	97,54			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

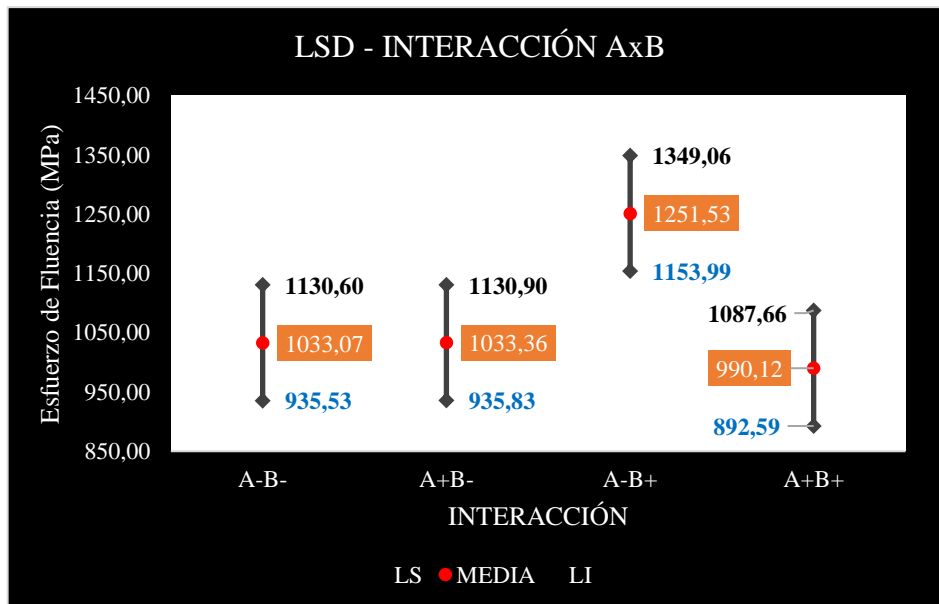


Ilustración 64-4: Esfuerzo de fluencia en los aceros con y sin nitruración

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

- A partir de la ilustración 8-4 se observa que después de la nitruración del acero 34CrNiMo6 (B-) el incremento del esfuerzo de fluencia medio es mínimo, pasando de

1033,07 MPa a 1033,36 MPa. En cambio, para el acero AISI 4340 (B+), esfuerzo de fluencia medio disminuye 20,89 %, pasando de 1251,53 MPa a 990,12 MPa.

- Al comparar ambos aceros sin nitruración (A-), se aprecia que el esfuerzo de fluencia medio del acero 34CrNiMo6 es 16,4% menor en comparación al del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 1033,07 MPa y 1251,53 MPa respectivamente.
- Adicionalmente, realizando la comparación de ambos aceros con nitruración (A+) se aprecia que esfuerzo de fluencia medio del acero 34CrNiMo6 es 4,37% mayor en comparación al del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 1033,36 MPa y 990,12 MPa respectivamente. Sin embargo, al analizar los rangos en que oscila el esfuerzo de fluencia en cada acero (de 935,83 MPa a 1130,90 MPa en caso del acero 34CrNiMo6 y de 892,59 MPa a 1087,66 MPa para el acero AISI 4340), se dice que no hay diferencia significativa, lo que quiere decir que el esfuerzo de fluencia en ambos aceros luego de la nitruración es equivalente.

4.8. Esfuerzo último

Tabla 40-4: Esfuerzo último obtenido del ensayo de tracción

Tratamiento de Nitruración (A)	Tipo de Acero (B)	
	AISI 4340 (B+)	34CrNiMo6 (B-)
	Esfuerzo último (MPa)	
Con Nitruración (A+)	1076,70	1100,50
	1081,90	1102,80
	1101,80	1086,20
	1101,40	1034,00
	970,50	1188,00
Sin Nitruración (A-)	1270,90	1130,10
	1531,60	1130,10
	1527,30	1134,20
	1172,50	1064,20
	1383,20	1030,57

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.1. Hipótesis

Factor A:

Ho: El esfuerzo último medio debido al tratamiento de nitruración es igual.

Ha: El esfuerzo último medio debido al tratamiento de nitruración es diferente.

Factor B:

Ho: El esfuerzo último medio debido al tipo de acero es igual.

Ha: El esfuerzo último medio debido al tipo de acero es diferente.

Factor AB:

Ho: El esfuerzo último medio debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es igual.

Ha: El esfuerzo último medio debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es diferente.

Tabla 41-4: Nomenclatura de Yates para el esfuerzo último

Factores		Combinación de niveles	Esfuerzo último (MPa)					Total	Nomenclatura de Yates
			Réplicas						
A	B		1	2	3	4	5		
-	-	A (-), B (-)	1130,10	1130,10	1134,20	1064,20	1030,57	5489,17	-1
+	-	A (+), B (-)	1100,50	1102,80	1086,20	1034,00	1188,00	5511,50	a
-	+	A (-), B (+)	1270,90	1531,60	1527,30	1172,50	1383,20	6885,50	b
+	+	A (+), B (+)	1076,70	1081,90	1101,80	1101,40	970,50	5332,30	ab

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Número total de Datos

$$N = 20$$

Número de réplicas

$$n = 5$$

4.8.2. Contrastes

Tabla 42-4: Contrastes para análisis de esfuerzo último

Sustitución en las ecuaciones	Contrastes
$C_A = 5511,50 + 5332,30 - 5489,17 - 6885,50$	$C_A = -1530,87$
$C_B = 6885,50 + 5332,30 - 5489,17 - 5511,50$	$C_B = 1217,13$
$C_{AB} = 5489,17 + 5332,30 - 5511,50 - 6885,50$	$C_{AB} = -1575,53$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.3. Efectos de los factores A y B, así como su interacción

Tabla 43-4: Efectos para análisis de esfuerzo último

Sustitución en las ecuaciones	Efectos
$E_A = \frac{C_A}{2 * 5}$	$E_A = -153,09$
$E_B = \frac{C_B}{2 * 5}$	$E_B = 121,71$
$E_{AB} = \frac{C_{AB}}{2 * 5}$	$E_{AB} = -157,55$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

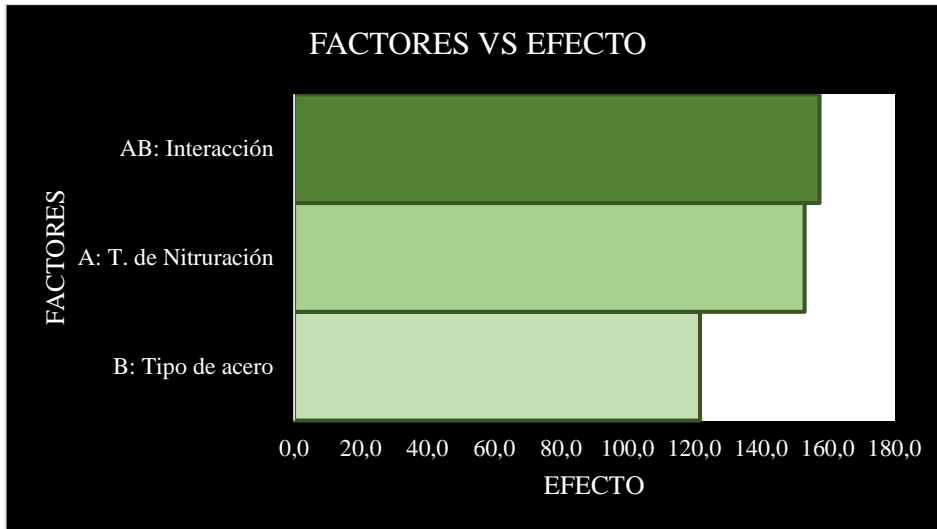


Ilustración 65-4: Efecto de los factores sobre el esfuerzo último

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.4. Análisis de varianza

4.8.4.1. Suma de Cuadrados

Tabla 44-4: Suma de cuadrados para análisis de esfuerzo último

Sustitución en las ecuaciones	Suma de cuadrados
$SC_T = 2403191,50 - \frac{(23218,47)^2}{20}$	$SC_T = 448324,00$
$SC_A = \frac{(-1530,87)^2}{2^2 * 5}$	$SC_A = 117178,15$
$SC_B = \frac{(1217,13)^2}{2^2 * 5}$	$SC_B = 74070,27$
$SC_{AB} = \frac{(-1575,53)^2}{2^2 * 5}$	$SC_{AB} = 124114,74$
$SC_E = 448324,00 - 117178,15 - 74070,27 - 124114,74$	$SC_E = 132960,84$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.4.2. Grados de Libertad

Tabla 45-4: Grados de libertad para análisis de esfuerzo último

Sustitución en las ecuaciones	Grados de libertad
$GL_A = 2 - 1$	$GL_A = 1$
$GL_B = 2 - 1$	$GL_B = 1$
$GL_{AB} = 2 - 1$	$GL_{AB} = 1$
$GL_T = 20 - 1$	$GL_T = 19$
$GL_E = 19 - 1 - 1 - 1$	$GL_E = 16$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.:

4.8.4.3. Cuadrados medios

Tabla 46-4: Cuadrados medios para análisis de esfuerzo último

Sustitución en las ecuaciones	Cuadrados medios
$CM_A = \frac{117178,15}{1}$	$CM_A = 117178,15$
$CM_B = \frac{74070,27}{1}$	$CM_B = 74070,27$
$CM_{AB} = \frac{124114,74}{1}$	$CM_{AB} = 124114,74$
$CM_E = \frac{132960,84}{16}$	$CM_E = 8310,05$
$CM_T = \frac{448324,00}{19}$	$CM_T = 23596,00$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.4.4. Efectos Estandarizados

Tabla 47-4: Efectos estandarizados del esfuerzo último

Factores	Efectos Estandarizados
B	2,99
A	3,76
AB	3,86

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.4.5. Efecto de referencia

efecto de referencia = 2,12

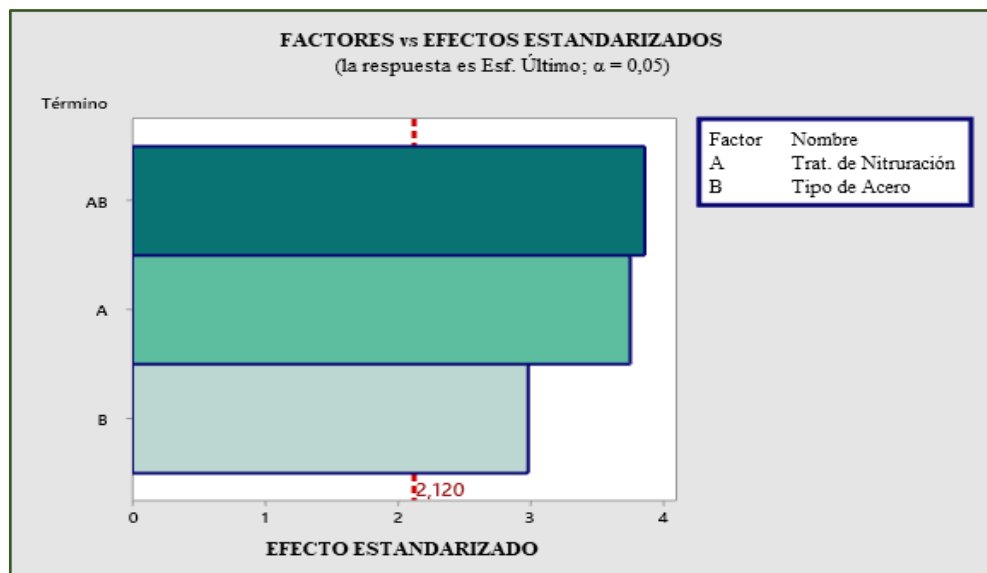


Ilustración 66-4: Efecto estandarizado de los factores sobre el esfuerzo último

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se puede identificar que hay una fuerte incidencia sobre el esfuerzo último tanto de la interacción de los factores A y B; así como del factor A (tratamiento de nitruración) y del factor B (tipo de acero).

4.8.4.6. Fisher Calculado

Tabla 48-4: Fisher calculado para análisis de esfuerzo último

Sustitución en las ecuaciones	Fisher calculado
$F_{oA} = \frac{117178,15}{8310,05}$	$F_{oA} = 14,10$
$F_{oB} = \frac{74070,27}{8310,05}$	$F_{oB} = 8,91$
$F_{oAB} = \frac{124114,74}{8310,05}$	$F_{oAB} = 14,94$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.4.7. Fisher tabulado

$$F_c = 4,49$$

4.8.4.8. Tabla Anova

Tabla 49-4: Análisis Anova del esfuerzo último

F.V.	F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fo	Fc	C.D.
Tratamiento de Nitruración:	A	117178,15	1	117178,15	14,10	4,49	S
Tipo de Acero:	B	74070,27	1	74070,27	8,91		S
Interacción:	AB	124114,74	1	124114,74	14,94		S
Error	Error	132960,84	16	8310,05			
TOTAL	TOTAL	448324,00	19	23596,00			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.8.4.9. Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100$$

$$R^2 = 70,34 \%$$

Interpretación: Se puede apreciar tanto mediante los efectos de los factores sobre la variable respuesta (esfuerzo último), así como con el criterio de decisión que todos los factores inciden de manera significativa en la variabilidad del esfuerzo último, sin embargo, no se puede deducir fácilmente si habrá mayor o menor tendencia a la rotura con uno o con otro acero antes y después del tratamiento, por lo que se requiere realizar las gráficas LSD.

4.8.5. LSD Gráfico

Cálculo de LSD_{AB}

Se determina el valor de $t_{(\alpha/2;GLE)}$

$$t_{(\alpha/2;GLE)} = 2,12$$

Se sustituyen valores en la ecuación

$$LSD_{AB} = 2,12 * \sqrt{\frac{8310,05}{5}}$$

Tabla 50-4: Datos para el método gráfico LSD

	Combinaciones de niveles			
	A-B-	A+B-	A-B+	A+B+
LS	1184,26	1188,72	1463,52	1152,88
MEDIA	1097,83	1102,30	1377,10	1066,46
LI	1011,41	1015,88	1290,68	980,04
LSD AB	97,54			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

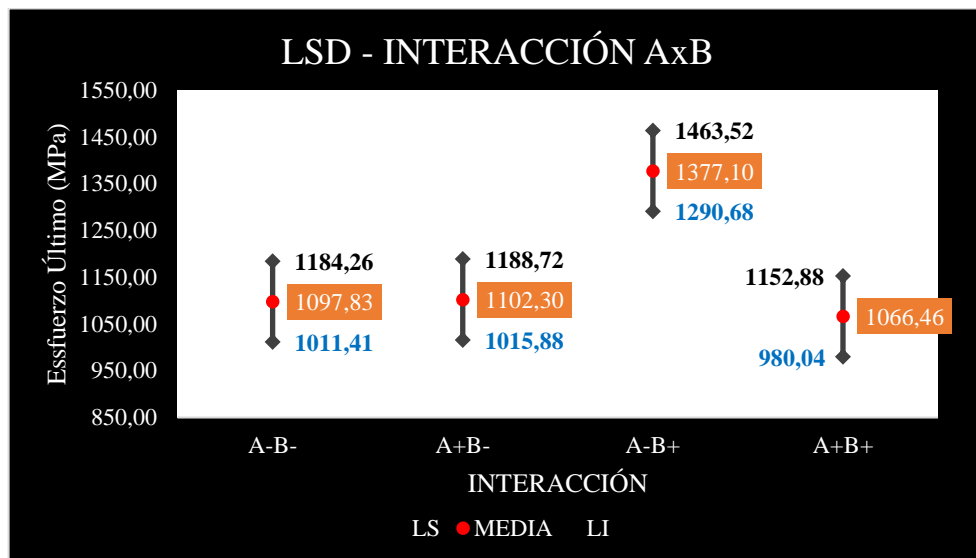


Ilustración 67-4: Esfuerzo último de los aceros con y sin nitruración

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

- A partir de la ilustración 10-4 se observa que después de la nitruración del acero 34CrNiMo6 (B-) el incremento del esfuerzo último medio es mínimo, pasando de 1097,83 MPa a 1102,30 MPa. En cambio, para el acero AISI 4340 (B+), el esfuerzo último medio disminuye 22,55 %, pasando de 1377,10 MPa a 1066,46 MPa.

- Al comparar ambos aceros sin nitruración (A-), se aprecia que el esfuerzo último medio del acero 34CrNiMo6 es 20,3% menor en comparación al del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 1097,83 MPa y 1377,10 MPa respectivamente.
- Adicionalmente, realizando la comparación de ambos aceros con nitruración (A+) se aprecia que esfuerzo último medio del acero 34CrNiMo6 es 3,3 % mayor en comparación al del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 1102,30MPa y 1066,46 MPa respectivamente. Sin embargo, al analizar los rangos en que oscila el esfuerzo último en cada acero (de 1015,88 MPa a 1188,72 MPa en caso del acero 34CrNiMo6 y de 980,04 MPa a 1152,88 MPa para el acero AISI 4340), se dice que no hay diferencia significativa, lo que quiere decir que el esfuerzo último en ambos aceros luego de la nitruración es equivalente.

4.9. Elongación

Tabla 51-4: Elongación obtenida del ensayo de tracción

Tratamiento de Nitruración (A)	Tipo de Acero (B)	
	AISI 4340 (B+)	34CrNiMo6 (B-)
	Elongación (%)	
Con Nitruración (A+)	17,60	15,10
	18,70	17,30
	17,00	16,20
	15,20	18,50
	9,00	11,98
Sin Nitruración (A-)	8,90	20,10
	14,60	18,60
	15,20	21,10
	12,10	20,50
	10,50	12,00

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.1. Hipótesis

Factor A:

Ho: El porcentaje medio de la elongación debido al tratamiento de nitruración es igual.

Ha: El porcentaje medio de la elongación debido al tratamiento de nitruración es diferente.

Factor B:

Ho: El porcentaje medio de la elongación debido al tipo de acero es igual.

Ha: El porcentaje medio de la elongación debido al tipo de acero es diferente.

Factor AB:

Ho: El porcentaje medio de la elongación debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es igual.

Ha: El porcentaje medio de la elongación debido a la interacción del tratamiento de nitruración con el tipo de acero es diferente.

Tabla 52-4: Nomenclatura de Yates para el porcentaje de elongación

Factores		Combinación de niveles	Elongación (%)					Total	Nomenclatura de Yates
A	B		Réplicas						
			1	2	3	4	5		
-	-	A (-), B (-)	20,10	18,60	21,10	20,50	12,00	92,30	-1
+	-	A (+), B (-)	15,10	17,30	16,20	18,50	11,98	79,08	a
-	+	A (-), B (+)	8,90	14,60	15,20	12,10	10,50	61,30	b
+	+	A (+), B (+)	17,60	18,70	17,00	15,20	9,00	77,50	ab

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Número total de Datos

$$N = 20$$

Número de réplicas

$$n = 5$$

4.9.2. Contrastes

Tabla 53-4: Contrastes para análisis del porcentaje de elongación

Sustitución en las ecuaciones	Contrastes
$C_A = 79,08 + 77,50 - 92,30 - 61,30$	$C_A = 2,98$
$C_B = 61,30 + 77,50 - 92,30 - 79,08$	$C_B = -32,58$
$C_{AB} = 77,50 + 92,30 - 79,08 - 61,30$	$C_{AB} = 35,78$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.3. Efectos de los factores A y B, así como su interacción

Tabla 54-4: Efectos para análisis del porcentaje de elongación

Sustitución en las ecuaciones	Efectos
$E_A = \frac{C_A}{2 * 5}$	$E_A = 0,30$
$E_B = \frac{C_B}{2 * 5}$	$E_B = -3,26$
$E_{AB} = \frac{C_{AB}}{2 * 5}$	$E_{AB} = 2,94$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

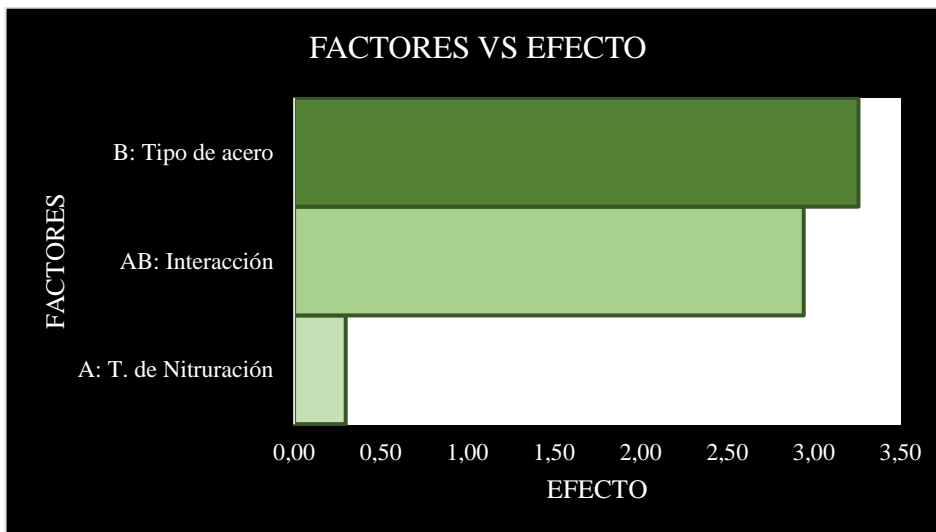


Ilustración 68-4: Efecto de los factores sobre el porcentaje de elongación

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4. Análisis de varianza

4.9.4.1. Suma de Cuadrados

Tabla 55-4: Suma de cuadrados para análisis del porcentaje de elongación

Sustitución en las ecuaciones	Suma de cuadrados
$SC_T = 5075,50 - \frac{(310,18)^2}{20}$	$SC_T = 264,92$
$SC_A = \frac{(2,98)^2}{2^2 * 5}$	$SC_A = 0,44$
$SC_B = \frac{(-32,58)^2}{2^2 * 5}$	$SC_B = 53,07$
$SC_{AB} = \frac{(35,78)^2}{2^2 * 5}$	$SC_{AB} = 43,28$
$SC_E = 264,92 - 0,44 - 53,07 - 43,28$	$SC_E = 168,13$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4.2. Grados de Libertad

Tabla 56-4: Grados de libertad para análisis del porcentaje de elongación

Sustitución en las ecuaciones	Grados de libertad
$GL_A = 2 - 1$	$GL_A = 1$
$GL_B = 2 - 1$	$GL_B = 1$
$GL_{AB} = 2 - 1$	$GL_{AB} = 1$
$GL_T = 20 - 1$	$GL_T = 19$
$GL_E = 19 - 1 - 1 - 1$	$GL_E = 16$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4.3. Cuadrados medios

Tabla 57-4: Cuadrados medios para análisis del porcentaje de elongación

Sustitución en las ecuaciones	Cuadrados medios
$CM_A = \frac{0,44}{1}$	$CM_A = 0,44$
$CM_B = \frac{53,07}{1}$	$CM_B = 53,07$
$CM_{AB} = \frac{43,28}{1}$	$CM_{AB} = 43,28$
$CM_E = \frac{168,13}{16}$	$CM_E = 10,51$
$CM_T = \frac{264,92}{19}$	$CM_T = 13,94$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4.4. Efecto Estandarizado

Tabla 58-4: Efectos estandarizados de la elongación

Factores	Efectos Estandarizados
A	0,21
AB	2,03
B	2,25

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4.5. Efecto de referencia

efecto de referencia = 2,12

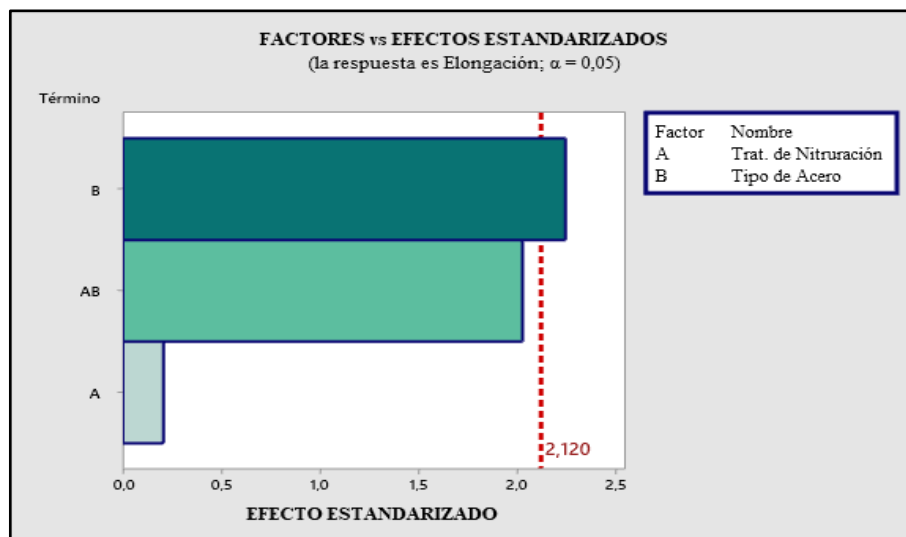


Ilustración 69-4: Efecto estandarizado de los factores sobre la elongación

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: Se puede identificar que hay incidencia del factor B (tipo de acero) sobre la variable respuesta (porcentaje de elongación); sin embargo no hay incidencia del factor A (tratamiento de nitruración), ni de la interacción de ambos factores.

4.9.4.6. Fisher Calculado

Tabla 59-4: Fisher calculado para análisis del porcentaje de elongación

Sustitución en las ecuaciones	Fisher calculado
$F_{oA} = \frac{0,44}{10,51}$	$F_{oA} = 0,04$
$F_{oB} = \frac{53,07}{10,51}$	$F_{oB} = 5,05$
$F_{oAB} = \frac{43,28}{10,51}$	$F_{oAB} = 4,12$

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4.7. Fisher tabulado

$$F_c = 4,49$$

4.9.4.8. Tabla Anova

Tabla 60-4: Análisis Anova del porcentaje de elongación

F.V.	F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fo	Fc	C.D.
Tratamiento de Nitruración:	A	0,44	1	0,44	0,04	4,49	NS
Tipo de Acero:	B	53,07	1	53,07	5,05		S
Interacción:	AB	43,28	1	43,28	4,12		NS
Error	Error	168,13	16	10,51			
TOTAL	TOTAL	264,92	19	13,94			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.9.4.7. Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100$$

$$R^2 = 36,54 \%$$

Interpretación: Se puede apreciar tanto mediante los efectos de los factores sobre la variable respuesta (porcentaje de elongación), así como con el criterio de decisión que el factor A no incide de manera significativa en la variabilidad del porcentaje de elongación, sin embargo, no se puede deducir fácilmente si habrá mayor o menor tendencia a la elongación con uno o con otro acero antes y después del tratamiento, por lo que se requiere realizar las gráficas LSD.

4.9.5. LSD Gráfico

Cálculo de LSD_{AB}

Se determina el valor de $t_{(\alpha/2;GLE)}$

$$t_{(\alpha/2;GLE)} = 2,12$$

Se sustituyen valores en la ecuación

$$LSD_{AB} = 2,12 * \sqrt{\frac{10,51}{5}}$$

Tabla 61-4: Datos para el método gráfico LSD

	Combinaciones de niveles			
	A-B-	A+B-	A-B+	A+B+
LS	21,53	18,89	15,33	18,57
MEDIA	18,46	15,82	12,26	15,50
LI	15,39	12,74	9,19	12,43
LSD AB	3,07			

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

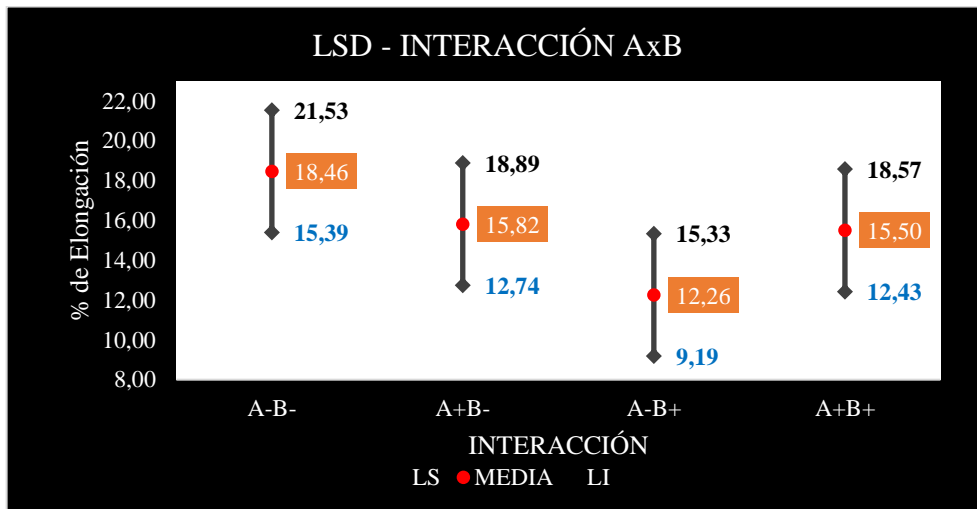


Ilustración 70-4: Elongación de los aceros con y sin nitruración

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación:

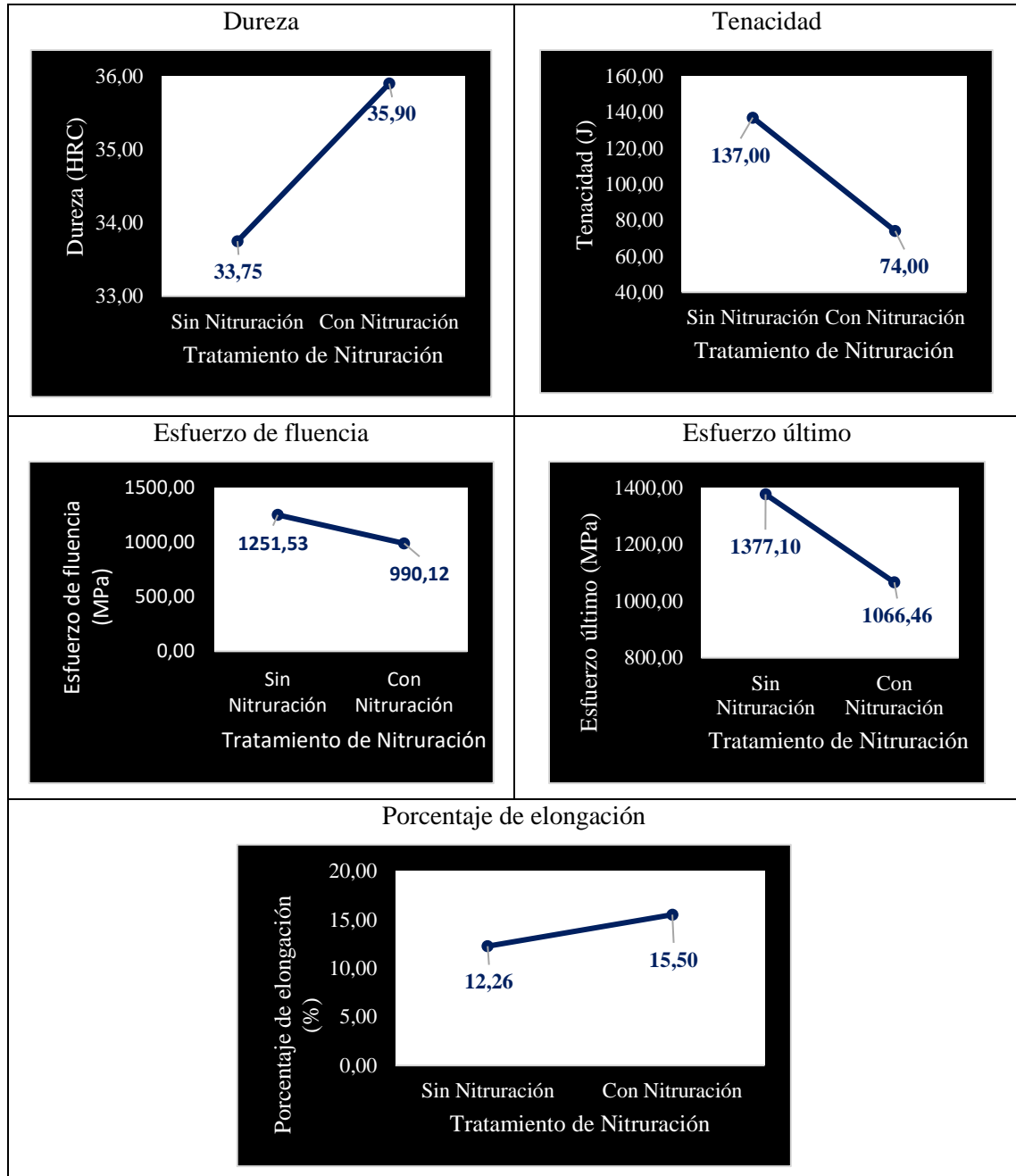
- A partir de la ilustración 12-4 se observa que después de la nitruración del acero 34CrNiMo6 (B-) el porcentaje de elongación medio disminuye un 14,30 %, pasando de 18,46 % a 15,82 %. En cambio, para el acero AISI 4340 (B+), el porcentaje de elongación medio incrementa 26,42 %, pasando de 12,26 % a 15,50 %.
- Al comparar ambos aceros sin nitruración (A-), se aprecia que el porcentaje de elongación medio del acero 34CrNiMo6 es 33,59 % mayor en comparación al del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 18,46 % y 12,26 % respectivamente.
- Adicionalmente, realizando la comparación de ambos aceros con nitruración (A+) se aprecia que el porcentaje de elongación medio del acero 34CrNiMo6 es 2,02 % mayor en comparación al del acero AISI 4340, dichos valores equivalen a 15,82 % y 15,5 % respectivamente. Sin embargo, al analizar los rangos en que oscila el porcentaje de elongación en cada acero (de 12,74 % a 18,89 % en caso del acero 34CrNiMo6 y de 12,43 % a 18,57 % para el acero AISI 4340), se dice que no hay diferencia significativa, lo que

quiere decir que el porcentaje de elongación en ambos aceros luego de la nitruración es equivalente.

4.10. Propiedades mecánicas de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6

4.10.1. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340

Tabla 62-4: Propiedades mecánicas del acero AISI 4340 con y sin nitruración

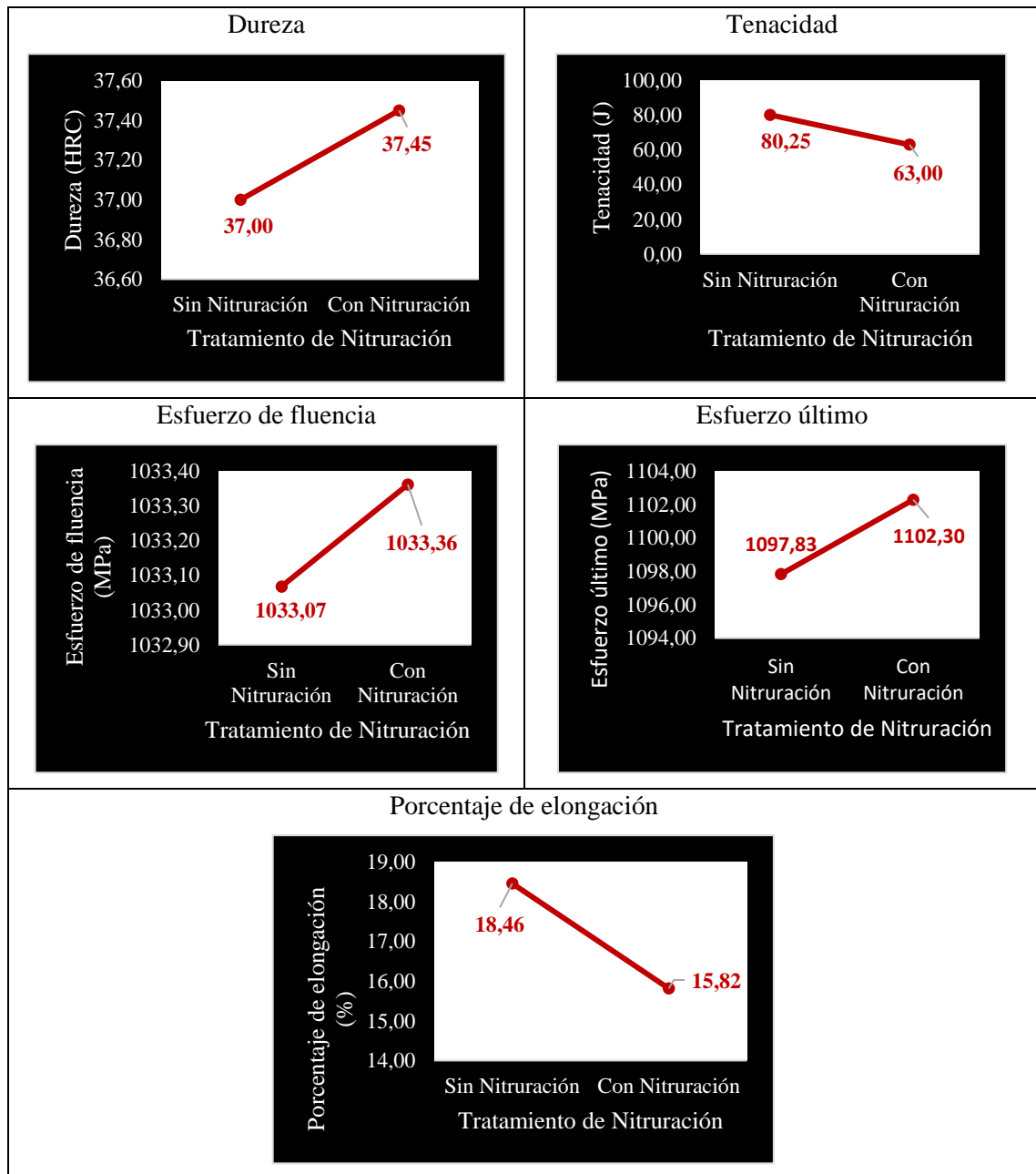


Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: El acero AISI 4340 luego de la aplicación del tratamiento de nitruración, presenta incremento tanto en dureza, así como en la ductilidad; en contraste a esto, la tenacidad disminuye 46% lo que le convierte en un material frágil; además decrece 20,89 % el esfuerzo de fluencia haciendo que este acero sea menos resistente a la deformación plástica; adicionalmente, disminuye 22,55% el esfuerzo último provocando que este material se fracture al aplicar una menor carga axial sobre este.

4.10.2. Propiedades mecánicas del acero 34CrNiMo6

Tabla 63-4: Propiedades mecánicas del acero 34CrNiMo6 con y sin nitruración



Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

Interpretación: El acero 34CrNiMo6 luego de la aplicación del tratamiento de nitruración, se incrementa de manera mínima tanto la dureza, así como el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último a la tracción (1,22%, 0,03% y 0,41% respectivamente); lo que indica que la nitruración no afecta la resistencia a la deformación plástica, ni a la resistencia a la carga axial de este material. En contraste a lo anterior decrece la tenacidad y la ductilidad del acero (21,5% y 14,30 % respectivamente), lo que le convierte en un material frágil.

Tabla 64-4: Cuadro resumen de resultados

	AISI 4340		34CrNiMo6	
	Sin Nitruración	Con Nitruración	Sin Nitruración	Con Nitruración
Dureza (HRC)	33,75	35,90	37,00	37,45
Tenacidad (J)	137,00	74,00	80,25	63,00
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	1251,53	990,12	1033,07	1033,36
Esfuerzo Último (MPa)	1377,10	1066,46	1097,83	1102,30
Elongación (%)	12,26	15,50	18,46	15,82

Realizado por: Casanova, Bryan & Muñoz, Alex; 2022.

4.11. Análisis de resultados

- Al comparar las propiedades mecánicas de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 con y sin nitruración, se determina que resulta ventajosa la utilización del acero AISI 4340 sin nitruración en aplicaciones que requieran mayor tenacidad, resistencia a la deformación plástica y soporte de grandes cargas axiales; mientras que el acero 34CrNiMo6 tanto nitrurado, como sin nitruración presenta un alto grado de dureza, se lo emplea en aplicaciones orientadas a la elaboración de herramientas, bielas y cigüeñales.
- Cabe indicar que la nitruración en el caso de los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6, permite equiparar las propiedades mecánicas de los mismos, disminuyendo en el caso del primero la tenacidad, resistencia a la deformación plástica y soporte de grandes cargas axiales; mientras tanto, se amplía el campo de aplicación del último, lo que facilita la intercambiabilidad de piezas y partes en máquinas, herramientas y equipos dentro de la industria.

CONCLUSIONES

- Considerando los 15 ejes proporcionados por la empresa SERTECPET S.A., las indicaciones establecidas en la normativa ASTM, así como las recomendaciones para el análisis estadístico de varianza de datos que establece un mínimo de 8 muestras, se consideró ampliar este número especímenes a fin de eliminar la mayor cantidad de error al realizar el estudio; determinando un total de 58 probetas para los distintos ensayos; estas fueron modeladas mediante el programa de diseño mecánico SolidWorks Académico.
- Para el mecanizado de las probetas se empleó la técnica de corte por cinta, así como el uso de taladrina para la refrigeración durante este proceso; permitiendo que la microestructura del material no se sobrecaliente, además, con esta técnica se evita que la superficie de las muestras sea contaminada, permitiendo que las fotomicrografías no se alteren y se aprecie de manera precisa el microconstituyente de cada acero.
- Se hizo uso de los laboratorios de análisis de esfuerzos y vibraciones del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica en la ciudad de Quito, así como, el laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; en donde se cuenta con equipos calibrados, en este caso se cuenta tanto con calibración ejecutada por el responsable técnico, así como por parte de la empresa privada para los diferentes equipos; por lo que los resultados son confiables para la realización de estudios posteriores.
- Los resultados reflejados en el trabajo de investigación arrojan que los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 presentan diferencias significativas en la comparación de las propiedades mecánicas sin el proceso de nitruración, por otro lado, al realizar la nitruración en cada uno de los materiales, se determina que no existe diferencia significativa entre sus propiedades mecánicas; además cabe indicar que tampoco se aprecia diferencia entre los microconstituyentes de ambos aceros; en este caso se observa una microestructura con predominancia de martensita tanto para el AISI 4340 y 34CrNiMo6.
- Las diferencias significativas en los aceros AISI 4340 y 34CrNiMo6 previo a la aplicación de la nitruración puede estar definida por varios factores, entre los que se pueden destacar: colada del material, la cantidad de inclusiones no metálicas, proceso de elaboración, temperatura, así como la composición química de cada material.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar la investigación, a fin de estudiar una mayor cantidad de parámetros, en el proceso de nitruración tales como: temperatura, tiempos del proceso y en tipo de colada al momento de la elaboración del material, además un control de calidad en cada uno de los procesos anteriores, con el fin de aumentar el grado de investigación en este trabajo de titulación.
- Se recomienda realizar la mecanización y el nitrurado en un mismo lugar o con identificaciones idóneas para estos tipos de aceros, para evitar que se confundan al momento de pasar del proceso de mecanizado al proceso de nitrurado.
- Se recomienda realizar las calibraciones periódicas en cada uno de los equipos de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, para acortar los tiempos en cada uno de los ensayos que se realizan en investigaciones similares a la propuesta.
- Se recomienda ampliar los resultados de esta investigación mediante el uso de otras metodologías estadísticas, que puedan acoplarse a la cantidad de parámetros y datos establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, María José. *Curva de esfuerzo-deformación idealizada* [blog]. Turbaco , Cartajena, Colombia, 2019. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Curva-de-esfuerzo-deformacion-idealizada-para-materiales-ductiles_fig1_331310495

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals Handbook Volumen 7: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys.* 8^{va} ed.,1972, pp 39-45.

ASKELAND, Donald R. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* 3^{era} ed. Internacional Thomson Editores,1998. ISBN 968-7529-36-9, p 229.

ASTM A370-21. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.*

ASTM E23-18. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.*

ASTM E45-11. *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.*

ASTM E415-21. *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.*

AVNER, SYDNEY H. *Introducción a la Metalurgia Física.* 2^{da} ed. México: Calypso S.A., 1998. ISBN 968-6046-01-1, p 229.

CABRERA ESCOBAR, José Omar. Propuesta de un material alternativo para la construcción de la barra estabilizadora delantera de la suspensión. Caso de estudio Chevrolet Aveo Family 1.5L [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Internacional SEK, Ecuador. 2017. pp. 10-15. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2680>.

CAPOTE LUNA, Vicente . “Tratamientos termoquímicos”. *Temas para la educación* [En línea], 2011, (España) (14), pp. 1-10. [Consulta: 2022-04-21]. ISSN 1989-4023. Disponible en: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docuipdf.aspx?d=8426&s=>

CHOLANGO GAVILANES, Andrea Isabel & ZAPATA CAUTULLIN, Jorge Alejandro. Determinar la resistencia a la tracción y durea del acero AISI/SAE 4340, tratado térmicamente por temple a 860°C y revenido a 280°C, 320°C y 380°C [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2020. pp. 1-6. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19191>.

CRIOLLO CAMACHO, Marcia Ximena. Estudio del temple en el acero utilizando grasas vegetales y su incidencia en las propiedades mecánicas [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2011. pp. 21-50. [Consulta: 2022-04-28]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/1266>.

DIPAC. *Eje AISI 4340 (705)* [blog]. Manta, Ecuador, 2022. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <https://dipacmanta.com/producto/ejes/aisi-4340-705/eje-aisi-4340-705/>

GUTIERREZ PULIDO, Humberto & SALAZAR, Román de la Vara. *Análisis y diseño de experimentos*. 2^{da} ed. México: Mc Graw Hill, 2008. ISBN 970-10-6526-3, p. 513.

GARCÍA GALET, Andrés. Determinación de propiedades mecánicas de materiales comerciales [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad de Sevilla, Sevilla, España. 2018. pp. 1-7. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91772/fichero/TFG-1772-GARCIA.pdf>.

GARCÍA, Jesús; et al. “Nitrurado de una pieza mecánica fabricada con un acero AISI-SAE 4340”. *Virtual.Cuautitlan.Unam.Mx* [en línea], 2018, (México) 3(3), p. 2. [Consulta: 2022-04-21]. ISSN 2448-7236. Disponible en: https://virtual.cuautitlan.unam.mx/CongresoCiTec/Memorias_Congreso/Anio3_No3/Extensos/ID-09.pdf

GGD METALS. *SAE 4340* [blog]. Sao Paulo, Brasil, 2015. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: <https://www.ggdmetals.com.br/en/produto/sae%204340/#:~:text=The%20GGD%204340%20steel%20is,has%20high%20resistance%20to%20fati%20gue>.

GONZÁLEZ, Alejandra; et al. *Nitruración líquida* [blog]. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: <https://prezi.com/p/gvaz7fhvqdia/cementacion-liquida/>

GUZMÁN PEREIRA, Fernando Yoshua. Fractura en aceros de alta resistencia: mecanismos de agrietamiento y autoafinidad en superficies de fractura [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. 2015. pp. 1-11. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/9575/1/1080214961.pdf>.

LIANG, Renyu; et al. “Microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel repaired by laser remelting”. *ELSEVIER*. (2020), (China) p. 4.

NOREN, Anders. *Pulido* [blog]. Isla de la Cartuja, Sevilla, España, 2018. [Consulta: 2022-06-22]. Disponible en: <http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/pulido/>

ÑAUTA UZHCA, Pedro Antonio & RIERA MOROCHO, Christian Xavier. Caracterización de propiedades mecánicas de los aceros para construcción de maquinaria que se comercializan en el Ecuador [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2015. pp. 1-6. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7585>.

PUERTOLAS, José Antonio; et al. *Tecnología de superficies en materiales*. Madrid: Síntesis, 2010. ISBN: 978-84-975668-0-3, p. 30.

SONGSHUN STEEL. *Acero 4340-JIS SNCM439-DIN 1.6563* [blog]. Dongguan, Guangdong, China, 2004. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <https://es.steelpurchase.com/4340-sncm439-16563-acero/>

TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. *Los Tratamiento Termoquímico* [blog]. [Consulta: 2022-04-24]. Disponible en: <https://tecnologiaindustrial864603355.wordpress.com/2020/10/13/los-tratamientos-termoquimicos/>

TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. *Carbonitruración* [blog]. [Consulta: 2022-04-25]. Disponible en: <https://tecnologiaindustrial864603355.wordpress.com/category/materiales/tratamientos-termoquimicos/carbonitruracion/>


TORRES CASTILLO, Carlos Israel & OJEDA PONTON, Marlon Xavier. Tratamientos térmicos, pruebas mecánicas y metalográficas de los aceros utilizados en el campo automotor a nivel nacional [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica del Azuay, Cuenca, Ecuador. 2010. pp. 1-8. [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6294>.

WALDUN STEEL. *Acero Aleado AISI 4340-ASTM A29* [blog]. Fenghuang, Suzhou, China [Consulta: 2022-04-21]. Disponible en: <https://waldunsteel.com/es/products/4340-acero/>


WALDUN STEEL. *34CRNIMO6 / 1.6582 STEEL* [blog]. Fenghuang, Suzhou, China [Consulta: 2022-04-24]. Disponible en: <https://waldunsteel.com/products/34crnimo6-1-6582-steel/>

ANEXOS

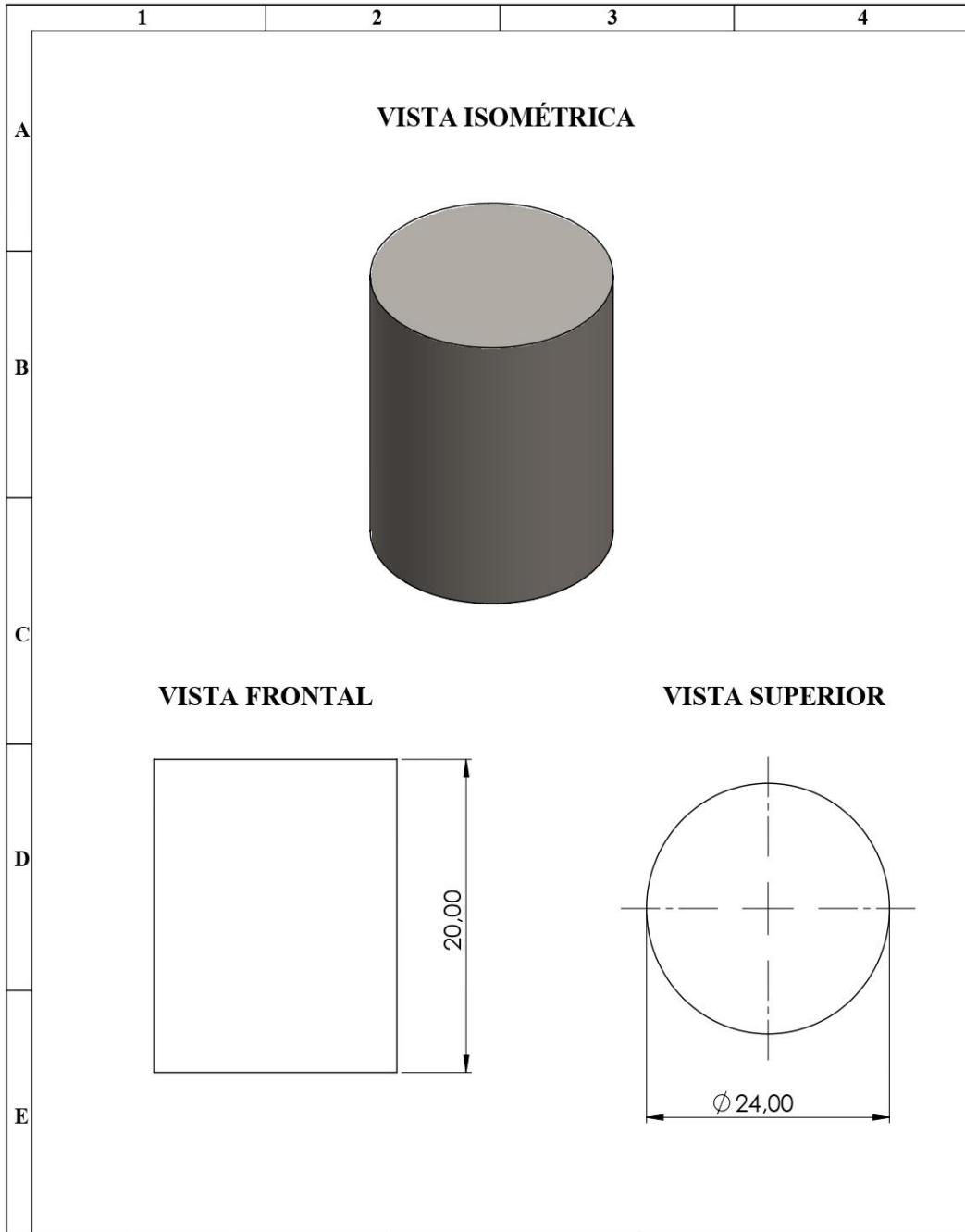
ANEXO A: REPORTE DE ESPECTROMETRÍA DEL ACERO AISI 4340

Bruker Analysis Report						
Sample:						
Analysis Time: 08.07.2022 12:27:29			Method: Fe110			
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	
∅	0,397	0,262	0,762	<0,0030	<0,0030	
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]	
∅	0,753	0,217	2,105	0,086	0,025	
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]	
∅	0,044	<0,0050	0,0045	0,011	<0,020	
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]			
∅	<0,0010	0,018	95,31			

ANEXO B: REPORTE DE ESPECTROMETRÍA DEL ACERO 34CRNIMO6

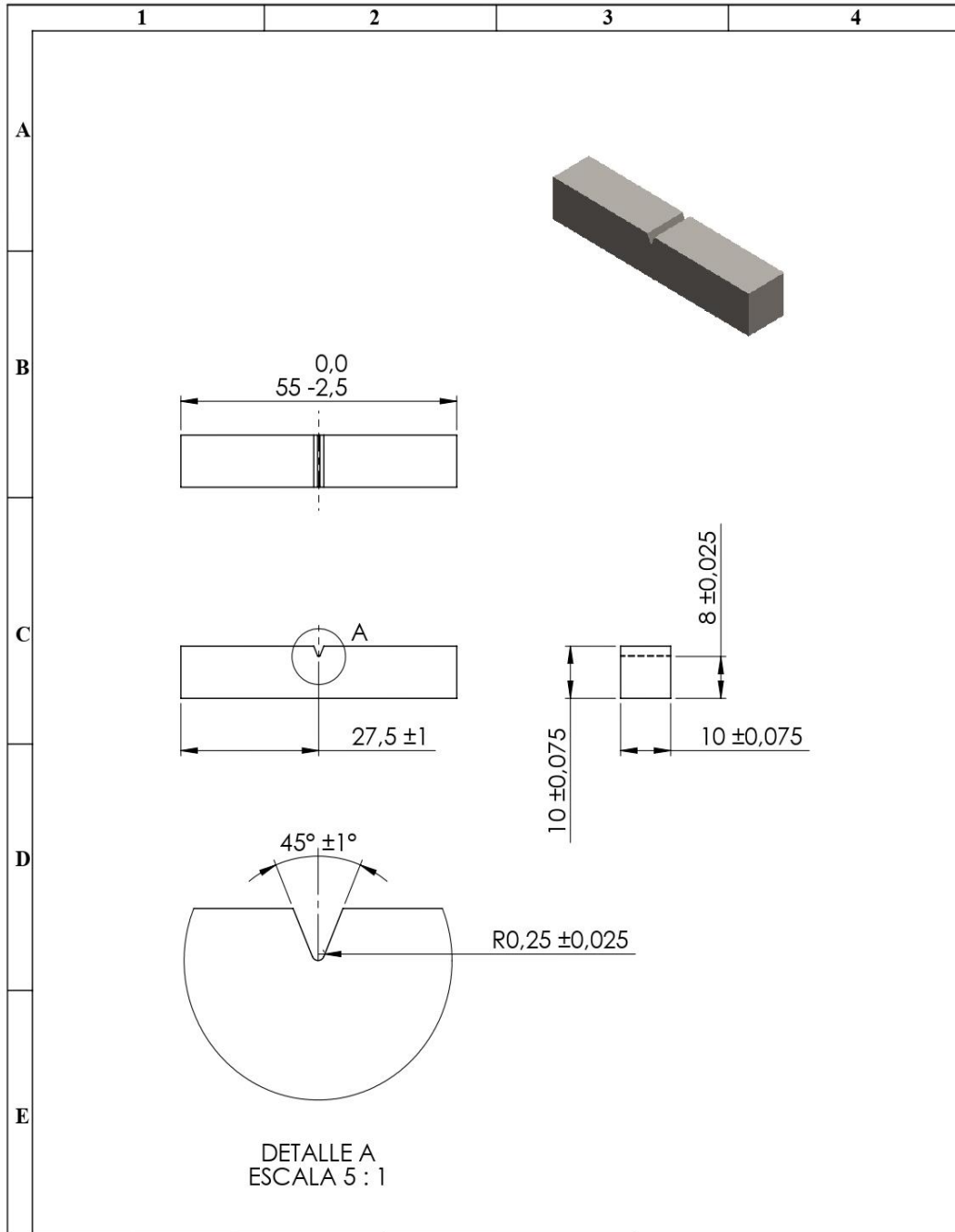
Bruker Analysis Report						
Sample:						
Analysis Time: 08.07.2022 12:15:10			Method: Fe110			
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	
∅	0,347	0,378	0,779	<0,0030	<0,0030	
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]	
∅	1,488	0,222	1,616	0,097	0,022	
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]	
∅	0,010	<0,0050	0,0062	0,014	<0,020	
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]			
∅	<0,0010	0,018	95,00			

ANEXO C: PLANO DE PROBETA PARA ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL



N°. Lámina: 1 de 1		N°. Hojas: 1		Sustitución:		Codificación: FM-EII-PIC-CCA-P1-2022		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL			
Email: alex.muñoz@esPOCH.edu.ec Teléfonos: 0979000526						Denominación: PROBETA 1					
Datos	Nombre	Firma	Fecha					0,11	±0.5 [mm]	2:1	
Proyectó	Sr. Casanova Bryan		2022-04-27								
Dibujó	Sr. Muñoz Alex		2022-04-27	Materiales: ACERO AISI 4340		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE X.A CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACION DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY					
Revisó	Ing Serrano Carlos		2022-04-27	Nombre de archivo: Probeta 4340.sldprt							
Aprobó	Ing Serrano Carlos		2022-04-27								

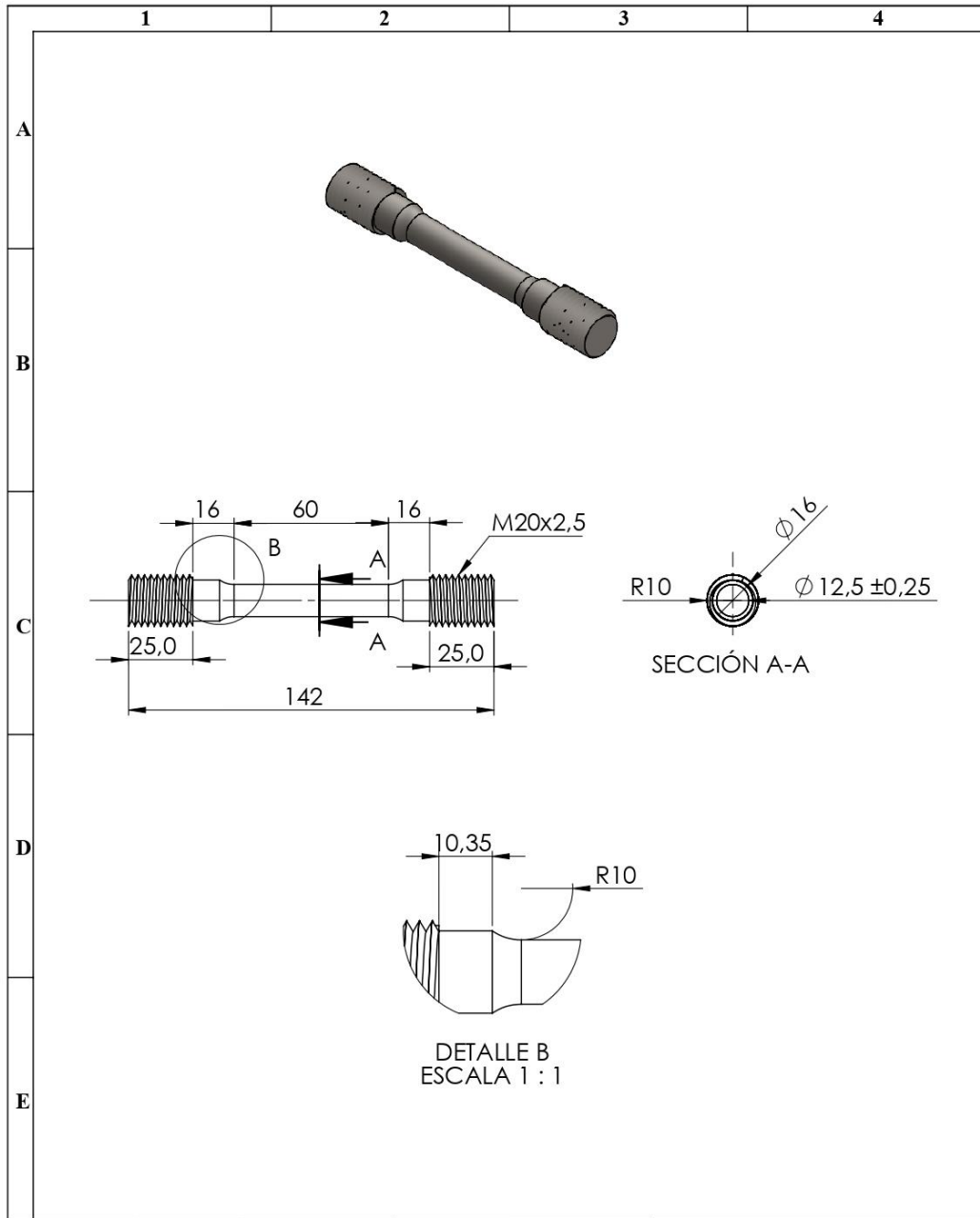
ANEXO D: PLANO DE PROBETA PARA ENSAYO DE IMPACTO



DETALLE A
ESCALA 5 : 1

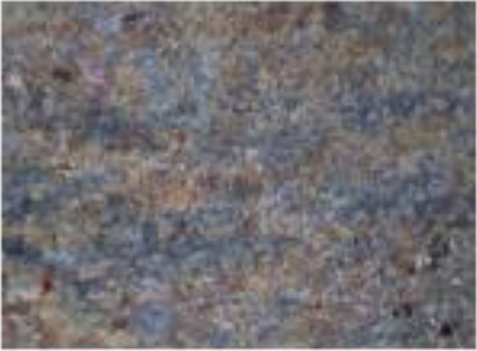







N°. Lámina: 3 de 4		N°. Hojas: 1		Sustitución:		Codificación: FM-EII-IC-PE-PI-AISI-4340		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL							
Email: bryan.casanova@esPOCH.edu.ec Teléfonos: alex.munoz@esPOCH.edu.ec						Denominación:		Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		0,043		±0,025 [mm]		1:1			
Proyectó		Sr. Casanova Bryan				2022/04/26		Probeta de Impacto AISI 4340							
Dibujó		Sr. Muñoz Alex				2022/04/26									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/04/27		Materiales: AISI 4340		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE B.C. Y A.M. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY					
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/04/27		Nombre de archivo: charpy_V_4340.sldprt							

ANEXO E: PLANO DE PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN



N°. Lámina: 1 de 4		N°. Hojas: 1		Sustitución:		Codificación: FM-EII-IC-PE-PT-AISI-4340		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL							
Email: alex.muñoz@espoch.edu.ec Teléfonos: bryan.casanova@espoch.edu.ec						Denominación: Probeta de Tracción AISI 4340						Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Datos	Nombre	Firma	Fecha					0,209	± 0,25 [mm]	1:1					
Proyectó	Sr. Casanova Bryan		2022/04/26					ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE B.C. Y A.M. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY							
Dibujó	Sr. Muñoz Alex		2022/04/26												
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/04/27												
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/04/27			Nombre de archivo: Probeta roscada1_AISI4340.sldprt									









ANEXO F: METALOGRAFÍA DEL ACERO AISI 4340

Aumento 10x	Aumento 40x
	
	
	
	

ANEXO G: METALOGRAFÍA DEL ACERO 34CRNIMO6

Aumento 10x	Aumento 40x
	
	
	
	

ANEXO H: ANÁLISIS DE INCLUSIONES

AISI 4340	34CrNiMo6
	
	
	
	

ANEXO I: REPORTE DE ENSAYO DE IMPACTO (SIN NITRURACIÓN)

Tabla 5. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, AISI 4340.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.055.09	98	133
M22.055.10	100	136
M22.055.11	102	138
M22.055.12	104	141

Tabla 6. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, 34CrNiMo6.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.055.13	58	79
M22.055.14	56	76
M22.055.15	64	87
M22.055.16	58	79

ANEXO J: REPORTE DE ENSAYO DE IMPACTO (CON NITRURACIÓN)

Tabla 3. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.065.09	90	122
M22.065.10	54	73
M22.065.11	52	71
M22.065.12	4	5
M22.065.13	58	79
M22.065.14	54	73
M22.065.15	90	122
M22.065.16	2	3

ANEXO K: REPORTE DE ENSAYO DE TRACCIÓN (SIN NITRURACIÓN)



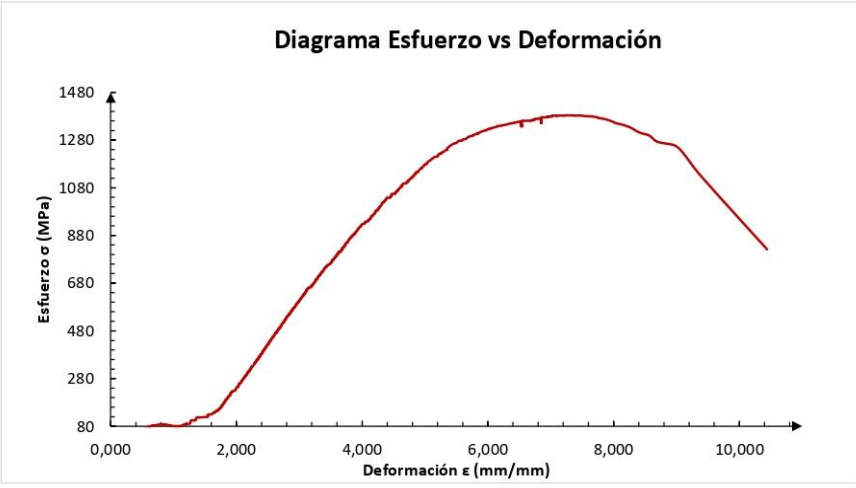


Tabla 2. Ensayo de tracción (AISI 4340)								
Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.057.01	12,41	34 559	153 728	165,9	1 143,9	184,3	1 270,9	8,9
M22.057.02	12,57	42 730	190 072	208,0	1 434,1	222,1	1 531,6	14,6
M22.057.03	12,61	42 879	190 735	207,6	1 431,4	221,5	1 527,3	15,2
M22.057.04	12,50	32 347	143 886	153,0	1 054,9	170,1	1 172,5	12,1

Tabla 3. Ensayo de tracción (34CrNiMo6)								
Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.057.05	12,48	31 077	138 236	153,1	1 055,8	163,9	1 130,1	20,1
M22.057.06	12,42	30 781	136 920	154,6	1 065,8	163,9	1 130,1	18,6
M22.057.07	12,36	30 594	136 089	153,5	1 058,2	164,5	1 134,2	21,1
M22.057.08	12,53	29 499	131 220	146,8	1 012,0	154,3	1 064,2	20,5



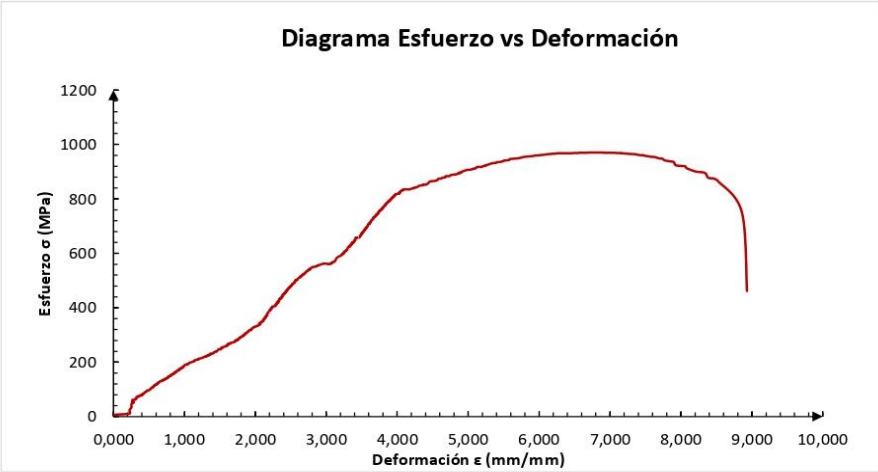


ANEXO L: REPORTE DE ENSAYO DE TRACCIÓN (CON NITRURACIÓN)

Tabla 2. Ensayo de tracción								
Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.065.01	12,58	30 086	133 828	144,6	996,8	156,2	1 076,7	17,6
M22.065.02	12,44	29 563	131 501	145,1	1 000,6	156,9	1 081,9	18,7
M22.065.03	12,44	30 069	133 755	153,6	1 059,0	159,6	1 100,5	15,1
M22.065.04	12,51	30 472	135 546	153,1	1 055,8	159,9	1 102,8	17,3
M22.065.05	12,56	30 690	136 514	152,2	1 049,7	159,8	1 101,8	17,0
M22.065.06	12,51	30 014	133 507	146,7	1 011,3	157,5	1 086,2	16,2
M22.065.07	12,55	28 754	127 903	136,7	942,7	150,0	1 034,0	18,5
M22.065.08	12,42	29 999	133 441	153,6	1 059,3	159,7	1 101,4	15,2



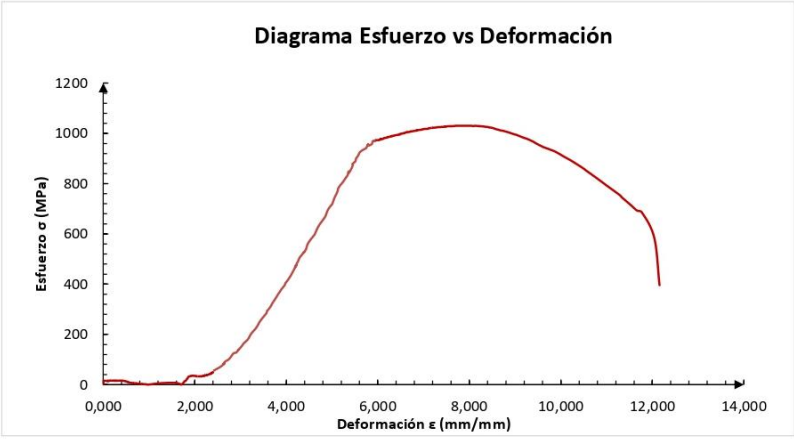


ANEXO M: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN (ACERO AISI 4340 SIN NITRURACIÓN)

 		
UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS		
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM E8		
OBRA O PROYECTO:	CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN NITRURACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA SERTECPECT S.A.	
SOLICITA:	Javier Muñoz	
UBICACIÓN:	Chimborazo	
ID MUESTRA:	AISI 4340	
ORDEN DE TRABAJO:	CTT- FICM - 2022 - 127	
FECHA DE EXPEDICIÓN:	11/07/2022	
DESCRIPCIÓN:	Probeta Circular	
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO		
INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN	
PESO PROBETA:	0.197 kg	
DIÁMETRO DE LA PROBETA:	12,30 mm	
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	AISI 4340	
LONGITUD PROBETA:	141 mm	
TIPO O GRADO:	AISI 4340	
LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	85 mm	
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	
AREA PROBETA:	118,80 mm ²	
CARGA MAXIMA:	164,3 kN	
CARGA ROTURA:	49,38 kN	
RESULTADOS:		
		
RESUMEN		
DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
PUNTO DE FLUENCIA:	141,779 kN	1193,33 MPA
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	140,49 kN	1182,49 MPA
RESISTENCIA ULTIMA:	164,3 kN	1383,20 MPA
ROTURA:	97,61 kN	821,59 MPA
 Firmado electrónicamente por: BYRON LEONARDO LOPEZ SANCHEZ	 Firmado electrónicamente por: CHRISTIAN FABIAN FRIAS CORDOVA	
Ing. Byron Lopez TÉCNICO DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA	Ing. Christian Frías AUXILIAR DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA	



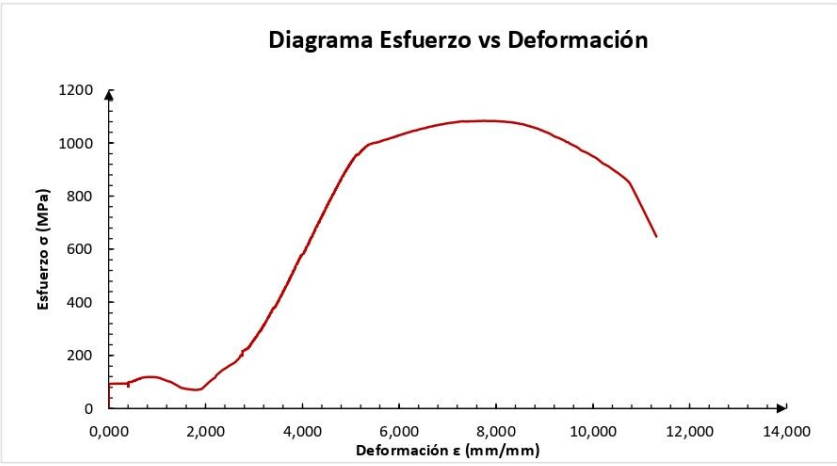


ANEXO N: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN (ACERO AISI 4340 CON NITRURACIÓN)

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS		 CTT FICM <small>CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS</small> <small>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica</small>	
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM E8					
OBRA O PROYECTO:		CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN NITRURACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA SERTECPECT S.A.			
SOLICITA:		Javier Muñoz	ORDEN DE TRABAJO:		CTT- FICM - 2022 - 153
UBICACIÓN:		Chimborazo	FECHA DE EXPEDICIÓN:		01/08/2022
ID MUESTRA:		AISI 4340	DESCRIPCIÓN:		Probeta Circular
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO					
INSTRUMENTO:		MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN			
PESO PROBETA:		0.197 kg	DIÁMETRO DE LA PROBETA:		12,03 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:		Acero Estructural	LONGITUD PROBETA:		142 mm
TIPO O GRADO:		Acero Estructural	LONGITUD ENTRE MORDAZAS:		85 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:		17 °C	AREA PROBETA:		113,70 mm ²
CARGA MAXIMA:		110,3 kN	CARGA ROTURA:		52,49 kN
RESULTADOS:					
					
RESUMEN					
DESCRIPCIÓN		CARGA		ESFUERZO	
PUNTO DE FLUENCIA:		95,99 KN		844,22 MPA	
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:		91,18 KN		801,92 MPA	
RESISTENCIA ULTIMA:		110,3 KN		970,50 MPA	
ROTURA:		52,49 KN		461,73 MPA	
 <small>Firmado electrónicamente por:</small> BYRON LEONARDO LOPEZ SANCHEZ		 <small>Firmado electrónicamente por:</small> CHRISTIAN FABIAN FRIAS CORDOVA			
Ing. Byron Lopez TÉCNICO DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA		Ing. Christian Frías AUXILIAR DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA			

ANEXO O: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN (ACERO 34CRNIMO6 SIN NITRURACIÓN)

 		UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS	
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM E8			
OBRA O PROYECTO:	CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN NITRURACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA SERTECPECT S.A.		
SOLICITA:	Javier Muñoz	ORDEN DE TRABAJO:	CTT- FICM - 2022 - 127
UBICACIÓN:	Chimborazo	FECHA DE EXPEDICIÓN:	08/07/2022
ID MUESTRA:	34Cr Ni Mo 6	DESCRIPCIÓN:	Probeta Circular
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO			
INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0.196 kg	DIÁMETRO DE LA PROBETA:	12,60 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	34Cr Ni Mo 6	LONGITUD PROBETA:	141 mm
TIPO O GRADO:	34Cr Ni Mo 6	LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	85 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	AREA PROBETA:	124,69 mm ²
CARGA MAXIMA:	128,5 kN	CARGA ROTURA:	49,38 kN
RESULTADOS:			
			
RESUMEN			
DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO	
PUNTO DE FLUENCIA:	120,92 KN	973,54 MPA	
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	121,45 KN	969,73 MPA	
RESISTENCIA ULTIMA:	128,5 kN	1030,57 MPA	
ROTURA:	49,38 kN	396,04 MPA	
 Firmado electrónicamente por: BYRON LEONARDO LOPEZ SANCHEZ <hr/> Ing. Byron Lopez TÉCNICO DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA		 Firmado electrónicamente por: CHRISTIAN FABIAN FRIAS CORDOVA <hr/> Ing. Christian Frias AUXILIAR DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA	

ANEXO P: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN (ACERO 34CRNIMO6 NITRURADO)

 		
UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS		
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM E8		
OBRA O PROYECTO:	CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CON Y SIN NITRURACIÓN AISI 4340 Y 34CrNiMo6, PARA LA EMPRESA SERTECPECT S.A.	
SOLICITA:	Javier Muñoz	
UBICACIÓN:	Chimborazo	
ID MUESTRA:	Probeta 1	
ORDEN DE TRABAJO:	CTT- FICM - 2022 - 153	
FECHA DE EXPEDICIÓN:	01/08/2022	
DESCRIPCIÓN:	Probeta Circular	
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO		
INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN	
PESO PROBETA:	0.199 kg	
DIÁMETRO DE LA PROBETA:	12,03 mm	
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Acero Estructural	
LONGITUD PROBETA:	142 mm	
TIPO O GRADO:	Acero Estructural	
LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	85 mm	
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	
AREA PROBETA:	113,70 mm ²	
CARGA MAXIMA:	135,10 kN	
CARGA ROTURA:	80,74 kN	
RESULTADOS:		
		
RESUMEN		
DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
PUNTO DE FLUENCIA:	124,84 KN	1098,01 MPA
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	118,82 KN	1044,99 MPA
RESISTENCIA ULTIMA:	135,10 kN	1188,0 MPA
ROTURA:	80,74 kN	710,16 MPA
 Firmado electrónicamente por: BYRON LEONARDO LOPEZ SANCHEZ _____ Ing. Byron Lopez TÉCNICO DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA	 Firmado electrónicamente por: CHRISTIAN FABIAN FRIAS CORDOVA _____ Ing. Christian Frías AUXILIAR DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA	