

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE VARILLAS DE
ACERO CORRUGADO A706 BAJO LA ACCIÓN DE CARGAS
CÍCLICAS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN AL GRADO DE MAGÍSTER EN
ESTRUCTURAS**

LENIN RÓMULO ABATTA JÁCOME

lenin.abatta@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. MSC. DIEGO SOSA

diego.sosac@epn.edu.ec

Quito, Abril 2017

DECLARACIÓN

Yo Lenin Rómulo Abatta Jácome, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Lenin Rómulo Abatta Jácome

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado Lenin Rómulo Abatta Jácome, bajo mi supervisión.

Ing. MSc. Diego Sosa Caiza
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi familia por su apoyo incondicional.

A los distinguidos profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, en especial a los docentes del Programa de Maestría en Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional.

Al Sr. Ingeniero Diego Sosa por su valiosa ayuda durante el desarrollo de este proyecto.

Al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por haber facilitado las instalaciones para la ejecución de la parte experimental.

DEDICATORIA

¡A Dios!

¡A mi familia!

¡A mis amigos!

CONTENIDO

1. Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Metodología	2
2. Capítulo 2.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.1.1 Materiales	4
2.1.2 Ensayos mecánicos – según estándares	6
2.2 Estudios de fatiga en varillas de acero corrugado.....	8
2.2.1 Fatiga.....	8
2.2.2 Fatiga en varillas de acero de refuerzo.....	10
3. Capítulo 3.....	21
3.1 Disponibilidad tecnológica	21
3.2 Selección de probetas.....	23
3.2.1 Tamaño de la muestra.....	24
3.3 Longitud de probetas.....	25
3.3.1 Cálculo de longitud calibrada inicial.....	26
3.3.2 Cálculo de la longitud total de la probeta.....	27
3.4 Tipos de probetas	27
3.4.1 Probetas estándar	29
3.4.2 Probetas recocidas	29
3.4.3 Probetas soldadas.....	32
3.5 Número de probetas.....	36
3.6 Cconfiguración del equipo.....	38

3.6.1	Ensayo estático	38
3.6.2	Ensayo cíclico – dinámico	40
3.7	Medición de variables post – ensayo	43
3.7.1	Alargamiento.....	43
3.7.2	Energía (Resiliencia y tenacidad)	43
3.7.3	Ciclos de agotamiento	44
3.7.4	Inicio y propagación de fractura.....	44
3.7.5	Análisis químico metalográfico cualitativo	44
3.8	Presentación de resultados.....	44
4.	Capítulo 4.....	45
4.1	Características del equipo	45
4.2	Selección de probetas.....	46
4.3	Preparación de probetas	49
4.3.1	Corte.....	49
4.3.2	Soldadura	50
4.3.3	Recocido.....	52
4.3.4	Químico metalográfico cualitativo	53
4.4	Ensayos mecánicos	55
4.4.1	Ensayo estático	56
4.4.2	Ensayo cíclico.....	57
5.	Capítulo 5.....	58
5.1	Ensayos mecánicos	58
5.1.1	Probetas estándar	59
5.1.2	Probetas soldadas	79
5.1.3	Probetas recocidas	100
5.2	Análisis químico metalográfico cualitativo	113

5.3	Análisis global de resultados	116
5.3.1	Disposición y geometría de los resaltes	116
5.3.2	Factores mecánicos.....	118
5.4	Método de evaluación experimental para el acero A706 bajo la acción de cargas cíclicas	118
5.4.1	Ensayo de fatiga de bajos ciclos experimental	120
5.5	Acumulación de daño.....	121
6.	Capítulo 6.....	122
6.1	Conclusiones.....	122
6.2	Recomendaciones.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Diagrama Estático, Esfuerzo-Deformación A706-A615	5
FIGURA 2.2: Diagrama tensión deformación, ciclo de histéresis	8
FIGURA 2.3: Esfuerzo – Deformación, prueba monotónica, R2,R13 ASTM A615.	10
FIGURA 2.4: Diagrama Esfuerzo – Deformación, histéresis.....	11
FIGURA 2.5: Diagrama Esfuerzo-Deformación, histéresis.....	13
FIGURA 2.6 Sección transversal de varilla 16mm	15
FIGURA 2.7: Probeta agotada por fatiga de altos ciclos, defecto-imperfección por donde inició la fractura.	16
FIGURA 2.8 Diagrama esfuerzo versus alargamiento porcentual – histéresis....	18
FIGURA 2.9: Alargamiento y numero de ciclos por probeta.....	19
FIGURA 3.1: Corte y marcado de probetas, longitud calibrada inicial.....	28
FIGURA 3.2: Probetas para análisis químico y metalográfico, (a) sección transversal, (b) sección longitudinal.	29
FIGURA 3.3: Diagrama Hierro-Carbono.....	31
FIGURA 3.4: Tipo A - Ranura en V simple	34
FIGURA 3.5: Geometría de probetas soldadas.....	34
FIGURA 3.6: Distribución de probetas en varilla de 12 metros	36
FIGURA 3.7: Esfuerzo medio para agotamiento plástico	42
FIGURA 3.8: Diagrama Esfuerzo Vs Alargamiento porcentual, fatiga de bajos ciclos.	42
FIGURA 4.1: Máquina universal de ensayo MTS 810.....	45
FIGURA 4.2: Especificaciones técnicas de Novacero.....	46
FIGURA 4.3: Especificaciones técnicas de Adelca	47
FIGURA 4.4: Especificaciones técnicas de Andec.....	47
FIGURA 4.5: Transporte de varillas	48
FIGURA 4.6: Etiquetado de varillas.....	49
FIGURA 4.7: Corte de varillas – disco abrasivo	49
FIGURA 4.8: Agrupación de probetas.....	50
FIGURA 4.9: Probetas en soporte para soldadura.....	50
FIGURA 4.10: Calibración del proceso de soldadura.....	51

FIGURA 4.11: Limpieza de soldadura entre pases	51
FIGURA 4.12: Búsqueda de raíz en probetas	52
FIGURA 4.13: Recocido de probetas para análisis químico- metalográfico (a), análisis destructivo (b).....	53
FIGURA 4.14: Pulido mecánico de probetas – lijado	53
FIGURA 4.15: Probeta corte transversal, químico metalográfico	54
FIGURA 4.16: Medición de anillos de temple.....	54
FIGURA 4.17: Bordes de grano, sección transversal (der.) y longitudinal (izq.)..	55
FIGURA 4.18: Probetas estándar (a), soldadas (b) y recocidas (c)	55
FIGURA 4.19: Fuerza aplicada Vs Desplazamiento del pistón, ensayo estático MTS.....	56
FIGURA 4.20: Fuerza aplicada Vs Desplazamiento del pistón, ensayo cíclico- dinámico MTS.	57
FIGURA 5.1: Ensayo estático probeta estándar, marca rojo, Ø 14mm	59
FIGURA 5.2: Ensayo cíclico probeta estándar, marca rojo, Ø 14mm	59
FIGURA 5.3: Ensayo estático probeta estándar, marca blanco, Ø 14mm	60
FIGURA 5.4: Ensayo cíclico probeta estándar, marca blanco, Ø 14mm.....	60
FIGURA 5.5: Ensayo estático probeta estándar, marca amarillo, Ø 14mm	61
FIGURA 5.6: Ensayo cíclico probeta estándar, marca amarillo, Ø 14mm.....	61
FIGURA 5.7: Ensayo estático probeta estándar, marca rojo, Ø 16mm	62
FIGURA 5.8: Ensayo cíclico probeta estándar, marca rojo, Ø 16mm	62
FIGURA 5.9: Ensayo estático probeta estándar, marca blanco, Ø 16mm	63
FIGURA 5.10: Ensayo cíclico probeta estándar, marca blanco, Ø 16mm.....	63
FIGURA 5.11: Ensayo estático probeta estándar, marca amarillo, Ø 16mm	64
FIGURA 5.12: Ensayo cíclico probeta estándar, marca amarillo, Ø 16mm.....	64
FIGURA 5.13: Ensayo estático probeta estándar, marca rojo, Ø 18mm	65
FIGURA 5.14: Ensayo cíclico probeta estándar, marca rojo, Ø 18mm	65
FIGURA 5.15: Ensayo estático probeta estándar, marca blanco, Ø 18mm	66
FIGURA 5.16: Ensayo cíclico probeta estándar, marca blanco, Ø 18mm.....	66
FIGURA 5.17: Ensayo estático probeta estándar, marca amarillo, Ø 18mm	67
FIGURA 5.18: Ensayo cíclico probeta estándar, marca amarillo, Ø 18mm.....	67
FIGURA 5.19: Límite de fluencia probetas estándar	69
FIGURA 5.20: Resistencia última a la tracción probetas estándar	70

FIGURA 5.21: Elongación – probetas estándar	72
FIGURA 5.22: Contracción - probetas estándar	73
FIGURA 5.23: Índice de la cantidad de energía – probetas estándar	75
FIGURA 5.24: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas estándar	77
FIGURA 5.25: Fractura por el material.....	77
FIGURA 5.26: Fractura en el resalte	78
FIGURA 5.27: Inicio de fractura – probetas estándar.....	78
FIGURA 5.28: Ensayo estático probeta soldada, marca rojo, Ø 14mm	80
FIGURA 5.29: Ensayo cíclico probeta soldada, marca rojo, Ø 14mm.....	80
FIGURA 5.30: Ensayo estático probeta soldada, marca blando, Ø 14mm.....	81
FIGURA 5.31: Ensayo cíclico probeta soldada, marca blanco, Ø 14mm	81
FIGURA 5.32: Ensayo estático probeta soldada, marca amarillo, Ø 14mm	82
FIGURA 5.33: Ensayo cíclico probeta soldada, marca amarillo, Ø 14mm	82
FIGURA 5.34: Ensayo estático probeta soldada, marca rojo, Ø 16mm	83
FIGURA 5.35: Ensayo cíclico probeta soldada, marca rojo, Ø 16mm.....	83
FIGURA 5.36: Ensayo estático probeta soldada, marca blanco, Ø 16mm.....	84
FIGURA 5.37: Ensayo cíclico probeta soldada, marca blanco, Ø 16mm	84
FIGURA 5.38: Ensayo estático probeta soldada, marca amarillo, Ø 16mm	85
FIGURA 5.39: Ensayo cíclico probeta soldada, marca amarillo, Ø 16mm	85
FIGURA 5.40: Ensayo estático probeta soldada, marca rojo, Ø 18mm	86
FIGURA 5.41: Ensayo cíclico probeta soldada, marca rojo, Ø 18mm.....	86
FIGURA 5.42: Ensayo estático probeta soldada, marca blanco, Ø 18mm.....	87
FIGURA 5.43: Ensayo cíclico probeta soldada, marca blanco, Ø 18mm	87
FIGURA 5.44: Ensayo estático probeta soldada, marca amarillo, Ø 18mm	88
FIGURA 5.45: Ensayo cíclico probeta soldada, marca amarillo, Ø 18mm	88
FIGURA 5.46: Límite de fluencia probetas soldadas.....	90
FIGURA 5.47: Resistencia última a la tracción probetas soldadas	91
FIGURA 5.48: Elongación – probetas soldadas	93
FIGURA 5.49: Contracción - probetas soldadas	94
FIGURA 5.50: Índice de la cantidad de energía – probetas soldadas.....	96
FIGURA 5.51: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas soldadas	97
FIGURA 5.52: Fractura por ZAC (Zona Afectada por Calor).....	98
FIGURA 5.53: Fractura por imperfecciones en la soldadura	98

FIGURA 5.54: Inicio de fractura – probetas soldadas	99
FIGURA 5.55: Ensayo estático probeta recocida, Ø 14mm	100
FIGURA 5.56: Ensayo cíclico probeta recocida, Ø 14mm.....	100
FIGURA 5.57: Ensayo estático probeta recocida, Ø 16mm	101
FIGURA 5.58: Ensayo cíclico probeta recocida, Ø 16mm.....	101
FIGURA 5.59: Ensayo estático probeta recocida, Ø 18mm	102
FIGURA 5.60: Ensayo cíclico-dinámico probeta recocida, Ø 18mm	102
FIGURA 5.61: Límite de fluencia - probetas recocidas	104
FIGURA 5.62: Resistencia última a la tracción - probetas recocidas	105
FIGURA 5.63: Elongación – probetas recocidas	107
FIGURA 5.64: Contracción - probetas recocidas	108
FIGURA 5.65: Índice de la cantidad de energía – probetas recocidas.....	109
FIGURA 5.66: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas recocidas	111
FIGURA 5.67: Inicio de fractura – probetas recocidas	112
FIGURA 5.68: Composición química típica del acero A706	113
FIGURA 5.69: Composición química del acero A706.....	114
FIGURA 5.70: Micro fracturas en sentido longitudinal acero A706	114
FIGURA 5.71: Anillo de temple acero termotratado	115
FIGURA 5.74: Distribución normal de probabilidad de agotamiento de probetas	120
FIGURA 5.75: Acumulación de daño marca rojo.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: Longitud libre entre mordazas y deformación según (UNE-36065EX, 2000).....	8
TABLA 2.2: Reporte técnico del fabricante de acero A615	12
TABLA 2.3: Resultados de fatiga de bajos ciclos, amplitud constante	13
TABLA 3.1: Especificaciones mecánicas para varillas INEN 2167.....	22
TABLA 3.2: Longitud calibrada inicial de probetas	26
TABLA 3.3: Composición química.....	30
TABLA 3.4: Temperatura y tiempo de recocido de probetas.....	32
TABLA 3.5: Requisitos de soldadura para juntas directas	33
TABLA 3.6: Requisitos del material de aporte.....	35
TABLA 3.7: Temperatura mínima de precalentamiento y entrepases	36
TABLA 3.8: Distribución de probetas por tramos	37
TABLA 3.9: Cantidad de probetas por tramo y totales.	37
TABLA 3.10: Relación de aplicación de esfuerzos	39
TABLA 3.11: Aplicación de esfuerzo y tiempo de duración de un ensayo estático	39
TABLA 3.12: Coeficientes según tipo de edificación	41
TABLA 3.13: Propiedades mecánicas - alargamiento	43
TABLA 4.1: Propiedades mecánicas del acero ecuatoriano	48
TABLA 4.2: Total de probetas oficiales para ensayo estático	56
TABLA 4.3: Total de probetas oficiales para ensayo cíclico dinámico	57
TABLA 5.1: Propiedades mecánicas probetas estándar	68
TABLA 5.2: Elongación y contracción – probetas estándar	71
TABLA 5.3: Índice de la cantidad de energía – probetas estándar	74
TABLA 5.4: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas estándar.....	76
TABLA 5.5: Propiedades mecánicas probetas soldadas.....	89
TABLA 5.6: Elongación y contracción – probetas soldadas	92
TABLA 5.7: Índice de la cantidad de energía – probetas soldadas	95
TABLA 5.8: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas soldadas	97
TABLA 5.9 : Propiedades mecánicas probetas recocidas.....	103

TABLA 5.10: Elongación y contracción – probetas recocidas	106
TABLA 5.11: Índice de la cantidad de energía – probetas recocidas	109
TABLA 5.12 : Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas recocidas	110
TABLA 5.13: Inclinación de resaltes.....	116
TABLA 5.14: Características físicas de las varillas con resaltes para hormigón armado.	117
TABLA 5.15: Tamaño de los resaltes de las varillas analizadas	117
TABLA 5.16: Ciclos de agotamiento de la capacidad – probetas estándar.....	119
TABLA 5.17: Método de evaluación de acero A706 bajo la acción de cargas cíclicas	121

RESUMEN

El acero de refuerzo es utilizado ampliamente en las construcciones de hormigón, considerando un comportamiento ideal y homogéneo, si bien de este acero se conoce claramente su comportamiento estático, esta investigación analiza su comportamiento bajo la acción de cargas cíclicas, produciendo fatiga de bajos ciclos. Identificando variables que inciden en el agotamiento de las diferentes probetas de las diferentes productoras de acero nacional, proporcionando información que pretende mejorar la calidad del acero. Se realizaron ensayos destructivos cíclicos a tracción – tracción en probetas obtenidas de varillas comerciales de diámetros 14, 16 y 18 milímetros en una máquina universal de ensayo programable, controlando la fuerza de aplicación de carga hasta agotar su capacidad, obteniendo resultados reproducibles. Determinando una tendencia de fractura debido a la geometría de resaltes en dos de las de las marcas analizadas, disminución de ductilidad en todas las marcas analizadas posterior a la aplicación de soldadura, a pesar de tener un similar material base con que se construyen. Estableciendo un posible método experimental para evaluar el comportamiento del acero de refuerzo bajo la acción de cargas cíclicas.

ABSTRACT

Reinforcing steel is widely used in concrete constructions, considering an ideal and homogeneous behavior, although this steel is clearly known its static behavior, this research analyzes its behavior submitted the action of cyclic loads, producing fatigue of low cycles. Identifying variables that affect the exhaustion of the different specimens of the different national steel producers, providing information that aims to improve the quality of steel. Destructive tensile - tensile tests were development out on specimens obtained from commercial bars with diameters 14, 16 and 18 millimeters in a universal programmable test machine, controlling the load application force until finish the mechanical capacity, obtaining reproducible results. Determining a tendency of fracture due to the geometry in two of the marks analyzed, decrease of ductility in all the marks analyzed by application of welding, the similar base material with which they are constructed. Establishing a possible experimental method to evaluate the behavior of reinforcing steel under the action of cyclic loads.

PRESENTACIÓN

El presente Proyecto de Investigación y Desarrollo (Titulación), se encuentra conformado por los siguientes capítulos:

Capítulo 1

Introducción.- Presentación de los objetivos y la metodología que se llevara a cabo en esta investigación.

Capítulo 2

Estado del Arte.- información sobre ensayos mecánicos normalizados tanto estáticos como cíclicos, estudios realizados sobre fatiga de bajos ciclos en acero de refuerzo.

Capítulo 3

Diseño de experimento.- En función del estado del arte, se establecen técnicas y procedimientos a ser ejecutados en la fase experimental.

Capítulo 4

Ejecución de experimento.- Ejecución del diseño de experimentos, registro de datos obtenidos durante la etapa experimental.

Capítulo 5

Análisis de resultados.- Análisis y discusión de los resultados obtenidos, determinación del comportamiento del acero bajo la acción de cargas cíclicas.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones.- Recopilación de información analizada y consolidada concluyente, estableciendo recomendaciones para mejorar la calidad del acero de producción nacional.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación está centrado en el estudio del acero A706, uno de los materiales más importantes en las edificaciones y proyectos construidos con hormigón armado. Si bien la configuración estructural está bien estudiada y conocida, el comportamiento de la misma no solo depende de la habilidad del diseñador para realizar diseños sismo-resistentes sino también de los materiales que se utiliza en la construcción.

Al ocurrir un evento sísmico, elementos específicos de la edificación deben agotar su capacidad mediante flexión, formado rótulas plásticas, disipando energía, produciendo fatiga de bajos ciclos en el acero de refuerzo, es decir, deformando permanente por cada ciclo de carga aplicado.

Diagramas estáticos obtenidos en laboratorio mediante una máquina universal de ensayo, muestran que el esfuerzo para llegar a fluencia de estos aceros de producción nacional está entre 4200 y 5450 kg/cm², cumpliendo con criterios del ACI y las normas INEN, entonces, ¿qué marca de acero tiene un mejor comportamiento ante cargas cíclicas - dinámicas?, ¿cuál sería un método adecuado para evaluar esta característica?

Actualmente es común encontrar acero A706 y bajo pedido exclusivo se puede obtener acero A615.

Esta investigación es de gran interés debido a la gran demanda de este producto, acero A706, en diversos diseños o construcciones. En el 2014 la demanda de acero para la construcción fue del alrededor de 800.000,00 toneladas según el gerente de materia prima de ANDEC (Romo, 2014).

1.2 OBJETIVO GENERAL

- Estudiar y analizar el comportamiento de varillas de acero corrugado de producción nacional, sometido a cargas cíclicas de tracción – tracción.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el número de probetas para realizar el estudio de fatiga de bajos ciclos.
- Realizar ensayos mecánicos aplicando cargas cíclicas en varillas de acero corrugadas de producción ecuatoriana.
- Analizar resultados obtenidos por el ensayo mecánico de aplicación de cargas cíclicas.
- Determinar la o las varillas de acero corrugado con mejor comportamiento ante cargas cíclicas – dinámicas.
- Analizar el inicio y propagación de la fractura de las varillas de acero corrugado.

1.4 METODOLOGÍA

- Las varillas de acero corrugado A706 son adquiridas aleatoriamente en el mercado local de la provincia de Pichincha.
- Se analizarán tres tipos de probetas: estándar, soldadas y recocidas.
- Se determinará un número de ensayos adecuado de tal manera de establecer reproducibilidad de resultados.
- Se determinará la longitud de la probeta, marcado para análisis de alargamiento, se colocará identificativos por marca.
- Los ensayos mecánicos se realizarán en una máquina universal de ensayo con capacidad de aplicar cargas estáticas y cíclicas.
- Los ensayos cíclicos tracción – tracción serán ejecutados en una máquina universal de ensayo, deformando permanentemente en cada ciclo de carga aplicado, es decir, realizando fatiga de bajos ciclos,

teniendo como parámetros plenamente definidos a la fuerza, función y frecuencia de aplicación de carga.

Obteniendo los siguientes parámetros de análisis.

- Diagrama estático
- Diagrama histerético
- Porcentaje de alargamiento de las probetas.
- Porcentaje de contracción de la zona de fractura.
- Número de ciclos resistidos, hasta agotar la capacidad de la probeta.
- Índice de la cantidad de energía absorbida por la probeta.
- Análisis del inicio y propagación de la fractura.
- Análisis estadístico de resultados.

Al analizar los resultados obtenidos, se realiza una comparación entre las productoras de acero, estableciendo la marca o marcas que tienen un mejor comportamiento ante cargas cíclicas – dinámicas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Previo a la ejecución de un proyecto de investigación, es importante la revisión de la producción científica, así como también de normas o estándares nacionales o internacionales que están alineados con la temática del proyecto “*Estudio y análisis del comportamiento de varillas de acero corrugado a706 bajo la acción de cargas cíclicas*”, por lo que se realizará la revisión del estado del arte de las siguientes áreas de conocimiento:

- Materiales, acero A706.
- Ensayos mecánicos
- Estudios de fatiga de varillas de acero corrugado

2.1.1 MATERIALES

La producción de acero de refuerzo está regularizado por las normas establecidas por el INEN “Instituto Ecuatoriano de normalización”, en la norma (INEN-2167, 2011) – “Varillas de acero con resaltes, laminadas en caliente, soldables, microaleadas o termotratadas, para hormigón armado, requisitos” la cual, establece los lineamientos principales para la producción e inspección del acero A706, como son:

- Características físicas de las varillas, estableciendo sus límites dimensionales.
- Especificaciones mecánicas, en donde se establece los límites de fluencia, superior 5500 kg/cm² e inferior 4200 kg/cm², así como también su alargamiento % permitido según el diámetro.
- Composición química, donde se establece el porcentaje máximo de cada componente que constituye el acero A706.

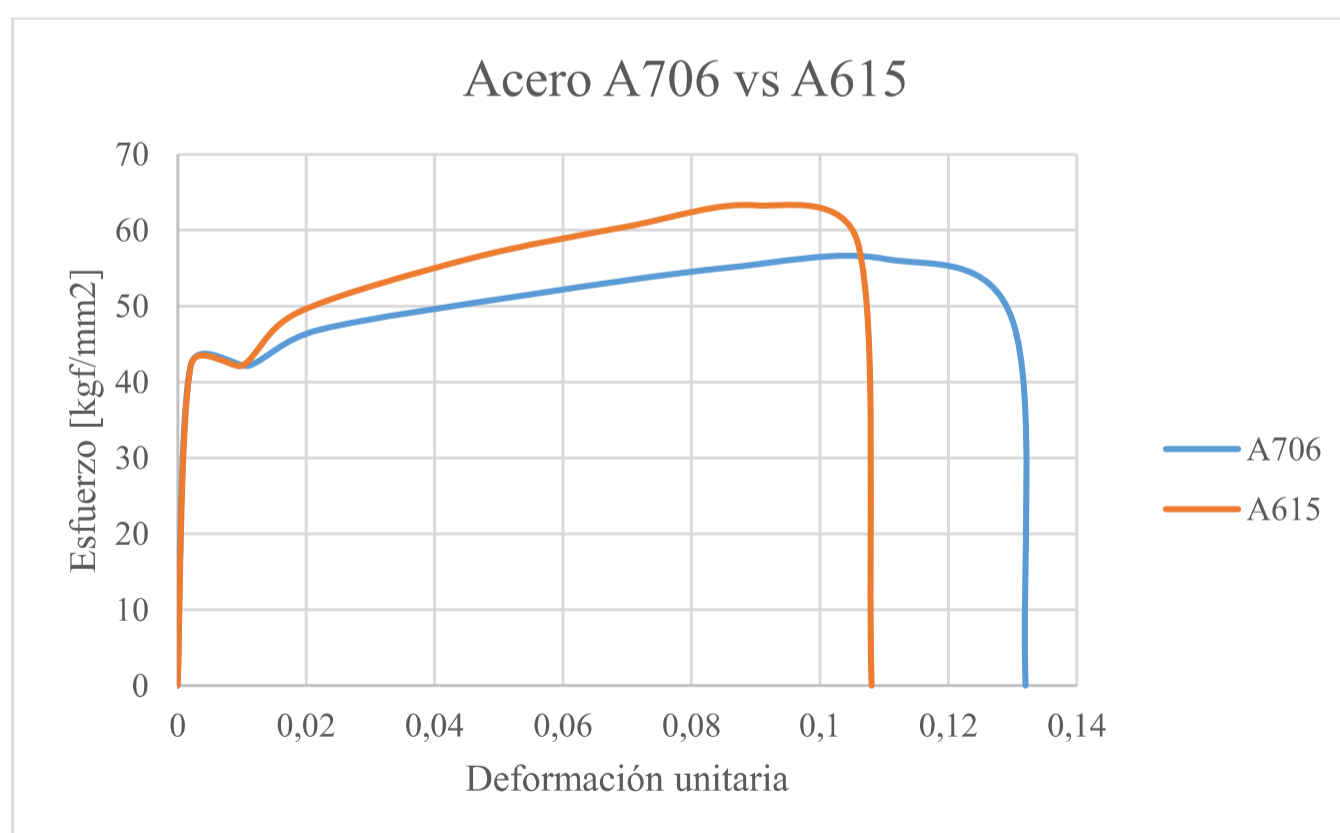
- Características geométricas con respecto a los resaltes.

En la norma INEN 2167 hace referencia al estándar A706/A706M, “Barras de acero de baja aleación deformadas y lisas para concreto reforzado”, donde establece los lineamientos principales para la producción e inspección del acero A706:

- Características físicas, dimensiones, peso nominal por unidad de longitud.
- Especificaciones mecánicas, en donde se establece los límites de fluencia superior 540 MPa e inferior 420 MPa, así como también su alargamiento % permitido según el diámetro.
- Composición química, donde se establece el porcentaje máximo de cada componente que constituye el acero A706.
- Determinación del Carbono Equivalente.
- Requerimientos de doblado en función de los diámetros.

En Ecuador además de producir acero A706, bajo pedido, se puede adquirir acero A615, cuyas principales diferencias son el esfuerzo último y la ductilidad, como se puede ver en la Figura 2.1.

FIGURA 2.1: Diagrama Estático, Esfuerzo-Deformación A706-A615



Fuente: Datos de Software de Análisis Estructural

2.1.2 ENSAYOS MECÁNICOS – SEGÚN ESTÁNDARES

Para caracterizar mecánicamente el acero A706, se utiliza una máquina universal de ensayos bajo los parámetros establecidos en un estándar, es este caso las normas INEN y ASTM. Previo a la revisión de cargas cíclicas, es necesario revisar los ensayos mecánicos estáticos convencionales que se realizan comúnmente en laboratorios y productoras de acero a nivel global.

2.1.2.1 Ensayos estáticos

Según el ASTM, la norma para caracterización del aceros es la (ASTM-A370, 2016) “Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero”, en donde, el ensayo mecánico de tracción para varillas de acero está en el Anexo A9 de la norma, mencionando que, los requisitos de prueba para las barras de acero de refuerzo se han integrado en las especificaciones de los productos de referencia.

La norma de referencia en Ecuador es la (INEN-2167, 2011) para la producción de acero de refuerzo en construcciones de hormigón en Ecuador, donde establece que punto de fluencia y resistencia a la tracción debe determinarse por cualquiera de los métodos convencionales establecidos en la (INEN-0109, 2009), “Ensayo de tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente”.

2.1.2.2 Ensayos cíclicos – dinámicos

- Las normas ASTM, sugieren un método para evaluar materiales bajo la acción de cargas cíclicas, específicamente la norma (ASTM-E606, 2012) “Método estándar para pruebas de fatiga con control de deformación” empleado para estudios de fatiga en materiales homogéneos, sujetos a un carga uni-axial, este método también puede evaluar materiales bajo control de fuerza, así como también bajo un control de esfuerzos.

- La Norma Española Experimental (UNE-36065EX, 2000), sugiere dos métodos para evaluar varillas de acero de refuerzo a fatiga, que se detallan a continuación:

Ensayo de fatiga.- El ensayo consiste en someter las barras a un esfuerzo axial, cíclico y controlado, entre un valor máximo y otro mínimo, ambos positivos. El ensayo se realizará sobre barras rectas a las que se aplicará una tensión pulsatoria pero siempre positiva.

Las probetas tendrán la sección completa de la barra, es decir, no se considerará válido el ensayo de probetas mecanizadas.

Las condiciones para el ensayo son las siguientes:

- Tensión máxima $\sigma_{\max}=0.6 R_e$ nominal
- Amplitud $2\sigma_a=\sigma_{\max}-\sigma_{\min}=150$ MPa
- Frecuencia ≤ 200 Hz
- Longitud libre entre mordazas $\geq 10 d$

El ensayo se realizará a temperatura ambiente (entre 10°C y 35°C). El ensayo se continuará hasta que alcancen 2×10^6 ciclos o hasta que se produzca la rotura de la probeta.

Si la rotura se produce en la zona de las mordazas inferior a $2 \varnothing$ del punto de sujeción, el ensayo se considera nulo.

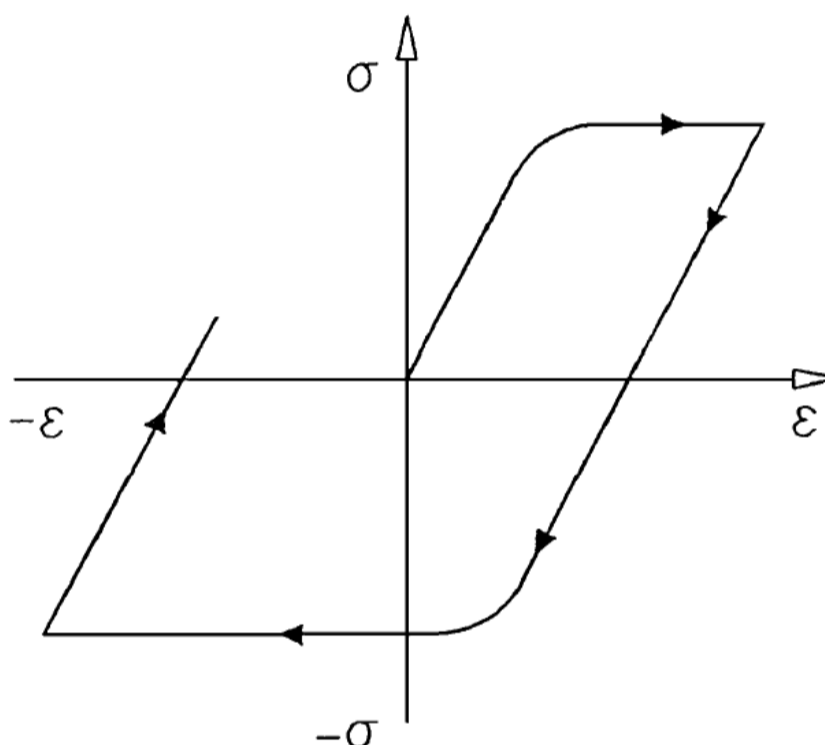
Ensayo de carga cíclica.- El ensayo consiste en someter a una probeta a tres ciclos completos de histéresis, simétricos, Figura 2.2, a una frecuencia de 1 a 3 Hz, y con las longitudes libres entre mordazas y las deformaciones máximas de tracción y compresión siguientes, Tabla 2.1.

TABLA 2.1: Longitud libre entre mordazas y deformación según (UNE-36065EX, 2000)

Diámetro nominal	Longitud libre	Deformación
$d \leq 16$	5d	± 4
$16 < d < 25$	10d	± 2.5
$25 \leq 2d$	15d	± 1.5

Fuente: (UNE-36065EX, 2000)

FIGURA 2.2: Diagrama tensión deformación, ciclo de histéresis



Fuente: (UNE-36065EX, 2000)

2.2 ESTUDIOS DE FATIGA EN VARILLAS DE ACERO CORRUGADO

Previo a la revisión de técnicas y ensayos para la evaluación de varillas de acero refuerzo sometidas a cargas cíclicas, es importante la definición de fatiga y más aun la que se desarrolla en bajos ciclos, objetivo de esta investigación.

2.2.1 FATIGA

Según, (Schijve, 2004), en su libro "Fatiga de estructuras y de materiales", capítulo 6, describe como un fenómeno que ha tomado mucha importancia desde los primeros estudios realizados por Coffin y Manson en los años cincuenta, siendo

este un problema totalmente diferente a la fatiga de altos ciclos. Fatiga de bajos ciclos ocurre cuando existe una deformación plástica por cada ciclo de carga.

Según, (Raman, 2006), en su libro “Selección y aplicación de materiales en Ingeniería Mecánica”, define, fatiga de altos ciclos es aquella donde el nivel de esfuerzos es inferior al límite de fluencia, agotando la capacidad en miles de ciclos. Fatiga de bajos ciclos es el agotamiento de elemento en pocos ciclos, por lo general este tipo de fatiga se encuentran en elementos estructurales en el área de *ingeniería civil*. Las condiciones de fatiga cambian de forma continua debido al endurecimiento por un trabajo continuo. La ley aplicada para fatiga de bajos ciclos es la Coffin-Manson:

$$\Delta\varepsilon_{pl}(Nf)^b = C_2 \quad (2.1)$$

donde:

$\Delta\varepsilon_{pl}$ es la deformación plástica en cada ciclo de fatiga de bajos ciclos.

b y C_2 son constantes características del material.

Nf número de ciclos hasta la fractura.

Según (Brown Jeff, 2000), la fatiga de bajos ciclos es caracterizada por una amplia deformación dando como resultado que el material se agote relativamente en menos de 1000 ciclos. Durante un evento sísmico, las estructuras de concreto reforzado son sometidas a fuertes movimientos del suelo, que inducen deformaciones inelásticas en el acero de refuerzo. Mientras el acero de refuerzo este apropiadamente detallado en las zonas críticas de la estructura (rótula plástica) puede prevenir el colapso como respuesta a los grandes desplazamientos, siendo las estructuras civiles susceptibles por acumulación de daño por fatiga de bajos ciclos.

El agotamiento de un material está definido por el número de ciclos a una determinada amplitud de deformación. Para materiales que tienen propiedades elásticas y plásticas como es el caso de las varillas reforzadas de acero, la curva de vida para fatiga está representada en dos regiones. La primera describe la fatiga de bajos ciclos (menos de 1000 ciclos) y está controlada por la deformación

plástica. La segunda describe a la fatiga de altos ciclos controlado primordialmente por deformación elástica.

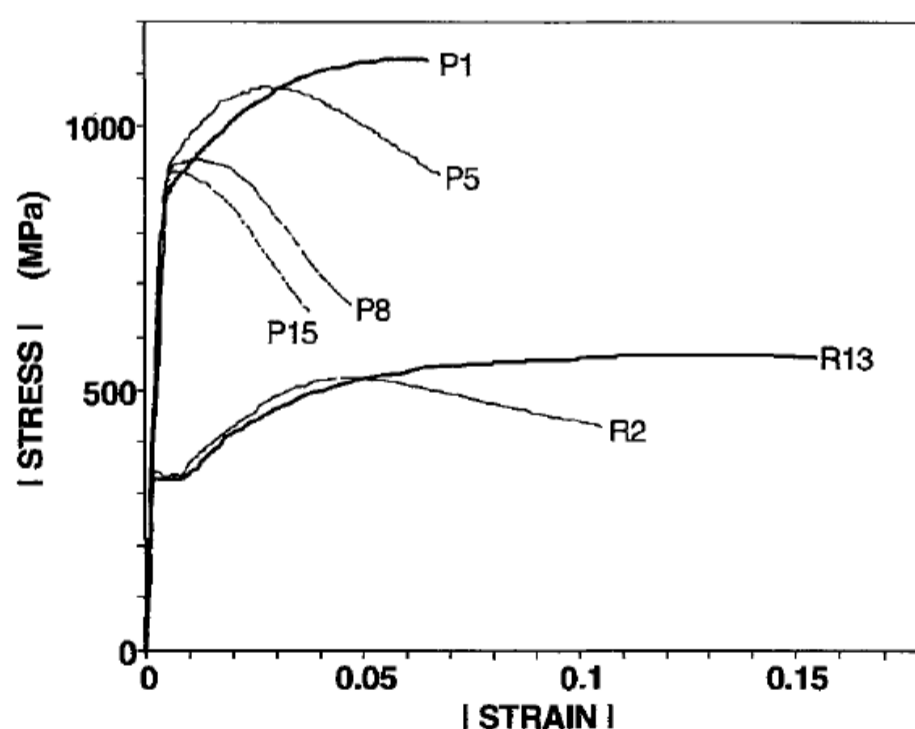
2.2.2 FATIGA EN VARILLAS DE ACERO DE REFUERZO

Definido el concepto de fatiga y más aún cuando se produce en bajos ciclos que es el objetivo de esta investigación, a continuación se muestra varias técnicas, ensayos y otros para la evaluación de varillas de acero corrugado sometidas a cargas cíclicas de bibliografía disponible en artículos científicos y otros.

Según (J.B. Mander, 1994), en un evento sísmico, se puede esperar que el acero de refuerzo longitudinal en elementos de hormigón estructural reforzado, experimenten grandes inversiones de tracción y compresión por deformación típicamente de una a cinco equi-amplitudes totalmente invertidas.

La fractura del acero de refuerzo longitudinal es debido a la fatiga de bajo ciclos, que es uno de los modos de fallo prominentes para los miembros de flexión con o sin bajos niveles de carga axial.

FIGURA 2.3: Esfuerzo – Deformación, prueba monotónica, R2,R13 ASTM A615.



Fuente: (J.B. Mander, 1994)

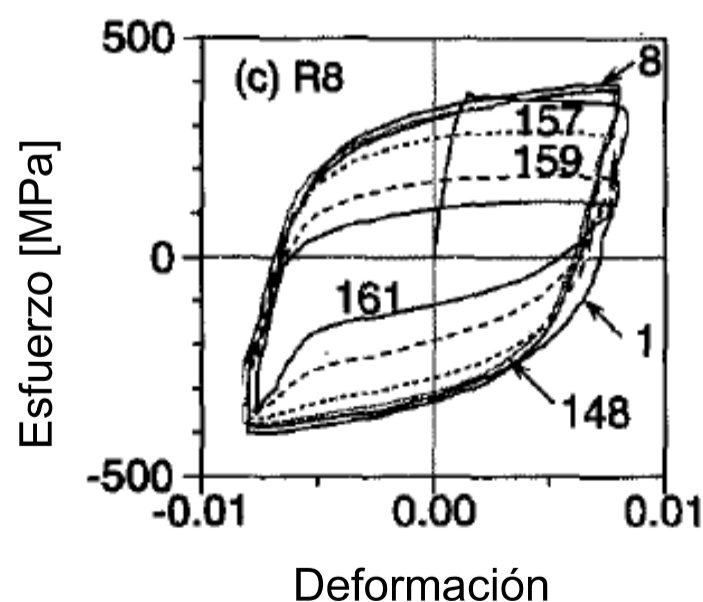
(J.B. Mander, 1994), inicialmente analiza el comportamiento estático del acero A615 grado 40, Figura 2.3. R2 y R13, con una máquina universal de ensayo MTS 809.40 con capacidad de 250 kN, obteniendo varias curvas de esfuerzo versus deformación mediante la aplicación de una carga monotónica.

Posterior a la obtención de las curvas características estáticas, realiza el estudio experimental de fatiga de bajo ciclos con los siguientes parámetros:

- Longitud calibrada (uso de extensómetro 47.63 mm).
- Las pruebas fueron controladas externamente por el extensómetro con una forma de onda sinusoidal.
- Las frecuencias (f) oscilaron entre 0,025 y 0,15 Hz, lo que resultó en una tasa de deformación media (pico a pico) de 0,005 / s para la mayoría de los ensayos. Considerando que definir un criterio apropiado de falla por fatiga por los investigadores anteriores no han sido capaces de llegar a un consenso.
- Control de deformación unitaria como límites, con la convención de signos, tensión como positivo.

Obteniendo diagramas de histéresis, Figura 2.4, determinando variación del comportamiento a fatiga de bajos ciclos en varillas de acero A615 grado 40.

FIGURA 2.4: Diagrama Esfuerzo – Deformación, histéresis.



Fuente: (J.B. Mander, 1994)

Concluyendo que para la realización de este tipo de experimentos se requieren mordazas y técnicas especiales para aplicar tracción y compresión a las probetas. Los resultados no son reproducibles.

Según (Brown Jeff, 2000), quien realizó una serie de estudios, en la Universidad de New York, Buffalo, en su experimento de fatiga de bajos ciclos, utilizó varillas de refuerzo según el estándar ASTM A615 grado 60.

Para simular los efectos sísmicos en el concreto reforzado, el experimento debe tener las siguientes características:

- Carga de tensión y compresión.
- Tamaño típico del espécimen usado para refuerzo longitudinal.
- Aplicación constante y variable del historial de deformación de la probeta.
- Reutilización del mecanismo de transferencia de fuerza.

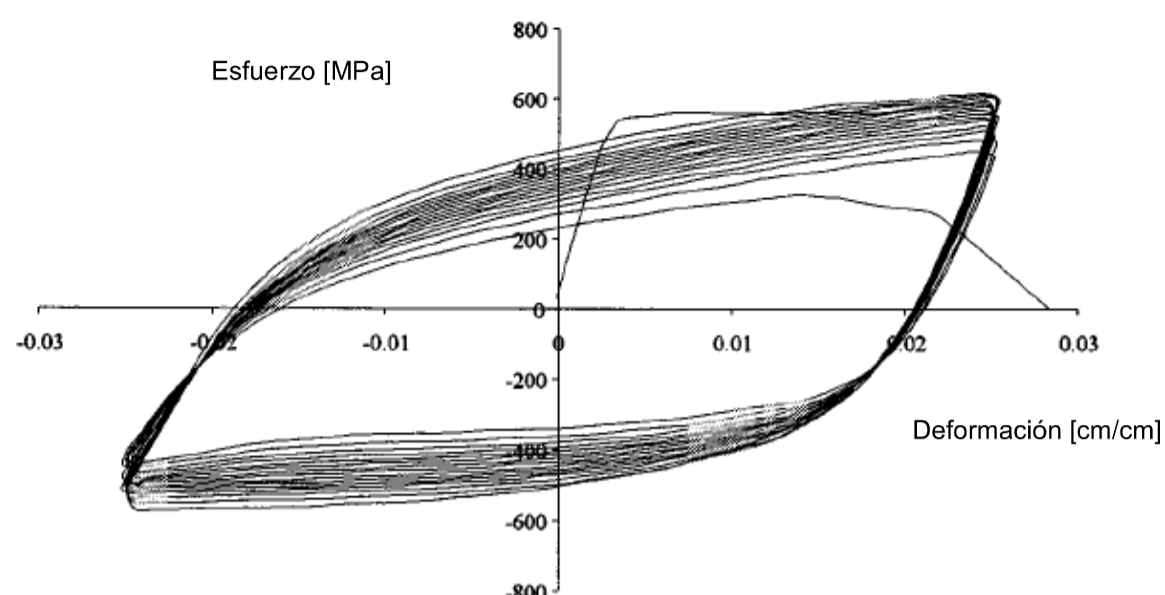
Para obtener las características de las probetas a utilizar, emplearon los reportes entregados por el fabricante, Tabla 2.2.

TABLA 2.2: Reporte técnico del fabricante de acero A615

Tamaño de Barra	Diámetro mm	Área mm²	Fluencia MPa	Esfuerzo Ultimo MPa	% Elongación 203 mm
19 (#6)	19.1	284	420	620	9
22 (#7)	22.2	387	420	620	8
25 (#8)	25.4	510	420	620	8

Fuente: Artículo científico (Brown Jeff, 2000)

Empleando una celda de carga para tracción y compresión con capacidad de 667kN y unas mordazas especiales construidas para este tipo de ensayos, realizan la ejecución del experimento colocando un extensómetro.

FIGURA 2.5: Diagrama Esfuerzo-Deformación, histéresis.

Fuente: (Brown Jeff, 2000)

Este experimento fue llevado a cabo con un control de deformación, con una tasa de 0.001 / segundo, destacando como común la ruptura por fatiga debido al laminado por deformación. Al igual que el autor (J.B. Mander, 1994), obtiene un diagrama de histéresis del comportamiento del acero A615, Figura 2.5.

TABLA 2.3: Resultados de fatiga de bajos ciclos, amplitud constante

Experimento #	Total de la amplitud de formación	Amplitud de deformación plástica	Número de ciclos promedio a la fractura	Número de ciclos promedio a la falla	Total de energía a la falla
21	0.015	0.011	56	87	725.5
22	0.0175	0.0135	31	61	600.1
23	0.02	0.0155	31	49	
24	0.025	0.0198	17	30	478.9
25	0.03	0.023	9	22	385
26	0.0225	0.018	25	44	642.1

Fuente: (Brown Jeff, 2000)

El resultado de su investigación es el número de ciclos en que se agota la probeta y la energía absorbida por la misma, Tabla 2.3, resultados de fatiga de bajos ciclos con amplitud constante.

Concluyendo que el tamaño de la barra tiene un efecto notable en el agotamiento a fatiga. Las barras de refuerzo con diámetros mayores exhibían un mejor comportamiento a fatiga.

Según (Apostolopoulos, 2008) quien llevó a cabo un estudio experimental para evaluar los efectos de la acumulación progresiva de daños por corrosión en el comportamiento de fatiga de bajos ciclos de las varillas de acero de refuerzo S500s. Determina que la fatiga de bajos ciclos puede simular de manera satisfactoria la carga aplicada al acero refuerzo de estructuras de hormigón durante acciones sísmicas. Se ensayaron probetas eliminando los resaltes por medio de limadura, el comportamiento a fatiga estas varillas fue comparado con probetas ordinarias que se utilizan ampliamente como refuerzo del hormigón. Las pruebas de fatiga de bajos ciclos realizadas, indican que la presencia de resaltes reduce considerablemente el rendimiento bajo la acción de cargas cíclicas.

También en estas se observó un aumento significativo del número de ciclos al fallo, así como de la energía disipada, mientras que hubo una reducción de la capacidad de carga debido a disminución de sección. Los resultados indican que el uso de barras de acero lisas se podría considerar para ciertas aplicaciones como áreas de marcos de hormigón armado, especialmente para estructuras ubicadas en áreas sísmicamente activas. El material tiene un diámetro analizado tiene un diámetro nominal 12 milímetros. La longitud libre de la muestra entre las mordazas se fijó en seis veces el diámetro nominal. No se realizó ninguna modificación en la geometría de las varillas de acero para cumplir con los estándares para ensayos de fatiga controlados por deformación.

Concluyendo que la eliminación de los resaltes conduce a un aumento del número de ciclos a fatiga antes del fallo del material.

Según (Hawileth, 2009), quien realiza un trabajo investigación sobre la resistencia a fatiga de bajos ciclos en varillas de acero de refuerzo BS 460B y B500B. Realiza ensayos mecánicos de amplitud constante, controlados por deformación con una frecuencia de aplicación de carga de 0,05 Hz. La máxima amplitud de deformación

axial aplicada oscila entre el 3 y el 10%. Registrando bucles de histéresis y las amplitudes plásticas.

Concluyendo que en base a en la amplitud de la deformación plástica, la varilla de acero B500B tiene una vida más larga, mayor número de ciclos hasta el fallo que las de la BS 460B.

En la tesis doctoral expuesta por (Rocha, 2014), realiza un estudio del comportamiento de varillas de acero de refuerzo sometidas a fatiga de altos ciclos, analizando aspectos macro y micro estructurales de la zona de fractura. Según (Rocha, 2014) , una de las primeras consideraciones a tomar en cuenta, es el sistema de sujeción de las varillas en el equipo de ensayo, ya que de esto depende las fracturas prematuras por agarre.

FIGURA 2.6 Sección transversal de varilla 16mm

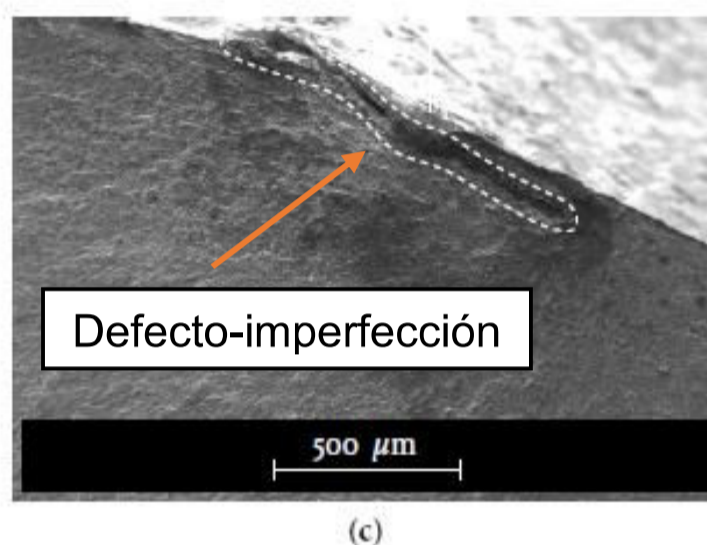


Fuente: (Rocha, 2014)

(Rocha, 2014) emplea varios tipos de varillas, entre estas la de diámetro 16 milímetros, realizando varios ensayos entre los cuales se pueden destacar, análisis metalográfico y químico mediante el uso de un microscopio de barrido, Figura 2.6, con el cual se pudo determinar los componentes químicos con los que está constituida la varilla, además, con el uso del mismo equipo caracterizó la geometría, en especial los resaltes, que son de especial interés en el desarrollo de la investigación.

Otro parámetro de estudio, fue el análisis de inicio y propagación de fractura, en donde identifica defectos del material, Figura 2.6. El experimento se lleva a cabo bajo un método de carga, donde el parámetro de control es amplitud constante, agotando las probetas en alrededor de 30 millones de ciclos.

FIGURA 2.7: Probeta agotada por fatiga de altos ciclos, defecto-imperfección por donde inició la fractura.



Fuente: (Rocha, 2014)

Determinando el valor de concentración de esfuerzo en función de la inclinación del resalte, obteniendo el factor de kt para varillas de diámetro 16mm, donde el resalte a 90° es decir perpendicular a la varilla es el que mayor concentración de esfuerzos produce.

Concluyendo que el parámetro más importante en este tipo de investigaciones es el sistema de sujeción de la probeta. El agotamiento de las probetas está relacionado al proceso de fabricación donde se producen las imperfecciones - defectos que se extienden en la sección transversal, además de fisuras iniciadas por imperfecciones localizadas muy cerca de la base de los resaltes transversales.

Según (Kashani, 2015), en ensayos realizados tanto a tracción como a compresión, el efecto del pandeo inelástico relacionado con el agotamiento por fatiga bajos ciclos en varillas de refuerzo se investiga experimentalmente. El investigador realiza 90 ensayos a fatiga de bajos ciclos en varillas de refuerzo con diferentes amplitudes y longitudes de pandeo. Las probetas incluyen treinta varillas de diámetro 12

milímetros, 16 milímetros y lisas de 12 mm de diámetro. Para cada grupo de muestras se realizan tres ensayos de estáticos a tracción para evaluar las propiedades del material. Se utilizó una máquina universal de ensayo con capacidad de 250 kN, con mordazas hidráulicas.

La máquina utilizó un transductor lineal de desplazamiento variable para medir el desplazamiento de las mordazas. En las pruebas de fatiga de bajos ciclos se utilizó un protocolo de carga con control de desplazamiento con esfuerzo medio cero, utilizando un patrón de carga de onda sinusoidal con amplitud constante. La velocidad de deformación fue de 0,005/ s durante todo el experimento.

Mediante el microscopio electrónico de barrido se estudió las superficies fracturadas. Los resultados muestran que el pandeo inelástico, el diámetro de la barra y la condición de la superficie, son los principales parámetros que afectan a la vida de fatiga de bajos ciclos de las varillas de acero refuerzo.

A través de análisis de regresión no lineal de los datos experimentales se trata de desarrollar un nuevo conjunto de ecuaciones empíricas para la predicción de la vida de fatiga de barras de refuerzo en función de la longitud de pandeo y la resistencia a la deformación.

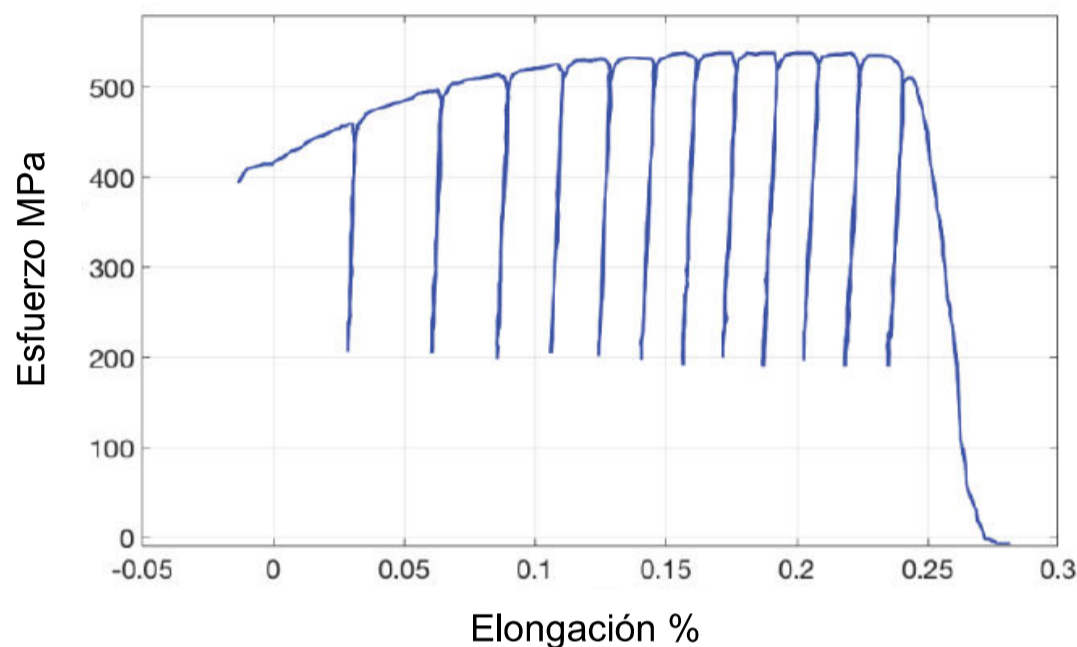
Concluyendo que el pandeo inelástico, en ensayos mecánicos de tracción y compresión, tiene un impacto significativo en el comportamiento cíclico de esfuerzo-deformación de las varillas de refuerzo. A medida que la longitud de pandeo aumentó, la vida a fatiga de ciclos bajos disminuye, reduciendo la capacidad de disipación de energía.

Según (Abatta L., 2016), se puede realizar fatiga de bajos ciclos, aplicando una carga exclusivamente a tracción, deformando plásticamente por cada ciclo de carga aplicado.

Para su investigación utiliza una máquina de ensayo universal MTS 810, en donde es posible programar, tanto la frecuencia como la función de carga, la

experimentación se lleva a cabo bajo un control de fuerza, evitando que la probeta pierda adherencia con el mecanismo de transferencia de fuerza. Determinando un diagrama esfuerzo versus alargamiento porcentual, en donde se evidencia, deformación plástica por cada ciclo de carga aplicado, Figura 2.8.

FIGURA 2.8 Diagrama esfuerzo versus alargamiento porcentual – histéresis



Fuente: (Abatta L., 2016)

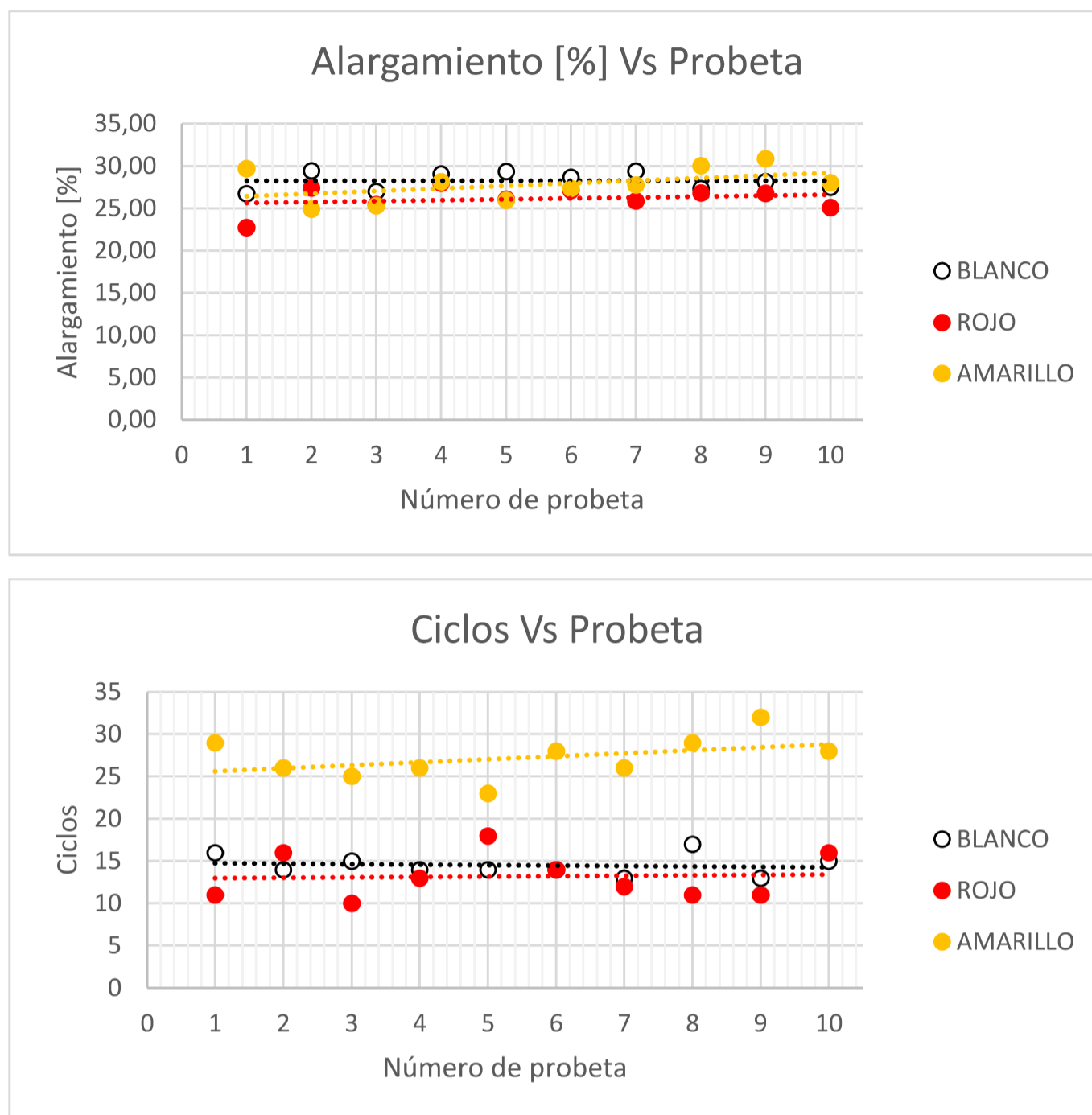
Para su investigación, emplea tres tipos de marcas de acero A706 diámetro 12 milímetros, que cumplen con los estándares de fabricación establecidos por la normativa local INEN.

La frecuencia de carga es de 1hz, la función de carga es sinusoidal, con lo que puede garantizar la reproducibilidad de su experimentación.

Caracterizando el acero de las diferentes marcas bajo las mismas condiciones, determinando que existe un alargamiento similar de las probetas en análisis Figura 2.9 (a), con un diferente número de ciclos de agotamiento de las mismas Figura 2.9 (b).

Concluyendo que el inicio y propagación de fractura de las probetas agotadas cíclicamente es por la base de los resaltes de las mismas.

FIGURA 2.9: Alargamiento y numero de ciclos por probeta.



Fuente: (Abatta L., 2016)

La revisión del estado del arte en la base de datos SCOPUS muestra información importante que aporta al desarrollo de esta investigación, destacando que:

- Los primeros experimentos de fatiga de bajos ciclos en varillas de acero de refuerzo no tienen reproducibilidad de resultados, debido a la variación en la aplicación de carga y al mecanismo de transferencia de fuerza.
- La experimentación de fatiga de bajo ciclos ha sido realizada en diferentes frecuencias de aplicación de carga, variando desde 0.025 hasta 1 Hz.
- La función de carga empleada en el estado del arte es sinusoidal.
- El tamaño de la varilla tiene un efecto notable en el agotamiento a fatiga.
- Las varillas de acero de refuerzo con diámetros mayores tienen un mejor comportamiento a fatiga.

- Varillas de acero de refuerzo sin resaltes agotan su capacidad a fatiga en un mayor número de ciclos.
- Existe un diferente comportamiento a fatiga de bajos ciclos entre diferentes marcas de varillas analizadas como es el caso de la varilla de acero B500B que tiene una vida a fatiga más larga, es decir, mayor número de ciclos hasta el fallo que las BS 460B.
- El agotamiento de las probetas está relacionado al proceso de fabricación donde se producen las imperfecciones - defectos que se extienden en la sección transversal.
- Existen fisuras iniciadas por imperfecciones localizadas muy cerca de la base de los resaltes transversales.
- Actualmente para realizar ensayos mecánicos a tracción y compresión se emplean mordazas hidráulicas.
- El pandeo inelástico, en ensayos mecánicos de tracción y compresión, tiene un impacto significativo en el comportamiento cíclico de esfuerzo-deformación de las varillas de refuerzo. A medida que la longitud de pandeo aumenta, la vida a fatiga de ciclos bajos disminuye, reduciendo la capacidad de disipación de energía.
- Se realizaron ensayos estáticos previos a los cíclicos con el propósito de establecer las propiedades mecánicas iniciales del material.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE EXPERIMENTO

En base al estado del arte se ha establecido los lineamientos para la caracterización de las varillas de acero corrugado de producción ecuatoriana bajo la acción de cargas cíclicas, como se detalla a continuación:

- El acero de refuerzo debe cumplir las normas INEN 2167 y ASTM A706.
- Se analizarán las tres marcas en diferentes diámetros del acero de producción nacional, determinando diferencias a partir de los resultados de los ensayos realizados.
- Se determinará un mecanismo adecuado para la transferencia de fuerza.
- Para el ensayo cíclico, se establecerá una función y frecuencia de carga con el fin de tener resultados reproducibles.
- Los ensayos mecánicos cíclicos pueden ser de tracción-tracción o tracción compresión.
- Todas las probetas tendrán la misma longitud, para comparar los resultados de los ensayos mecánicos destructivos.
- Se analizará el material base con que el que se fabrican las varillas de acero de refuerzo.
- Se buscará imperfecciones - defectos del material.
- Se realizaran ensayos mecánicos destructivos estáticos y cíclicos.
- Se prepararán las muestras según los estándares vigentes INEN y ASTM.

3.1 DISPONIBILIDAD TECNOLÓGICA

Para esta investigación se empleará una máquina universal de ensayo MTS 810 con capacidad de 50 toneladas (celda de carga) en modalidad de ensayo estático, con control programable, es decir se puede variar tanto la frecuencia como la función de carga, mordazas para realizar ensayos a tracción-tracción con una

capacidad estática máxima de 25 toneladas, las cuales son el limitante para estudiar varios diámetros de varillas.

En función del componente limitante de aplicación de carga de la máquina universal de ensayo, se calcula la capacidad para ejecutar ensayos cíclicos.

Según el fabricante de la máquina universal de ensayo MTS la capacidad para aplicar de cargas cíclicas es su capacidad estática dividida entre 1.3, ecuación 3.1

$$Capacidad\ dinámica = \frac{Capacidad\ estática}{1.3} \quad (3.1)$$

$$Capacidad\ dinámica = \frac{25000}{1.3} = 19230.8kg$$

Conocido el límite de fluencia mínimo, máximo y la relación de estos, con la resistencia última a tracción, establecido en por el INEN. (INEN-2167, 2011), Tabla 3.1, se puede determinar el diámetro máximo de la varilla de acero de refuerzo a ser ensayada bajo la acción de cargas cíclicas.

TABLA 3.1: Especificaciones mecánicas para varillas INEN 2167

Límite de fluencia, mínimo, daN/mm ² (kgf/mm ²)	41.2	(42)
Límite de fluencia, máximo, daN/mm ² (kgf/mm ²)	53.9	(55)
Resistencia a la tracción, mínima, daN/mm ² (kgf/mm ²)	54.9	(56)
Alargamiento (%) mínimo con probeta Lo=220 mm		
Diámetro nominal (mm)	%	
8 - 20	14	
22 - 36	12	
40	10	
NOTA: La resistencia a la tracción debe ser igual o mayor a 1.25 veces el punto de fluencia		

Fuente: Norma ecuatoriana (INEN-2167, 2011)

Según la Norma ecuatoriana (INEN-2167, 2011), la relación entre el límite de fluencia y la resistencia última debe ser de por lo menos de 1.25:

$$\frac{f_u}{f_y} = 1.25 \quad (3.2)$$

donde:

f_u límite de resistencia última

f_y límite de resistencia a la fluencia

En base a límite máximo a la fluencia, que según la norma ecuatoriana (INEN-2167, 2011) es de 5500 kg/cm² (55 kg/mm²) se puede establecer el diámetro máximo a ser analizado, con la expresión matemática 3.3.

$$d = \sqrt[2]{\frac{4 * Capacidad\ dinámica}{\pi * 1.25 * f_y}} \quad (3.3)$$

$$d = \sqrt[2]{\frac{4 * 19230.8}{\pi * 1.25 * 5500}}$$

$$d = 1.88\ cm$$

donde:

d es el diámetro máximo en centímetros

El diámetro mínimo de la probeta (varilla), depende de la geometría de los elementos de sujeción, en base a experimentación, se ha determinado que con las mordazas existentes, se puede garantizar una buena adherencia a partir del diámetro 14 milímetros.

3.2 SELECCIÓN DE PROBETAS

Las probetas deben cumplir con las normas (INEN-2167, 2011) y (ASTM-A706, 2016). En función de la disponibilidad tecnológica se determinó que las probetas que pueden ser analizadas son a partir del diámetro 14 milímetros hasta 18 milímetros.

Al ser el objetivo “Estudiar y analizar el comportamiento de varillas de acero corrugado de producción nacional, bajo un ensayo de cargas cíclicas tracción – tracción”, se determinará la muestra de las tres grandes productoras de acero ecuatorianas.

3.2.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Según la norma ecuatoriana (INEN-2167, 2011) en el apartado 5.1, establece que el tamaño de muestra está en función del lote de muestreo que lo define de la siguiente manera “La producción de acero de refuerzo es dividida en lotes de muestreo de 20 toneladas. Lotes o partidas inferiores a 20 toneladas deben considerarse como nuevos lotes de muestreo” además establece en el literal (a) “De cada lote de muestreo se extraerá al azar una varilla”.

Considerando que la producción de acero se realiza un diámetro a la vez, es decir, el tren de laminación produce varillas de un solo diámetro, bajo pedido o demanda de los consumidores, no es posible encontrar varillas realizadas con la misma palanquilla.

3.2.1.1 Determinación estadística del tamaño de muestra

En función de la investigación realizada por (Abatta L., 2016), quien toma una varilla azar de 12 milímetros (10.656kg) en representación de 20 toneladas (1877 varillas) de producción según lo establecido por la Norma INEN 2167, se puede establecer el tamaño de la nueva muestra conociendo la proporción muestral (1 varilla al azar) bajo la acción de cargas cíclicas en lotes de 20 toneladas de acero con la expresión matemática 3.4 según (Triola, 2004).

$$n = \frac{[Z_{\alpha/2}]^2 * p * q}{E^2} \quad (3.4)$$

donde

n tamaño de muestra

$Z_{\alpha/2}$ valor crítico en función del nivel de confianza

\hat{p} proporción muestral de éxitos en una muestra

\hat{q} proporción muestral de fracasos en una muestra

E margen de error

Considerando un nivel de confianza del 90% donde $Z_{\alpha/2}$ es 1.645 y con un margen de error del 4%, se calcula el tamaño de la muestra que será analizado bajo la acción de cargas cíclicas por cada lote de 20 toneladas.

$$n = \frac{[1.645]^2 * 10.656/20000 * (1 - \frac{10.656}{20000})}{0.04^2}$$

$$n = 0.9 \approx 1$$

Por lo que se tomará una varilla al azar de 14, 16 y 18 milímetros de diámetro por cada productora de acero (tres). Estas serán adquiridas de manera aleatoria en la provincia de Pichincha Ecuador, resultando un total de 9 varillas de 12 metros de longitud, que representan a 20 toneladas de producción por cada varilla, es decir, se analizará 180 toneladas de producción.

3.3 LONGITUD DE PROBETAS

En normas internacionales como la (ASTM-A370, 2016), se describe en el anexo A9 de misma, que los requisitos de prueba para las barras de acero de refuerzo se han integrado en las especificaciones de los productos de referencia, siendo este el punto de partida para definir las dimensiones de la probeta.

Según la norma (INEN-2167, 2011), en el apartado 4.1.4.1 en el literal b, establece que “El punto de fluencia y resistencia a la tracción debe determinarse por cualesquiera de los métodos convencionales establecidos en la NTE INEN 109”.

La norma (INEN-0109, 2009) especifica el método para el ensayo de tracción de materiales metálicos y define las propiedades mecánicas que se pueden determinar a temperatura ambiente.

La longitud de la probeta se describe en el anexo C de la misma, literal C2.2 donde establece que “La longitud libre entre las mordazas de la máquina debe ser la adecuada para que las marcas de calibración estén a una distancia razonable desde estas mordazas”.

3.3.1 CÁLCULO DE LONGITUD CALIBRADA INICIAL

En el apartado de C.2.3.1 de la norma (INEN-0109, 2009), establece como regla general, que las probetas proporcionales se utilizan cuando la longitud calibrada (L_0) se relaciona con el área inicial de la sección transversal (S_0) por medio de la ecuación:

$$L_0 = k * \sqrt[2]{S_0} \quad (3.5)$$

donde:

L_0 longitud calibrada

k factor 5.65 para varillas de acero de refuerzo

S_0 área de la sección de la probeta

El cálculo de la longitud calibrada inicial para las probetas que se utilizarán en esta investigación se detalla en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2: Longitud calibrada inicial de probetas

k	Diámetro [mm]	Área transversal [mm ²]	Longitud calibrada inicial [mm]
5,65	14	153,93	70
	16	201,06	80
	18	254,46	90

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

3.3.2 CÁLCULO DE LA LONGITUD TOTAL DE LA PROBETA

En base a la longitud calibrada inicial y considerando el apartado C2.2 de la norma (INEN-0109, 2009) estable que “Longitud de la probeta sin maquinar. La longitud libre entre las mordazas de la máquina debe ser la adecuada para que las marcas de calibración estén a una distancia razonable desde estas mordazas”, la longitud libre entre mordazas será de tres longitudes calibradas iniciales, con el propósito de calcular la elongación.

La longitud calibrada inicial para la varilla de 18 milímetros de diámetro es de 90 milímetros de longitud, con lo que se puede calcular la longitud total de la probeta.

$$L = 2 * L_s + 3 * L_o \quad (3.6)$$

donde

L longitud total de la probeta

L_s longitud de sujeción en la máquina universal de ensayo

L_o longitud inicial de calibración

$$L = 2 * 65 + 3 * 90 = 400mm$$

La longitud total de las probetas por lo tanto será de 400 mm, para los diferentes diámetros que se involucran en esta investigación, 14, 16 y 18 milímetros, con el propósito de realizar una comparación de resultados. La longitud calibrada inicial será marcada en las probetas como se muestra en la Figura 3.1.

3.4 TIPOS DE PROBETAS

Para realizar el estudio y análisis del comportamiento de varillas de acero de refuerzo A706 bajo la acción de cargas cíclicas, se consideran los lineamientos establecidos por el estado del arte, destacando los siguientes:

- El acero de refuerzo debe cumplir las normas INEN 2167 y ASTM A706.

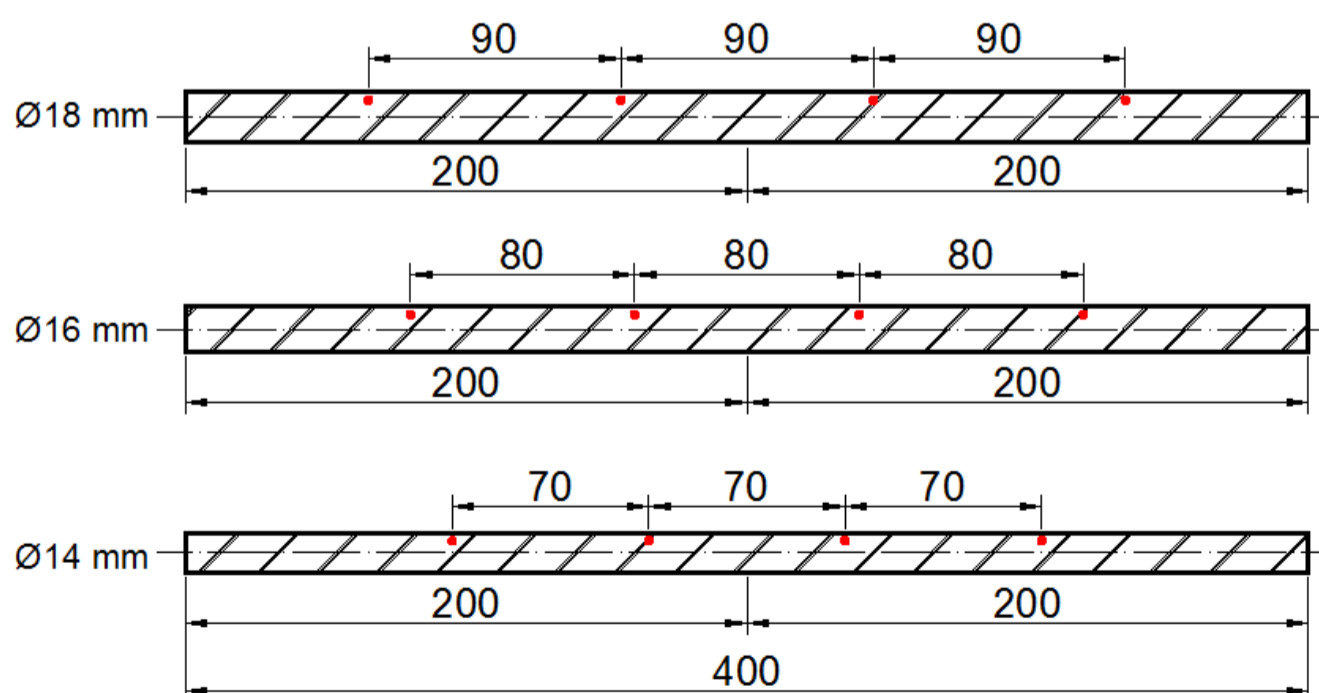
- Todas las probetas tendrán la misma longitud, con el propósito de comparar los resultados de los ensayos mecánicos destructivos.
- Se analizará el material base con que el que se fabrican las varillas de acero de refuerzo.
- Se prepararán las muestras según los estándares vigentes INEN y ASTM.

En función del estado del arte y considerando que las tres productoras de acero, garantizan la soldabilidad de sus productos se establecen los siguientes tipos de probetas:

- Probetas de calibración (calibración del equipo)
- Probetas oficiales (resultados oficiales del experimento)
 - Estándar
 - Soldadas
 - Recocidas

Considerando que en el apartado 3.3 de este capítulo se definió la longitud que debe tener cada probeta, los cortes serán realizados con un disco de abrasión de 1.6 milímetros de espesor, con el fin de no inducir una ZAC (Zona Afectada por Calor), que pueda alterar las propiedades mecánicas de las mismas.

FIGURA 3.1: Corte y marcado de probetas, longitud calibrada inicial



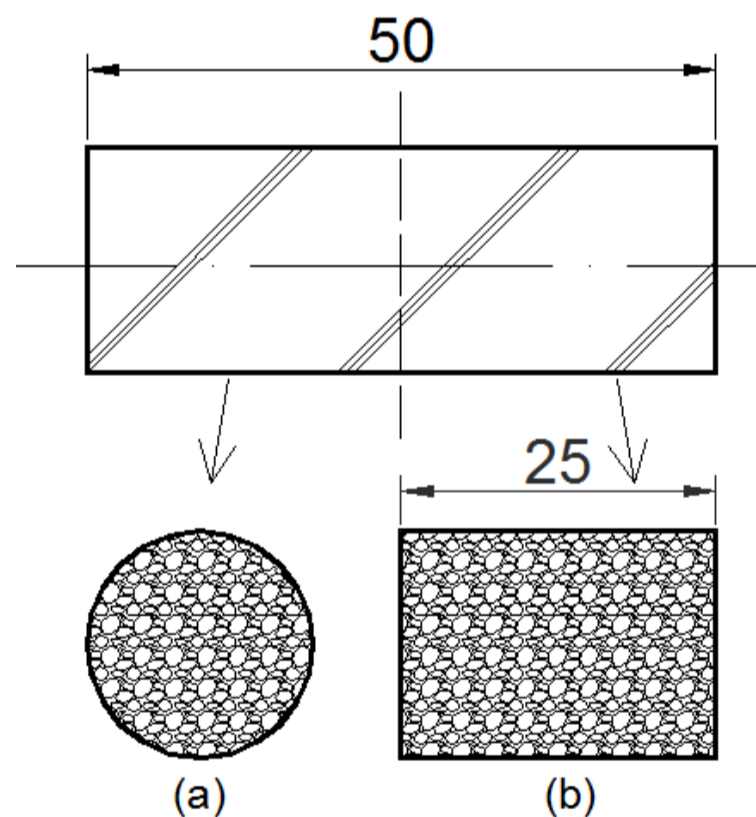
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Posterior al proceso de corte todas las probetas deben marcarse con la longitud calibrada inicial, según lo establecido en la norma (INEN-0109, 2009), para lo cual se empleará un granete para realizar una pequeña marca fina que no pueda producir o inducir fracturas prematuras, Figura 3.1, puntos rojos.

3.4.1 PROBETAS ESTÁNDAR

Las probetas estándar que no tienen ningún proceso mecánico adicional a los ya considerados en el apartado anterior (corte y marcado). Con el fin de determinar la posible variación del comportamiento mecánico de las varillas de acero de refuerzo bajo la acción de cargas cíclicas, se realizarán probetas adicionales de 50 milímetros de longitud, Figura 3.3, para realizar estudios cualitativos de la estructura que conforma el material mediante el uso de un SEM.

FIGURA 3.2: Probetas para análisis químico y metalográfico, (a) sección transversal, (b) sección longitudinal.



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

3.4.2 PROBETAS RECOCIDAS

Al igual que las estándar, estas no tienen ningún trabajo mecánico adicional al corte y marcado. Según los lineamientos establecidos por el estado del arte, se pretende obtener probetas del material base (sin afectaciones por el proceso de fabricación)

a partir de un proceso de recocido donde se eliminan los factores determinantes en la capacidad mecánica de las varillas, como son:

- Factores térmicos, tratamientos térmicos.
- Factores mecánicos, trabajo en frío, laminado severo.

El proceso de recocido está en función de la composición química establecida en la norma (INEN-2167, 2011) que se detalla en la Tabla 3.3.

TABLA 3.3: Composición química

Elemento	Análisis de cuchara Máximo	Análisis de comprobación Máximo	ENSAYO
Carbono	0,30%	0,33%	NTE INEN 120
Manganeso	1,50%	1,56%	NTE INEN 118
Fósforo	0,035%	0,043%	NTE INEN 107
Azufre	0,045%	0,053%	NTE INEN 108
Silicio	0,055%	0,55%	NTE INEN 119

Fuente: Norma (INEN-2167, 2011)

En base a la composición química, donde el porcentaje de carbono máximo es de 0.3% y siendo este acero hipoeutectoide, se establece que, para el tratamiento térmico de recocido con afectación a sus propiedades mecánicas, se debe austenizar las probetas entre 30 y 80 °C sobre la temperatura de transformación, (Totten, 2006).

Siendo la temperatura de transformación de este acero de 820°C, Figura 3.4, más un adicional para austenizar de 80°C, el tratamiento térmico de recocido debe llevarse a una temperatura de 900°C.

Para estimar el tiempo de recocido de las probetas, se emplea la ecuación experimental descrita por (Totten, 2006), donde establece:

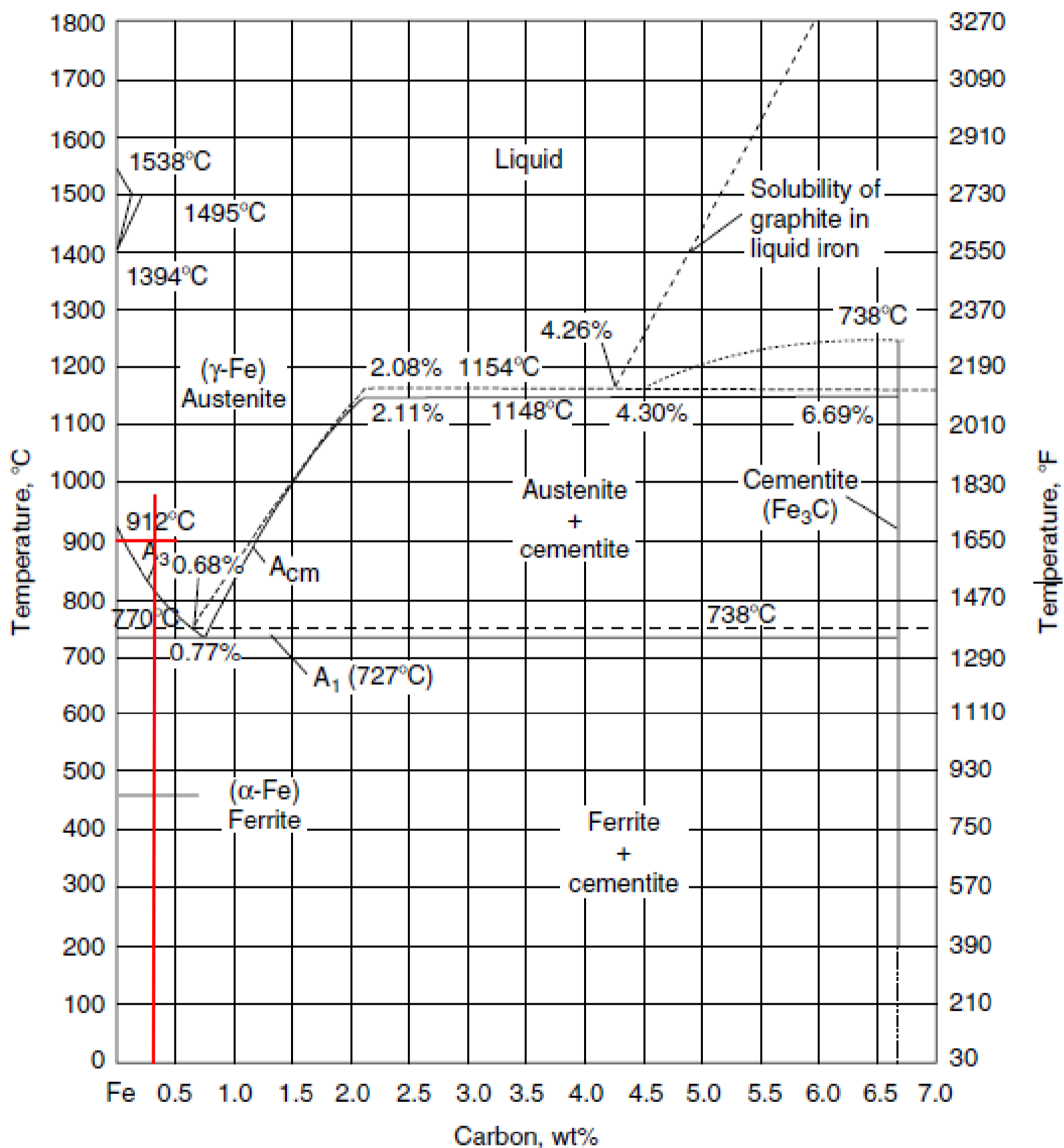
$$t = 60 + D \quad (3.7)$$

donde:

t tiempo en minutos

D diámetro en milímetros

FIGURA 3.3: Diagrama Hierro-Carbono



Fuente: Libro de tratamiento térmicos, (Totten, 2006)

El tiempo de recocido para las probetas se describe en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4: Temperatura y tiempo de recocido de probetas

Diámetro [mm]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
14	900	74
16	900	76
18	900	78

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

3.4.3 PROBETAS SOLDADAS

Para realizar una adecuada caracterización del acero de refuerzo, es importante analizar el comportamiento bajo la acción de cargas estáticas como cíclicas de probetas que incluyan soldadura, comparando resultados de resistencia mecánica de las probetas tipos tipo estándar (sin soldadura).

En la norma (INEN-2167, 2011), establece en el numeral 4.1.6.1, la soldabilidad de las varillas de acero de refuerzo, donde menciona que “Esta norma, mediante las restricciones en la composición química y la fórmula de carbono equivalente, suministra un control de la composición química para aplicaciones en soldadura (ver nota 1)”.

La nota 1, establece que “La norma AWS D1.4 proporciona prácticas recomendables de soldadura, incluyendo las temperaturas de precalentamiento y de entrapados basadas en el carbono equivalente (C.E).”

Para calcular el porcentaje de carbono equivalente, se parte de la fórmula propuesta por la norma (INEN-2167, 2011), ecuación 3.8:

$$\% \text{ C.E.} = \% \text{ C} + \% \frac{\text{Mn}}{6} + \% \frac{\text{Cu}}{40} + \% \frac{\text{Ni}}{20} + \% \frac{\text{Cr}}{10} - \% \frac{\text{Mo}}{50} - \% \frac{\text{V}}{10} \quad (3.8)$$

donde:

- % C. E. porcentaje de carbono equivalente.
- %Mn porcentaje de Manganeso
- %Cu porcentaje de Cobre
- %Ni porcentaje de Níquel
- %Cr porcentaje de Cromo
- %Mo porcentaje de Molibdeno
- %V porcentaje de Vanadio

A partir de la expresión 3.8 se puede calcular el % de carbono equivalente:

$$\% \text{ C. E.} = \% 0.3 + \% \frac{1.5}{6} + \% \frac{0}{40} + \% \frac{0}{20} + \% \frac{0}{10} - \% \frac{0}{50} - \% \frac{0}{10} = 0.55\%$$

El porcentaje de carbono equivalente calculado es de 0.55, que a su vez es el límite máximo establecido por la norma (ASTM-A706, 2016) en el apartado 6.4. Los requisitos de soldadura, establecidos por el (AWS-D1.4, 2005), determinan, que el tipo de soldadura para juntas directas se realizará a tope con penetración completa, Tabla 3.6. El proceso de soldadura se llevará a cabo con un soldador certificado en proceso SMAW, colocando la probeta en posición horizontal sobre un soporte para soldadura.

TABLA 3.5: Requisitos de soldadura para juntas directas

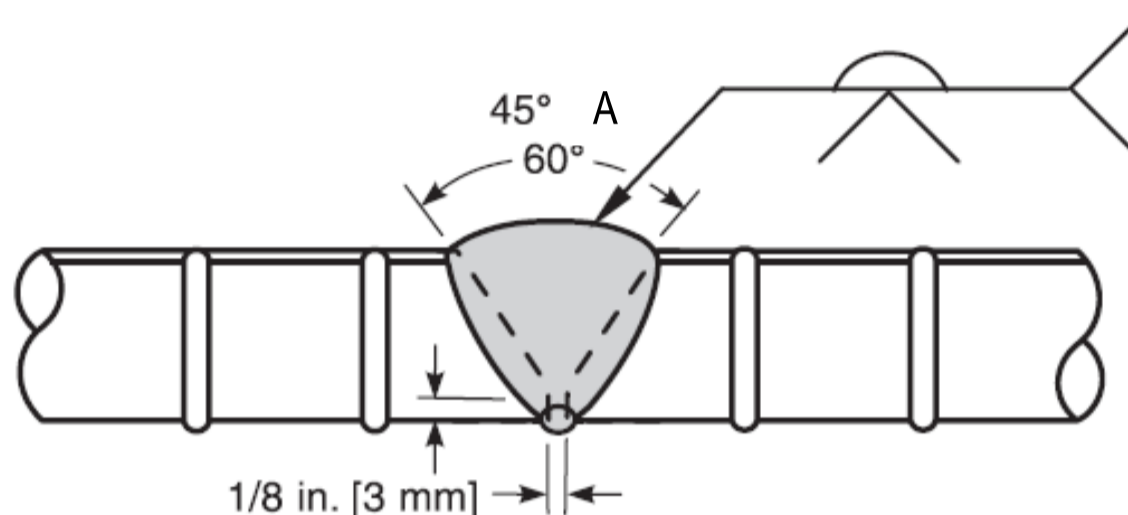
Orientación del eje de la barra	Tipos opcionales de soldadura de ranura CJP	Figura opcional 3.4 Detalle
Horizontal	Simple-V	A
	Doble-V	B
	Simple-V con Revestimiento de tubería dividida	C*
Vertical	Simple-Bisel	A
	Doble-Bisel	B
	Simple-Bisel con Revestimiento de tubería dividida	C*

Las barras deberán tener el mismo diámetro

Fuente: (AWS-D1.4, 2005)

Detalle del tipo de ranura en V simple para el proceso de soldadura en varillas de acero de refuerzo, Figura 3.4.

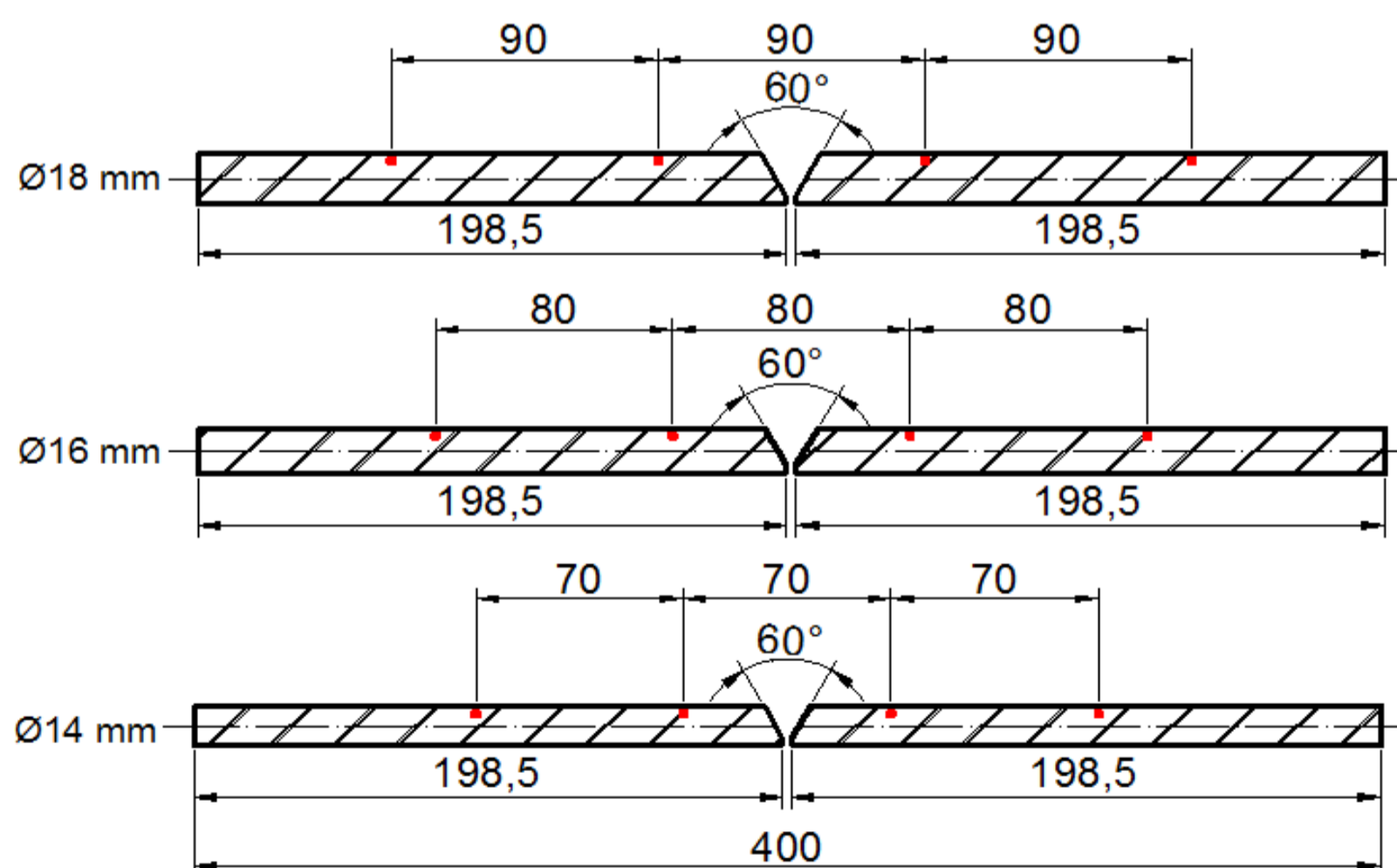
FIGURA 3.4: Tipo A - Ranura en V simple



Fuente: (AWS-D1.4, 2005)

Con los detalles geométricos establecidos por el (AWS-D1.4, 2005), se puede definir la geometría final de las probetas a ser soldadas bajo el proceso SMAW, con sus respectivo marcado post-soldadura, Figura 3.5.

FIGURA 3.5: Geometría de probetas soldadas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

En función de la disponibilidad local y siendo el método más empleado en soldadura el SMAW en la construcción, el (AWS-D1.4, 2005) establece en la Tabla 3.7, que puede emplear electrodos de bajo carbono a partir del 8018, considerando que por facilidad de soldadura en varillas de diámetros pequeños se prefiere electrodos de 3/32 de pulgada de diámetro.

TABLA 3.6: Requisitos del material de aporte

Requisitos del material de aporte										
Requisitos de especificación de acero						Requisitos del material de aporte				
GRUPO	Requisitos de especificación		Resistencia mínima a la fluencia		Mínima resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia		Resistencia a la tracción	
			ksi	Mpa	ksi	Mpa	ksi	Mpa	ksi	Mpa
I	ASTM A615	Grade 40	40	-	70	-	Especificaciones de Electrodo			
	ASTM A615 M	Grade 300	-	300	-	500	SWAM AWS A5.1 y A5.5			
							53-72	365-496	70	482
							57-60	390-415	70-75	480-520
							GMAW AWS A5.18			
							ER70S-X, E70C-3, E70C-6			
II	ASTM A706	Grade 60	60	-	80	-	SMAW AWS A5.5			
	ASTM A706 M	Grade 420	-	420	-	550	67	460	80	550
							E7015-X, E7016-X			
							E8018-X			
							GMAW AWS A5.28			
							ER80S-X, E80C-X, E90C-X			
						FCAW AWS A5.29				
						68	470	80-100	550-690	

Fuente: (AWS-D1.4, 2005)

Posterior a la selección del material de aporte (electrodo), se establece la temperatura mínima de precalentamiento y entre pases, que para aceros de refuerzo con 0.55% de carbono equivalente y para diámetros de hasta 19 mm, no es necesario precalentar o aplicar calor adicional a la soldadura entre pases, Tabla 3.7. Entre pases siempre habrá un proceso de limpieza con grata de disco.

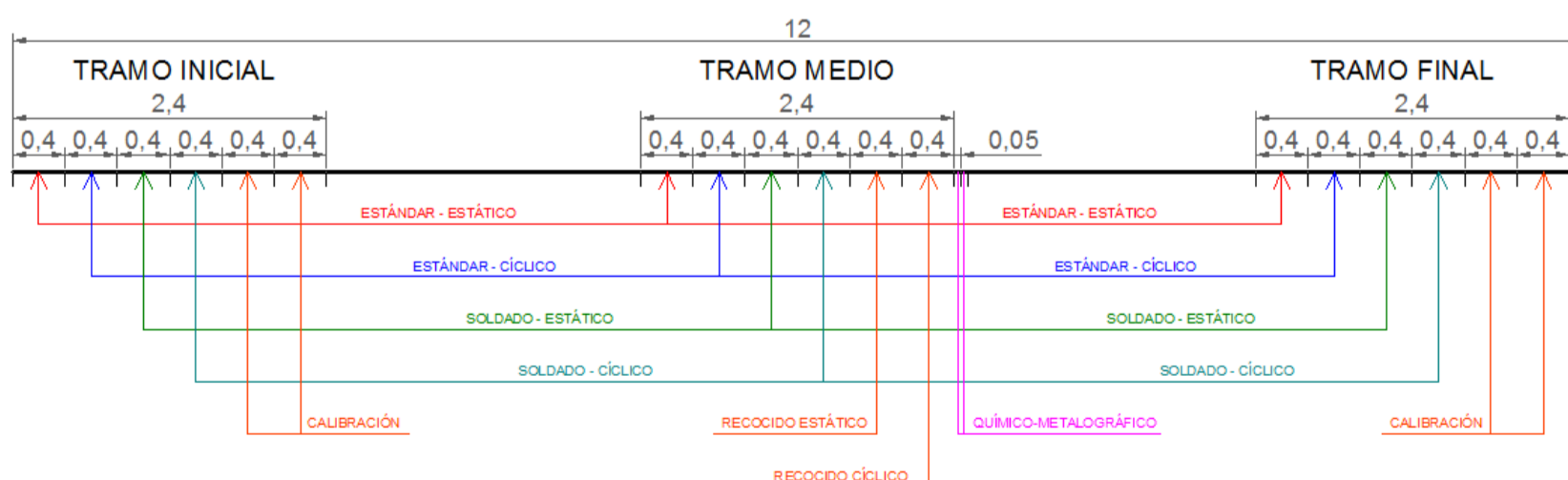
TABLA 3.7: Temperatura mínima de precalentamiento y entre pases

Equivalente de carbono (C.E.)	Tamaño de la barra de refuerzo	SMAW con Electrodos de Bajo Hidrógeno, GMAW, o FCAW Temperatura Mínima	
		°F	°C
Hasta 0.40	Hasta 11 [36] completo 14 y 18 [43 y 57]	ninguno 50	ninguno 10
Mayor 0.40 a 0.45	Hasta 11 [36] completo 14 y 18 [43 y 57]	ninguno 50	ninguno 10
Mayor 0.45 a 0.55	Hasta 6 [19] completo 7 o 11 [22 o 36] 14 o 18 [43 o 57]	ninguno 50 200	ninguno 10 90

Fuente: (AWS-D1.4, 2005)

3.5 NÚMERO DE PROBETAS

En función de los lineamientos establecidos por el estado del arte se realizarán ensayos mecánicos estáticos y cíclicos de los tipos de probetas detalladas anteriormente en las 9 varillas comerciales de 12 metros de longitud, dividiendo a estas, en tres tramos: inicial, medio y final, con el propósito de verificar el resultado y a su vez analizar la variación del comportamiento a lo largo de la varilla, Figura 3.6.

FIGURA 3.6: Distribución de probetas en varilla de 12 metros

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La distribución de probetas por tramos se muestra en la tabla 3.9, notando que en los tramos inicial y final, no se han considerado probetas recocidas y estándar de 50 milímetro, debido al alto costo que esto involucra el tratamiento térmico y el análisis en el SEM.

TABLA 3.8: Distribución de probetas por tramos

Marcas	Diámetro [mm]	Tramo inicial		Tramo medio		Tramo final	
		Tipo de probeta	Tipo de ensayo	Tipo de probeta	Tipo de ensayo	Tipo de probeta	Tipo de ensayo
Adelca Andec Novacero	14,16,18	Estándar	Estático	Estándar	Estático	Estándar	Estático
		Estándar	Cíclico	Estándar	Cíclico	Estándar	Cíclico
				Estándar 50mm	Químico metalográfico		
		Soldada	Estático	Soldada	Estático	Soldada	Estático
		Soldada	Cíclico	Soldada	Cíclico	Soldada	Cíclico
				Recocida	Estático		
				Recocida	Cíclico		
				Recocida 50mm	Químico metalográfico		

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La cantidad de probetas se muestra en la Tabla 3.10, con un total de 126 probetas para ensayos destructivos y de 36 probetas para análisis cualitativo en un SEM.

TABLA 3.9: Cantidad de probetas por tramo y totales.

Cantidad de probetas a ser analizadas en la máquina universal de ensayo

(a)	Tramo inicial	Tramo medio	Tramo final
Probetas (A)	4	6	4
Marcas (B)	3	3	3
Diámetros (C)	3	3	3
Total (A*B*C)	36	54	36

Total	126
--------------	------------

Cantidad de probetas a ser analizadas en el SEM

(b)	Tramo medio
Probetas (A)	4
Marcas (B)	3
Diámetros (C)	3
Total (A*B*C)	36

Total	36
--------------	-----------

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

3.6 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

Los lineamientos establecidos por el estado del arte determinan que:

- El acero de refuerzo debe cumplir las normas INEN 2167 y ASTM A706, esto incluye que los ensayos estáticos deben ser realizados bajo la norma (INEN-0109, 2009).
- Se debe tener un mecanismo óptimo de transferencia de fuerza.
- Para ensayos mecánicos cíclicos, se establecerá una función y frecuencia de carga con el fin de tener resultados reproducibles.

En el estado del arte, varios investigadores, han tratado de establecer un método para evaluar el comportamiento de las varilla de acero de refuerzo, llegando a ser estudios muy particulares.

3.6.1 ENSAYO ESTÁTICO

Según la norma ecuatoriana (INEN-0109, 2009), en el apartado 7.1 proporciona lineamientos de velocidad para ejecutar el ensayo estático, donde menciona lo siguiente “A menos que se especifique lo contrario, en la norma del producto, la velocidad de la máquina debe ajustarse a los siguientes requerimientos que dependen de la naturaleza del material”.

En el apartado 7.1.1.1 de la norma (INEN-0109, 2009), establece que “Dentro del campo elástico y hasta el límite de fluencia superior, la relación de separación de los cabezales de la máquina debe mantenerse constante hasta donde sea posible, dentro de los límites correspondientes a la relación de esfuerzos indicados en la tabla 3.10.” El módulo de elasticidad del acero de refuerzo A706, es de alrededor de 203860 MPa, siendo la velocidad adecuada para la separación de cabezales entre 6 y 60 MPa/s, según la Tabla 3.11.

TABLA 3.10: Relación de aplicación de esfuerzos

Módulo de elasticidad del material (E) MPa	Relación de aplicación de esfuerzos MPa/s	
	mín	máx
< 150000	2	20
≥ 150000	6	60

Fuente: (INEN-0109, 2009)

En el apartado 7.1.2.1 de la norma (INEN-0109, 2009) establece “En el rango plástico.- La relación de aplicación de esfuerzos en la longitud paralela no debe exceder de 0,008/s.”, siendo la resistencia última del acero de refuerzo A706 teórica de 687.5 MPa, la aplicación del esfuerzo no debería exceder en el rango plástico una velocidad de 5.5 MPa/s. El tiempo que debe durar el ensayo estático en promedio está en función de la velocidad de aplicación de esfuerzos, Tabla 3.11, tomando como referencia la resistencia última teórica del acero de refuerzo A706.

TABLA 3.11: Aplicación de esfuerzo y tiempo de duración de un ensayo estático

	Velocidad de aplicación [MPa/s]	Tiempo [s]
Rango lineal	6	114,58
Rango no Lineal	5,5	125,00
	Tiempo promedio	119,79

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

3.6.2 ENSAYO CÍCLICO – DINÁMICO

En el estado del arte se identificó varios dos métodos estandarizados para la caracterización de acero de refuerzo.

- El primero, establecido por la norma (ASTM-E606, 2012), donde se sugiere que las probetas deben tener propiedades homogéneas además de una geometría específica (probetas maquinadas) para la ejecución del ensayo, no aplicable a varillas de acero de refuerzo ecuatorianas, debido que al maquinas se pierden los resaltes y el termotratado.
- El segundo, establecido por la norma española (UNE-36065EX, 2000), donde sugiere un que se podría hacer fatiga tracción- tracción, con una separación entre mordazas de por lo menos 10 diámetros pero su aplicación de carga es exclusiva del rango lineal, agotando la capacidad de las probetas en alrededor de 2×10^6 ciclos.

En función de los lineamientos del estado del arte, donde se establece que se puede hacer fatiga de bajos ciclos aplicando cargas cíclicas en tracción-tracción (Abatta L., 2016), suponiendo agotamiento por flexión de vigas de hormigón simplemente armadas, que se ajusta a la disponibilidad tecnológica.

La función de carga para esta investigación es de tipo sinusoidal como emplean los investigadores (J.B. Mander, 1994), (Kashani, 2015) y (Abatta L., 2016), debido a la uniformidad de aplicación de carga sobre la probeta, en comparación con la función escalón u otras.

La frecuencia de aplicación de carga será estimada según el método 1 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS, 2015), que establece lo siguiente:

- Para estructuras de edificación, el valor de T puede determinarse de manera aproximada mediante la expresión 3.9:

$$T = C_t * h_n^\alpha \quad (3.9)$$

donde:

C_t coeficiente que depende del tipo de edificio Tabla 3.12.

h_n^α altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura en metros

T periodo de vibración

TABLA 3.12: Coeficientes según tipo de edificación

Pórticos especiales de hormigón armado	C_t	α
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería.	0.055	0.75

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Considerando que una edificación de 10 pisos, con altura entre piso de 2.5m conformada con elementos estructurales esbeltos, sin muros estructurales o diagonales rigidizadoras, donde se emplea varillas entre 14 y 18 milímetros de diámetro para el armado de las vigas, se establece el periodo de vibración del edificio, con la expresión matemática 3.9.

$$T = 0.055 * 25^{0.9}$$

$$T = 0.9965 \approx 1 \text{ s}$$

A partir del periodo se puede establecer la frecuencia de aplicación de carga para esta investigación con la expresión matemática 3.10.

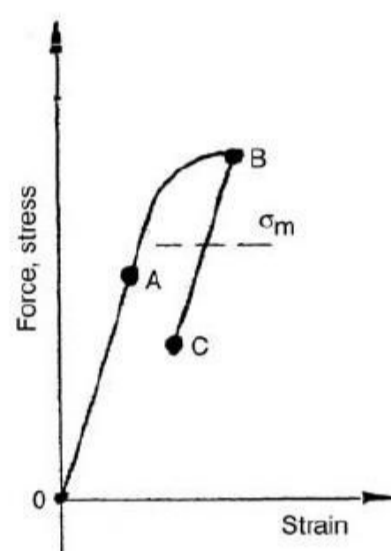
$$P = \frac{1}{f} \quad (3.10)$$

Donde la frecuencia de aplicación de carga será igual a:

$$f = \frac{1}{P} = 1 \text{ Hz}$$

Ajustándose a la frecuencia de aplicación de carga máxima disponible tecnológicamente. Determinando que para esta investigación se debe agotar las probetas bajo la acción de cargas cíclicas en el rango de tracción – tracción, donde el esfuerzo medio, deberá permitir el agotamiento en el rango plástico, Figura 3.7.

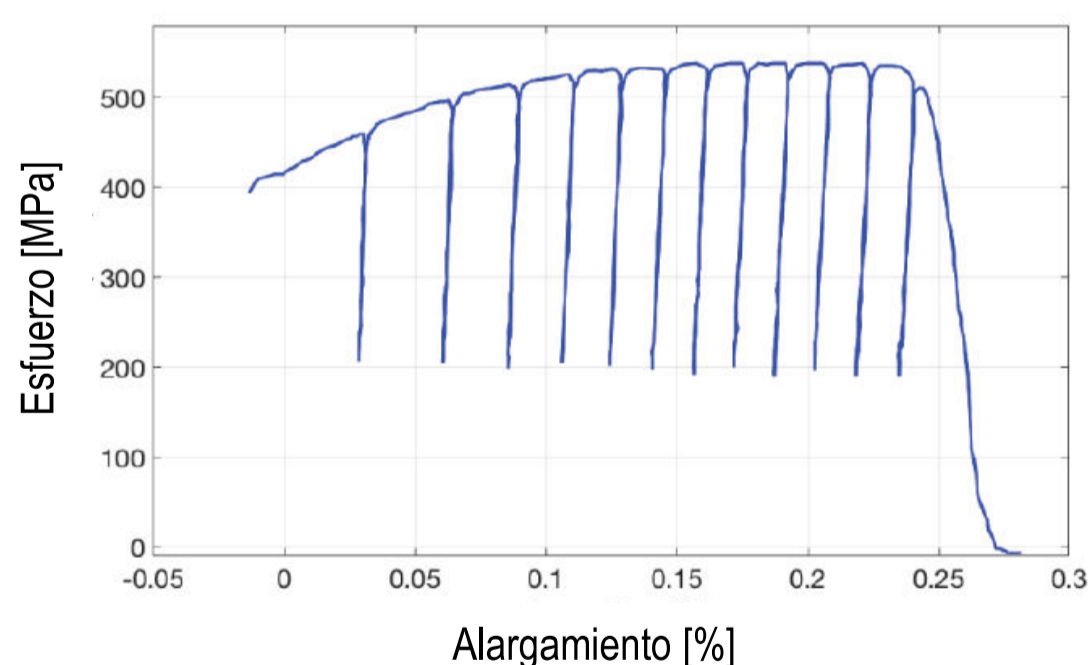
FIGURA 3.7: Esfuerzo medio para agotamiento plástico



Fuente: (Manson S.S., 2006)

Obteniendo un diagramas de histéresis similares a los de (Abatta L., 2016), con un diferente estado tensional y agotamiento de la capacidad de las probetas.

FIGURA 3.8: Diagrama Esfuerzo Vs Alargamiento porcentual, fatiga de bajos ciclos.



Fuente: (Abatta L., 2016)

3.7 MEDICIÓN DE VARIABLES POST – ENSAYO

3.7.1 ALARGAMIENTO

El alargamiento de la probeta se medirá después del ensayo destructivo, ya sea estático o cíclico, con un pie de rey digital con apreciación de 0.01 milímetro.

TABLA 3.13: Propiedades mecánicas - alargamiento

Límite de fluencia, mínimo, daN/mm ² (kgf/mm ²)	41.2	(42)
Límite de fluencia, máximo, daN/mm ² (kgf/mm ²)	53.9	(55)
Resistencia a la tracción, mínima, daN/mm ² (kgf/mm ²)	54.9	(56)
Alargamiento (%) mínimo con probeta Lo=220 mm		
Diámetro nominal (mm)	%	
8 - 20	14	
22 - 36	12	
40	10	
NOTA: La resistencia a la tracción debe ser igual o mayor a 1.25 veces el punto de fluencia		

Fuente: (INEN-2167, 2011)

Verificando el cumplimiento de parámetros que establece la norma (INEN-2167, 2011) en el apartado 3.3, Tabla 3.12, y a su vez realizar un análisis comparativo con las diferentes marcas de las productoras de acero de refuerzo ecuatorianas.

3.7.2 ENERGÍA (RESILIENCIA Y TENACIDAD)

Según (Askeland, 2006), la tenacidad es una medida cualitativa de la energía para causar la ruptura de un material, es decir, es el área bajo la curva esfuerzo real-deformación unitaria real (tenacidad a la tensión).

Un parámetro importante que permite comparar un acero con otro que idealmente tiene las mismas propiedades mecánicas es la resiliencia y tenacidad. Se calculará el área bajo la curva tanto del diagrama estático como cíclico.

3.7.3 CICLOS DE AGOTAMIENTO

La cantidad de ciclos en que una probeta se agota, determina, que fabricante tendría un mejor desempeño en un evento sísmico (cargas dinámicas). Para determinar el número de ciclos en el que se agota una probeta, se empleará el contador que dispone la máquina universal de ensayo.

Siendo este el parámetro de interés en esta investigación, con el cual se puede realizar un análisis comparativo entre fabricantes, determinando la razón de la variación de ciclos.

3.7.4 INICIO Y PROPAGACIÓN DE FRACTURA

Según lo establecido en el estado del arte, en la tesis doctoral de (Rocha, 2014), las imperfecciones - defectos en la sección del acero de refuerzo producen el inicio y propagación de fractura, que está estrechamente relacionado con en el agotamiento de las probetas. Se analizará el inicio y propagación de fractura posterior a los ensayos mecánicos destructivos bajo la acción de cargas estáticas y cíclicas, este análisis se lo realizará mediante un registro visual y fotográfico.

3.7.5 ANÁLISIS QUÍMICO METALOGRAFICO CUALITATIVO

Se realizará un análisis cualitativo de las muestras establecidas anteriormente (50 milímetros), tanto de la sección transversal, como longitudinal, analizando la estructura del material y composición de las diferentes productoras de acero, mediante el uso de un microscopio de barrido SEM.

3.8 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Una vez ejecutada la parte experimental, se presentaran los resultados del comportamiento mecánico estático y cíclico del acero de refuerzo, considerando el cambio de nombres a las marcas de producción nacional a amarillo, rojo y blanco, aleatoriamente por razones éticas, siendo el propósito, mejorar la calidad del acero de producción nacional.

CAPÍTULO 4

EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento se ejecutó bajo las condiciones establecidas en el diseño de experimento.

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

El equipo utilizado en esta investigación es una máquina universal de ensayo MTS 810 proveniente de Estados Unidos de América, Figura 4.1, perteneciente al Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

FIGURA 4.1: Máquina universal de ensayo MTS 810.




Características principales:

- Capacidad máxima de celda de carga: 50 toneladas
- Capacidad máxima de mordazas para aplicación de carga a tracción: 25 toneladas.

Las especificaciones técnicas de los fabricantes Novacero Figura 4.2, Adelca Figura 4.3 y Andec Figura 4.4, se encuentran disponibles en sus páginas web, indicando que cumplen las normas INEN 2167 y ASTM A706.

FIGURA 4.3: Especificaciones técnicas de Adelca



VARILLAS DE CONSTRUCCIÓN


VARILLA RECTA

SISMORESISTENTE PARA HORMIGÓN ARMADO

DESCRIPCIÓN
Es una varilla de acero de sección circular, con resaltes transversales que asegura una alta adherencia con el concreto; laminadas en caliente y termotratadas que garantizan mayor flexibilidad y seguridad que el acero común. Puede ser soldable en caso de que la estructura así la requiera, cumpliendo la norma AWS D1.4, según lo especificado en la NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN.

USOS
Principalmente como refuerzo en estructuras de hormigón armado.

NORMAS TÉCNICAS
NTE INEN 2167 (Ecuatoriana)
Varilla con resaltes de acero de baja aleación, soldables, laminadas en caliente y/o termotratadas para hormigón armado. Esta norma está especificada en la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN para el acero de refuerzo corrugado.
ASTM A706 (Americana).



Fuente: http://www.adelca.com/sitio/esp/productos.php?producto_id=471

FIGURA 4.4: Especificaciones técnicas de Andec

DEFINICIÓN

Las varillas soldables son barras de acero de baja aleación, que han recibido un tratamiento térmico controlado durante su proceso de laminación, poseen alta ductilidad y excelentes propiedades mecánicas.

USOS


Se usan en estructuras de hormigón armado para construcciones de diseño SISMORESISTENTE y donde se requiera empalmes por soldadura.

NORMALIZACIÓN
Las VARILLAS SOLDABLES se fabrican de acuerdo a las siguientes normas: NTE-INEN-2167 y ASTM A-706. La fluencia y resistencia están dadas en megapascales (MPa).

IDENTIFICACIÓN

Las varillas ANDEC llevan una identificación exclusiva, en toda la longitud de la misma, a una distancia de aproximadamente un metro y consiste en un sobrelieve con los siguientes símbolos:

Nombre de la empresa Diámetro de la varilla AS (acero soldable)



GARANTÍAS

Teniendo establecido un sistema de aseguramiento de calidad que permite la inspección en los principales puntos del proceso, aseguramos un nivel de calidad constante y satisfactorio para el cliente. Emitimos, a pedido del usuario, el correspondiente certificado de calidad.

Fuente: http://www.adelca.com/sitio/pdf/catalogo_adelca_ed20.pdf

Si bien las diferentes productoras de acero cumplen con las normas INEN 2167 y ASTM A706, garantizando adherencia al hormigón, estas tienen diferencias geométricas en la inclinación de los resaltes, además de diferentes exigencias mecánicas establecidas por el propio fabricante, superando las normas antes mencionadas, Tabla 4.1.

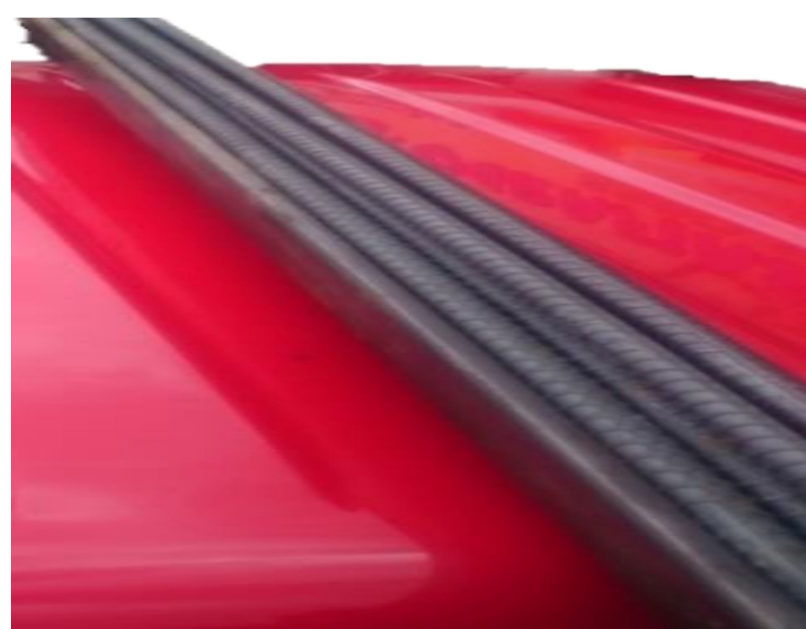
TABLA 4.1: Propiedades mecánicas del acero ecuatoriano

Marca	Límite de fluencia mínimo [kg/cm ²]	Límite de fluencia máximo [kg/cm ²]	Resistencia mecánica última (mínima) [kg/cm ²]	Inclinación de resalte	Tipo
Adelca	4200	5500	5600	75°	Termotratada
Andec	4200	5400	5500	90°	Termotratada
Novacero	4200	5400	5500	60°	Microaleada

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Se realiza la adquisición aleatoria de las varillas, una por cada marca y diámetro, estas fueron transportadas sin doblar, sobre un soporte rígido, con el propósito de no introducir deformaciones permanentes que pueden afectar la investigación, Figura 4.5.

FIGURA 4.5: Transporte de varillas

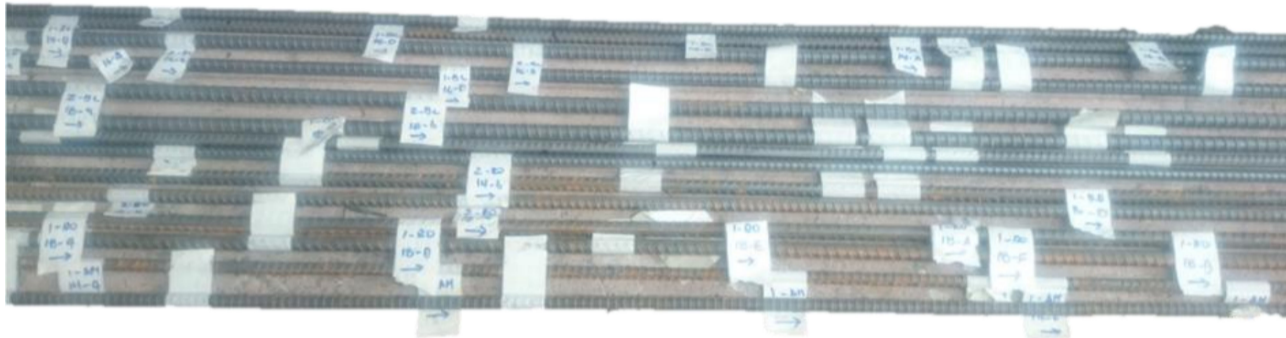


Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

4.3 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Posterior a la adquisición de las varillas, estas fueron etiquetadas, Figura 4.6, de tal manera de conservar el orden Figura 3.6

FIGURA 4.6: Etiquetado de varillas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

4.3.1 CORTE

Plenamente identificadas las probetas, estas son cortadas con un disco abrasivo de 1.6 mm de espesor, sin afectar su estructura por el calor generado, Figura 4.7.

FIGURA 4.7: Corte de varillas – disco abrasivo



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Las probetas son agrupadas por tramos, Figura 4.8, con el propósito de continuar con la preparación de probetas destinadas a procesos de soldadura y recocido.

FIGURA 4.8: Agrupación de probetas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

4.3.2 SOLDADURA

Posterior al corte y clasificación, las probetas designadas para ser soldadas, son biseladas y colocadas en el soporte para soldadura, Figura 4.9.

FIGURA 4.9: Probetas en soporte para soldadura



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

El proceso de soldadura fue llevado a cabo con soldadores calificados en proceso SMAW, quienes son los que calibran el equipo de soldadura utilizando electrodo E9018 (bajo hidrógeno) de 3/32 de pulgada de diámetro en varias probetas de

prueba, Figura 4.10, hasta que el soldador identifique que no existen imperfecciones en la soldadura.

FIGURA 4.10: Calibración del proceso de soldadura



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 4.11: Limpieza de soldadura entre pases



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

El proceso de soldadura es desarrollado en múltiples pases, por lo que, entre pases se realiza un proceso de limpieza con grata, Figura 4.11. Para finalizar el proceso se busca la raíz, Figura 4.12, para posteriormente realizar el último pase de soldadura.

Posterior al proceso de calibración del equipo, se sueldan las probetas oficiales, que serán destruidas en la máquina universal de ensayo.

FIGURA 4.12: Búsqueda de raíz en probetas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

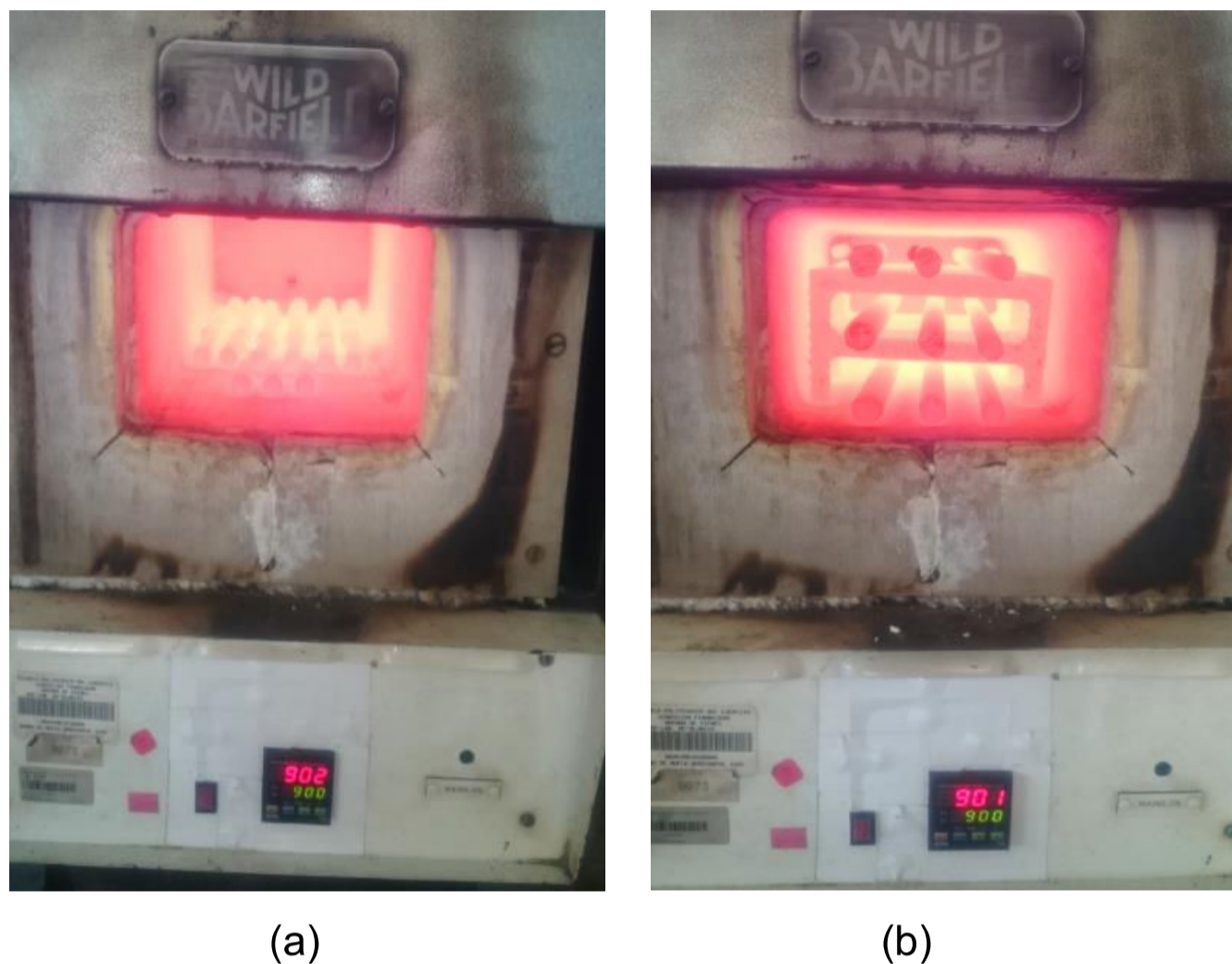
Finalizado el proceso de soldadura se realizan dos inspecciones visuales, la primera, posterior al a soldadura, la segunda, 48 horas después, para descartar fisuras por acción del hidrógeno.

4.3.3 RECOCIDO

El tratamiento térmico de recocido se realizó en un horno tipo mufla, en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a la temperatura a 900°C por un tiempo de 1h18minutos.

Se recocieron las probetas tanto para análisis químico metalográfico, Figura 4.13 (a), así como también para ensayos destructivos en la máquina universal de ensayo, Figura 4.13 (b).

FIGURA 4.13: Recocido de probetas para análisis químico- metalográfico (a), análisis destructivo (b).



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

4.3.4 QUÍMICO METALGRÁFICO CUALITATIVO

Las probetas de 50mm de longitud son cortadas transversal y longitudinalmente, para posterior realizar un pulido mecánico, Figura 4.14, mediante un ataque químico.

FIGURA 4.14: Pulido mecánico de probetas – lijado



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

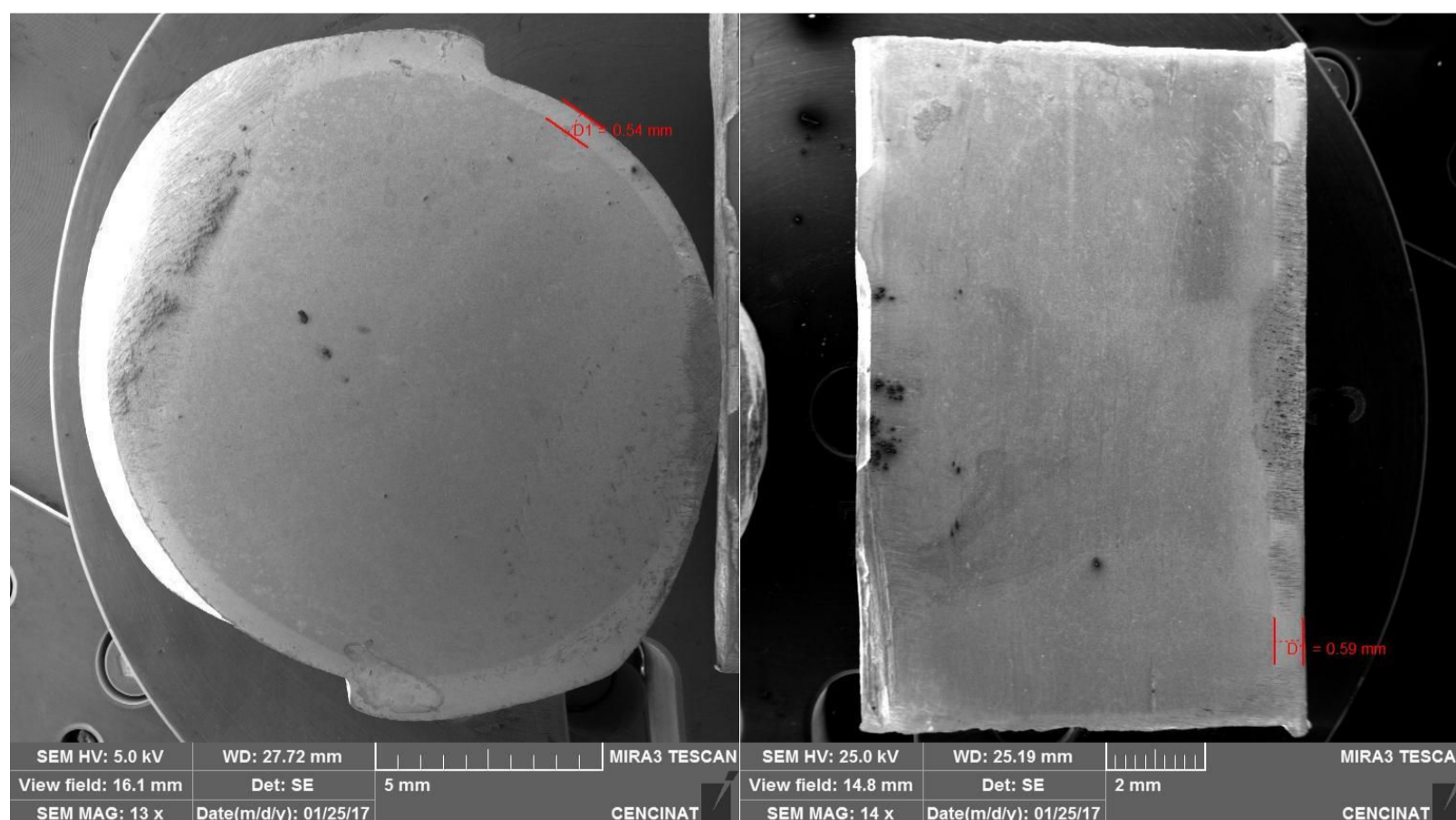
Las probetas con corte transversal Figura 4.15 (a), como las de corte longitudinal, Figura 4.15 (b), ya revelada la estructura, son analizadas en un SEM, donde se mide el anillo de temple de las varillas temotradas, Figura 4.16, y se verifica la estructura que conforma el acero, Figura 4.17.

FIGURA 4.15: Probeta corte transversal, químico metalográfico



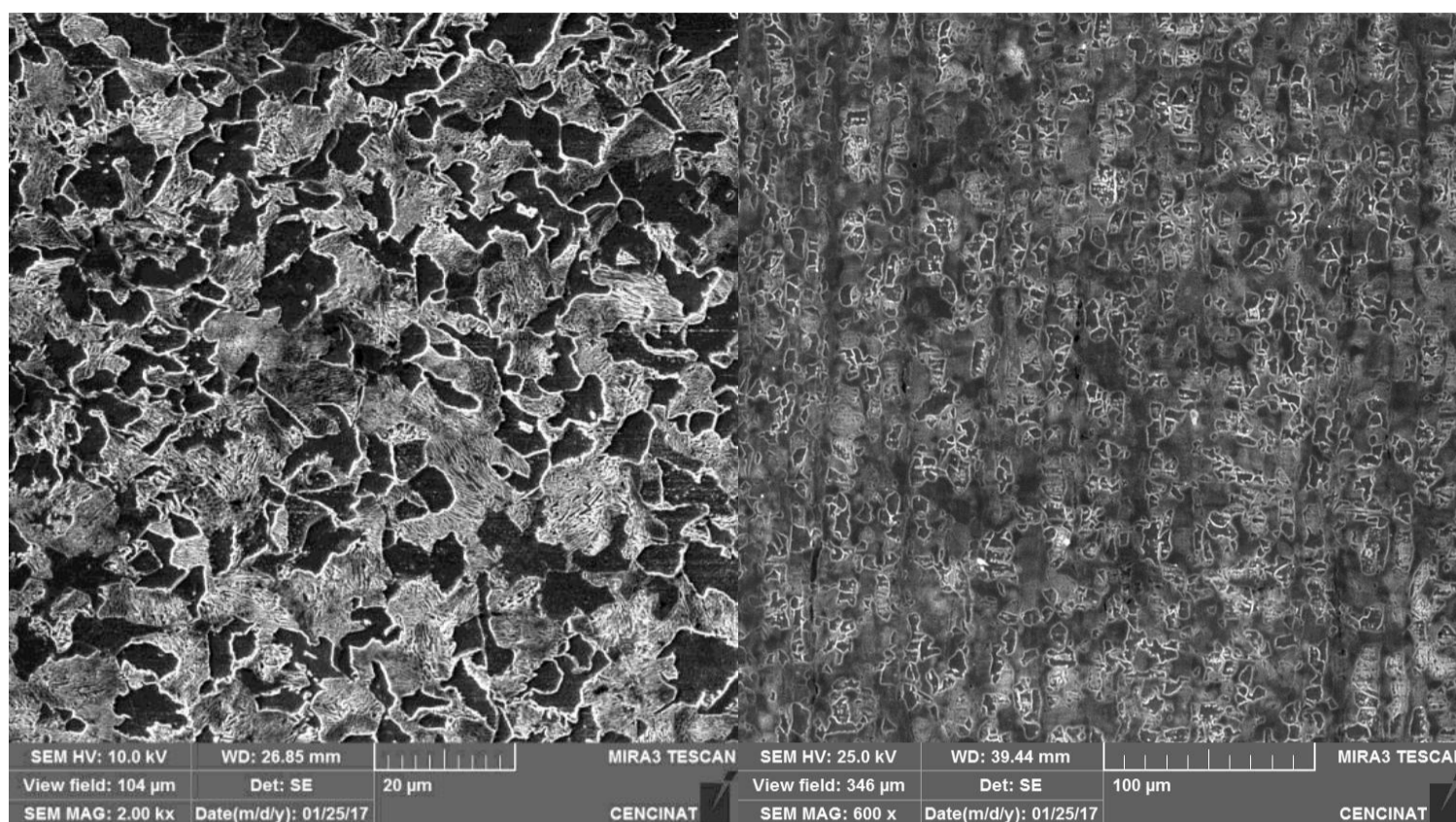
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 4.16: Medición de anillos de temple



Fuente: Laboratorio CENCINAT

FIGURA 4.17: Bordes de grano, sección transversal (der.) y longitudinal (izq.)

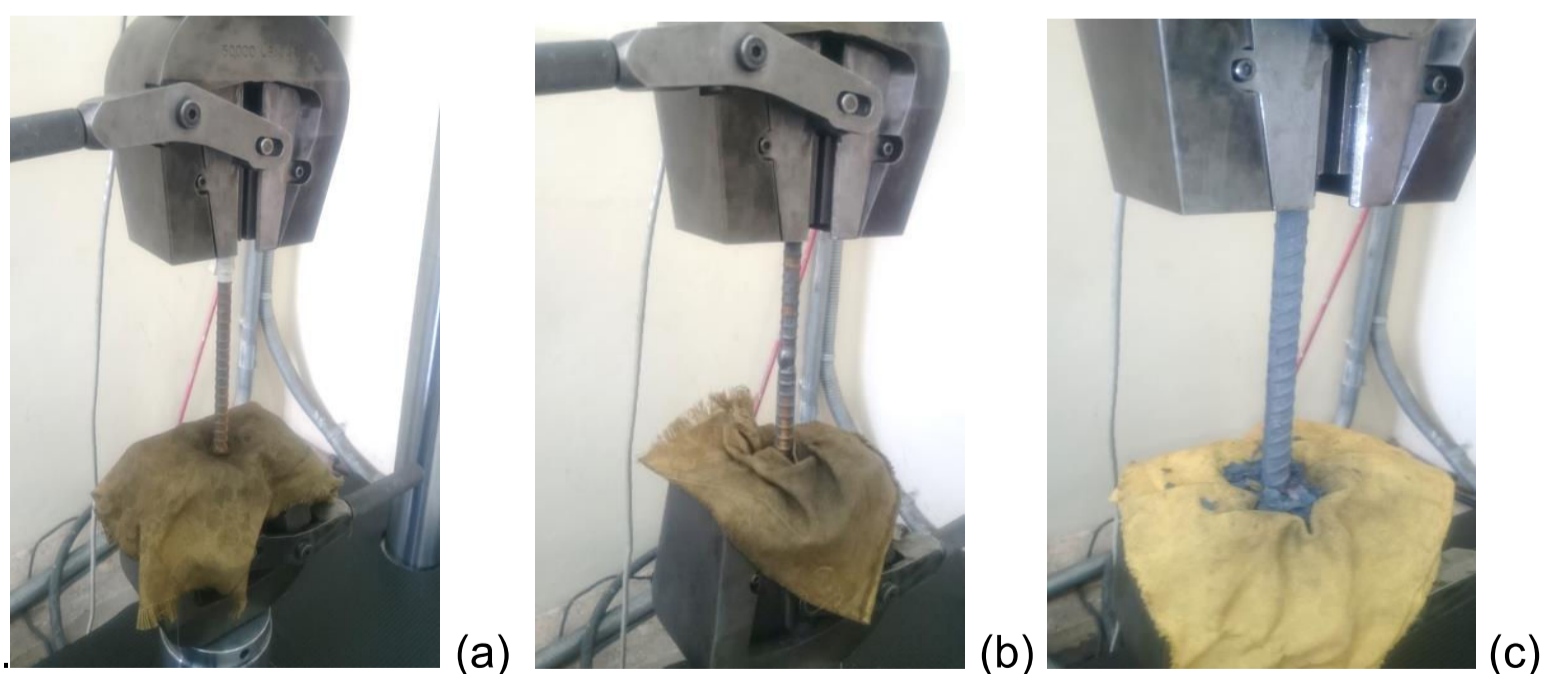


Fuente: Laboratorio CENCINAT

4.4 ENSAYOS MECÁNICOS

Previo a la ejecución de los ensayos oficiales tanto estáticos como cíclicos, se calibró la máquina universal de ensayo con 9 ensayos estáticos y 18 cíclicos con el propósito de tener dominio de las variables mecánicas que influyen en el ensayo. Posterior se realizaron los ensayos destructivos oficiales en las probetas estándar, soldadas, recocidas, Figura 4.18.

FIGURA 4.18: Probetas estándar (a), soldadas (b) y recocidas (c)



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

4.4.1 ENSAYO ESTÁTICO

El ensayo estático se realizó según lo establecido por la norma ecuatoriana (INEN-0109, 2009), con un tiempo de aplicación de carga de alrededor de 120 segundos, fácilmente programable en la máquina de ensayo universal. El total de probetas oficiales destruidas mediante ensayo estático son 63, Tabla 4.2.

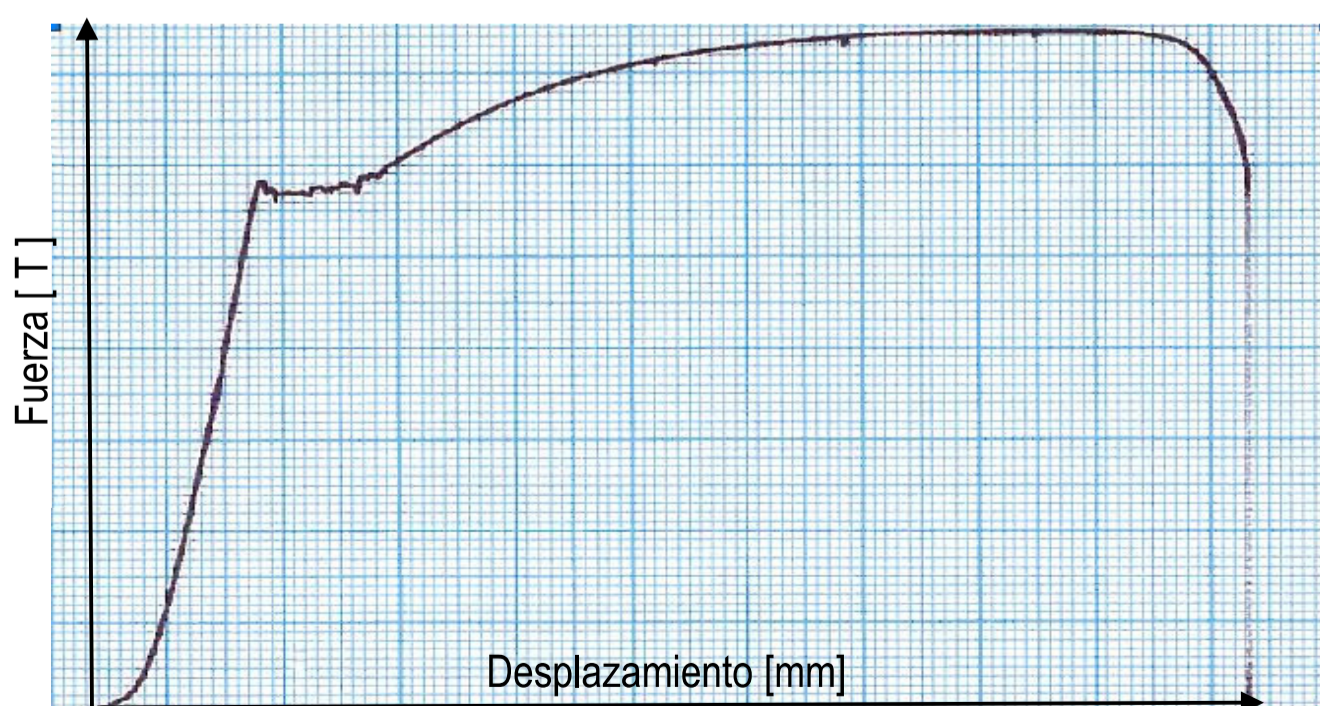
TABLA 4.2: Total de probetas oficiales para ensayo estático

Tipo de probeta	Cantidad
Estándar	27
Soldadas	27
Recocidas	9
Total	63

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Los resultados obtenidos por la aplicación de una carga monotónica se muestran en la Figura 4.19, donde el eje de las ordenadas expresa la fuerza aplicada sobre la probeta mientras que el eje de las abscisas es el desplazamiento del pistón, estos fueron tratados digitalmente con el propósito de analizar los resultados en hojas electrónicas y poder modificar escalas.

FIGURA 4.19: Fuerza aplicada Vs Desplazamiento del pistón, ensayo estático MTS.



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

4.4.2 ENSAYO CÍCLICO

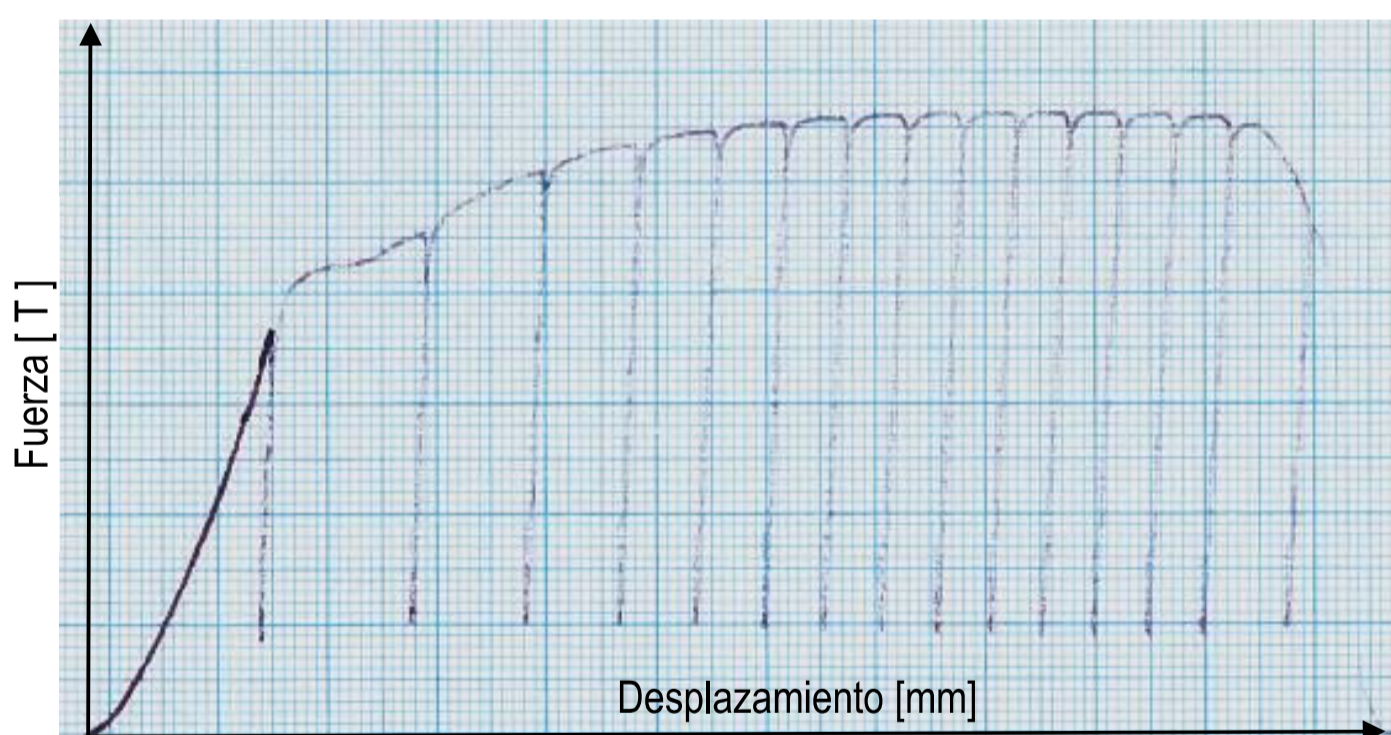
El ensayo cíclico se realizó con una función de carga sinusoidal y una frecuencia de aplicación de carga de 1Hz. Ensayando las probetas oficiales bajo el mismo estado tensional, agotando su capacidad en promedio de 18 ciclos, Figura 4.20. Al igual que en el ensayo estático se realizaron ensayos destructivos a 63 probetas como se detalla en la Tabla 4.3.

TABLA 4.3: Total de probetas oficiales para ensayo cíclico dinámico

Tipo de probeta	Cantidad
Estándar	27
Soldadas	27
Recocidas	9
Total	63

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 4.20: Fuerza aplicada Vs Desplazamiento del pistón, ensayo cíclico-dinámico MTS.



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Posterior a la ejecución del experimento, se realiza la medición de todas las variables físicas, mediante el uso de un pie de rey con apreciación de 0.01 milímetros.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Concluido la ejecución del experimento se analizan los resultados obtenidos, con el propósito de caracterizar mecánicamente el acero A706 y establecer la marca o marcas que tienen un mejor comportamiento bajo la acción de cargas cíclicas dinámicas, contribuyendo a mejorar la calidad del acero de producción nacional.

Según (Zolotorevski, 1976), en sus trabajos previos a la obtención de su doctorado expresa “La estructura de los metales y aleaciones reales y la distribución de sus defectos no son iguales, incluso en los límites de la misma muestra. Por eso las propiedades mecánicas determinadas por esta estructura y defectos, hablando en sentido estricto, son distintas para los diferentes volúmenes de la muestra. Como resultado, las características de las propiedades mecánicas que debemos apreciar en los pruebas, son magnitudes medio estadísticas que dan la característica sumaria matemática más probable de todo el volumen de la muestra que participa en la prueba. Incluso, al hacer la medida absolutamente precisa de las propiedades mecánicas, aquellas no serán iguales en distintas muestras de un mismo material. Los errores instrumentales en la determinación de las características de las propiedades vinculadas con la medición de cargas, deformaciones dimensiones etcétera, aumentan aún más la divergencia en los resultados experimentales”.

5.1 ENSAYOS MECÁNICOS

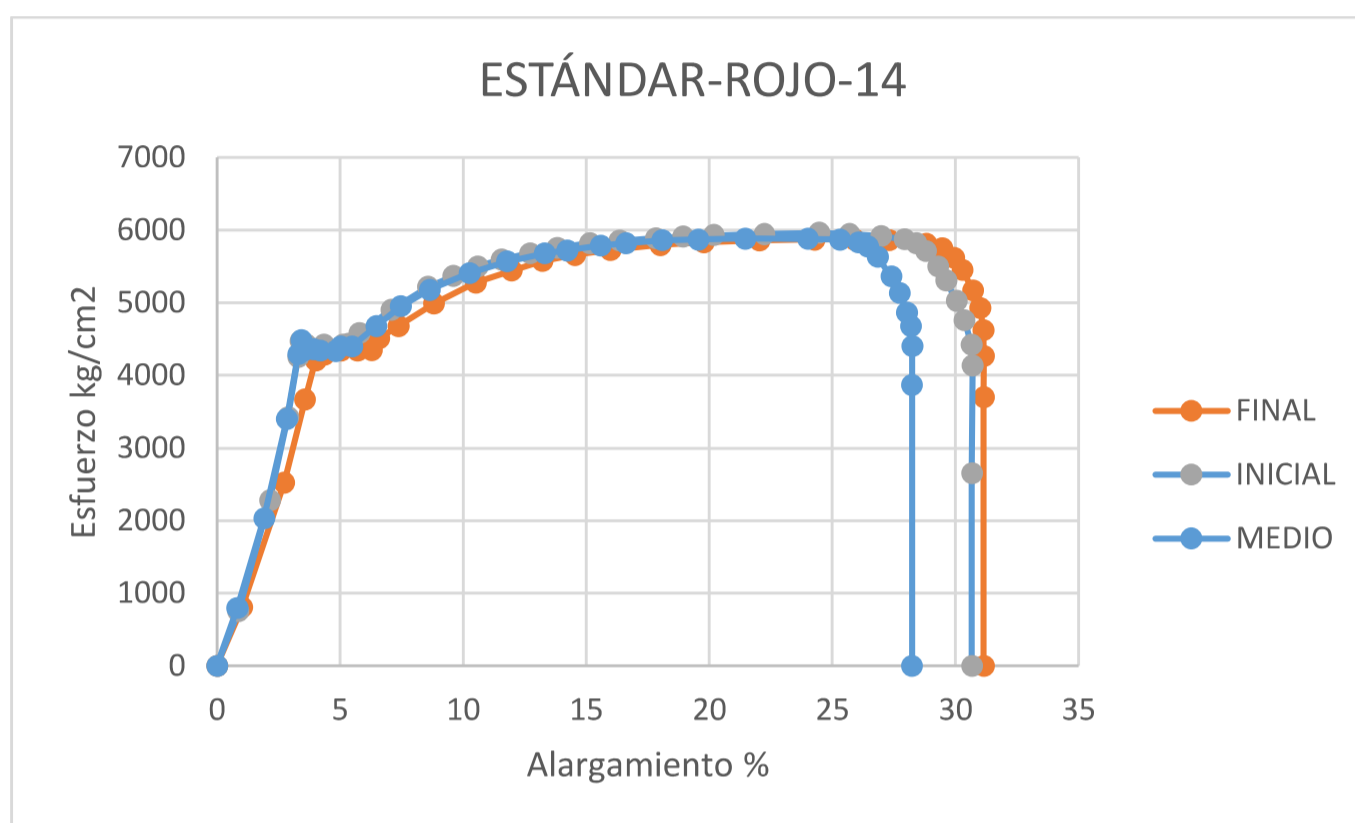
Los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos estáticos y cíclicos oficiales de los tres tipos de probetas (estándar, soldadas y recocidas), son analizados considerando los siguientes parámetros:

- Resistencia mecánica
- Elongación y contracción
- Energía absorbida
- Ciclos de agotamiento
- Inicio y propagación de fractura

5.1.1 PROBETAS ESTÁNDAR

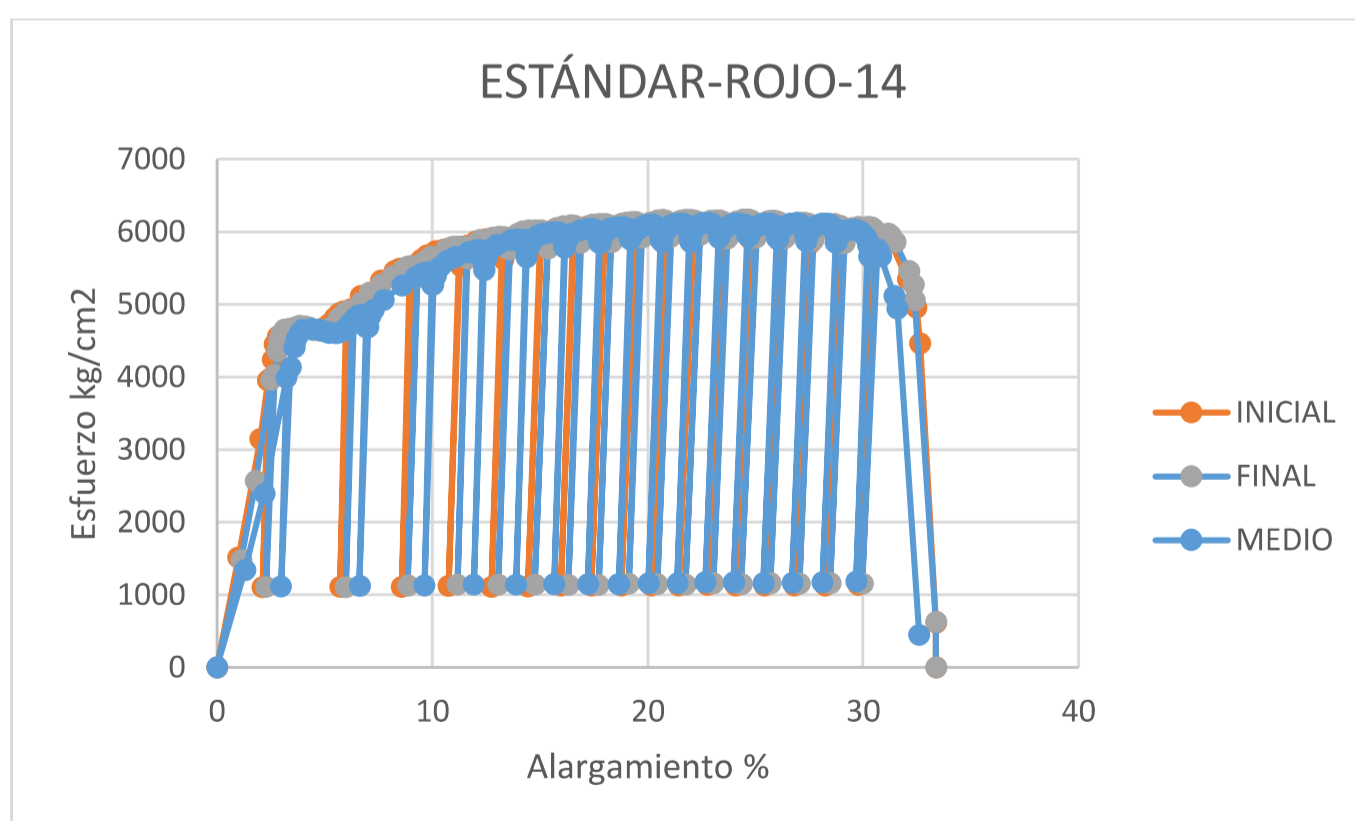
Los resultados de los ensayos mecánicos en probetas estándar se muestran en las figuras 5.1 a la 5.18.

FIGURA 5.1: Ensayo estático probeta estándar, marca rojo, \varnothing 14mm



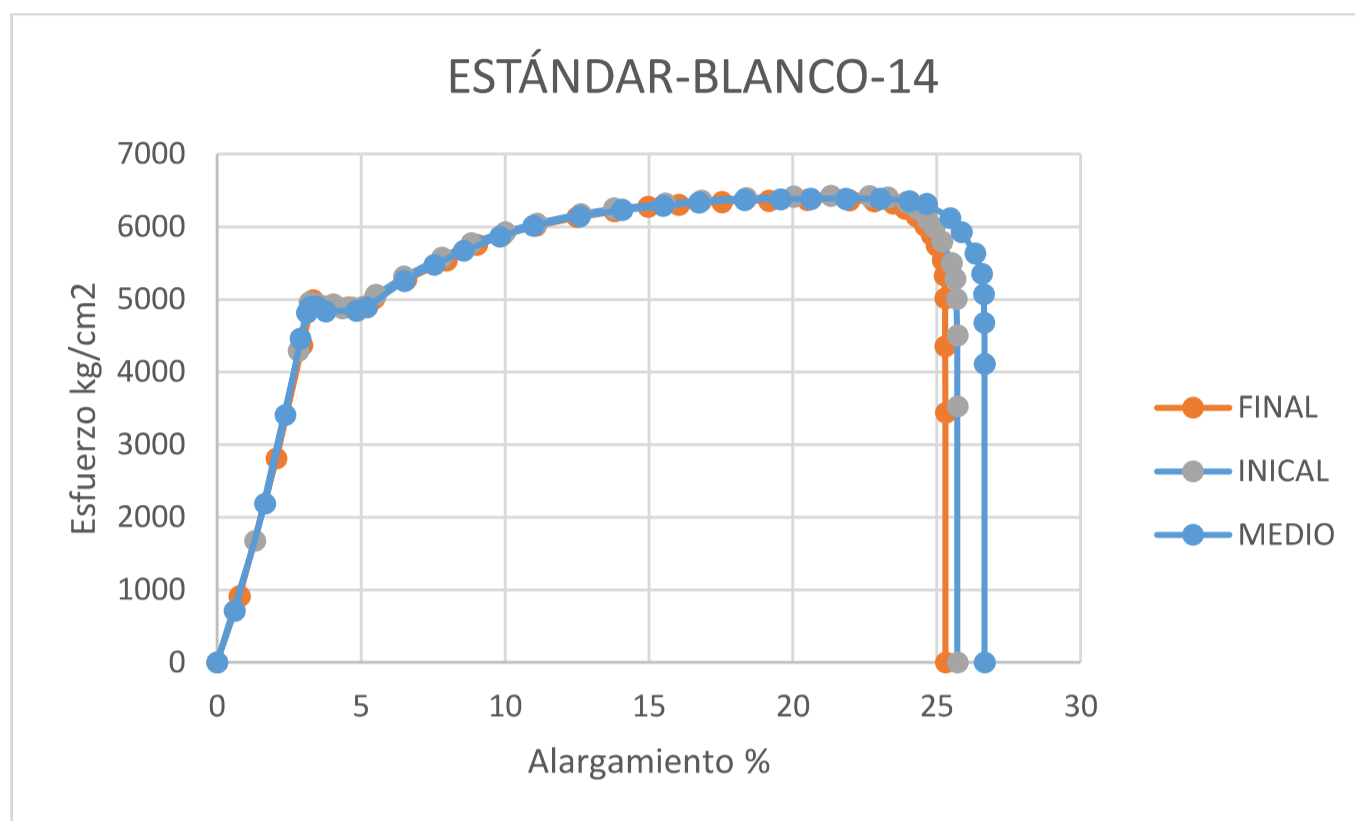
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.2: Ensayo cíclico probeta estándar, marca rojo, \varnothing 14mm



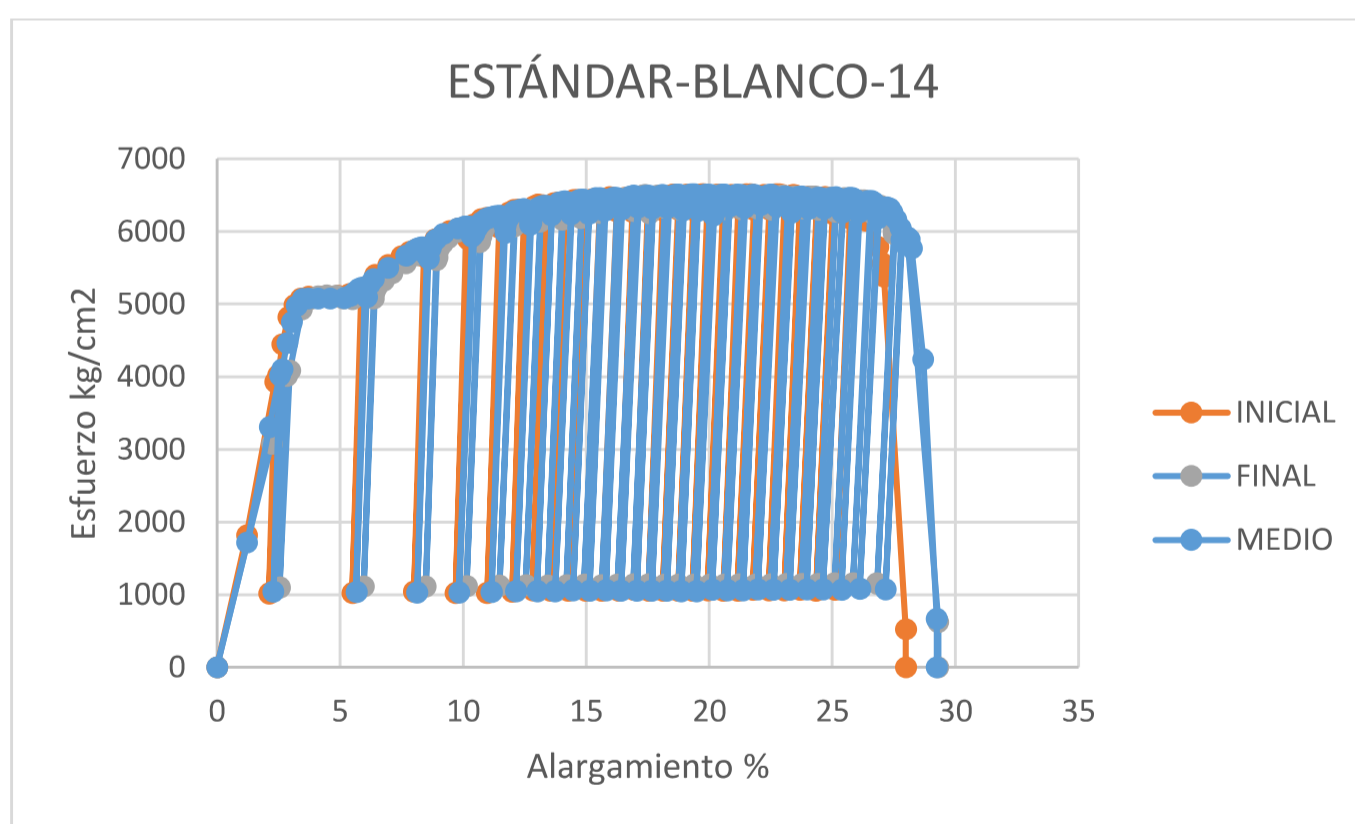
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.3: Ensayo estático probeta estándar, marca blanco, Ø 14mm



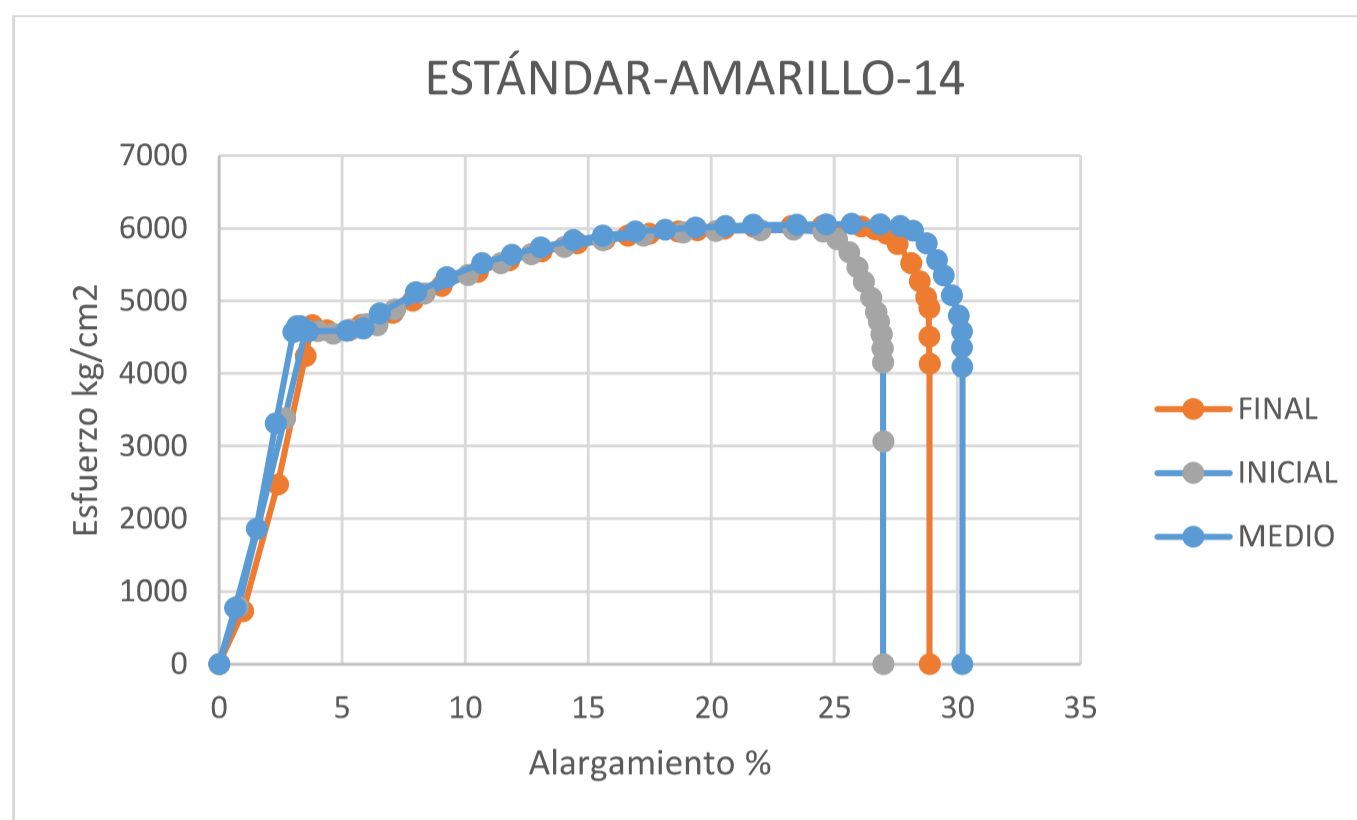
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.4: Ensayo cíclico probeta estándar, marca blanco, Ø 14mm



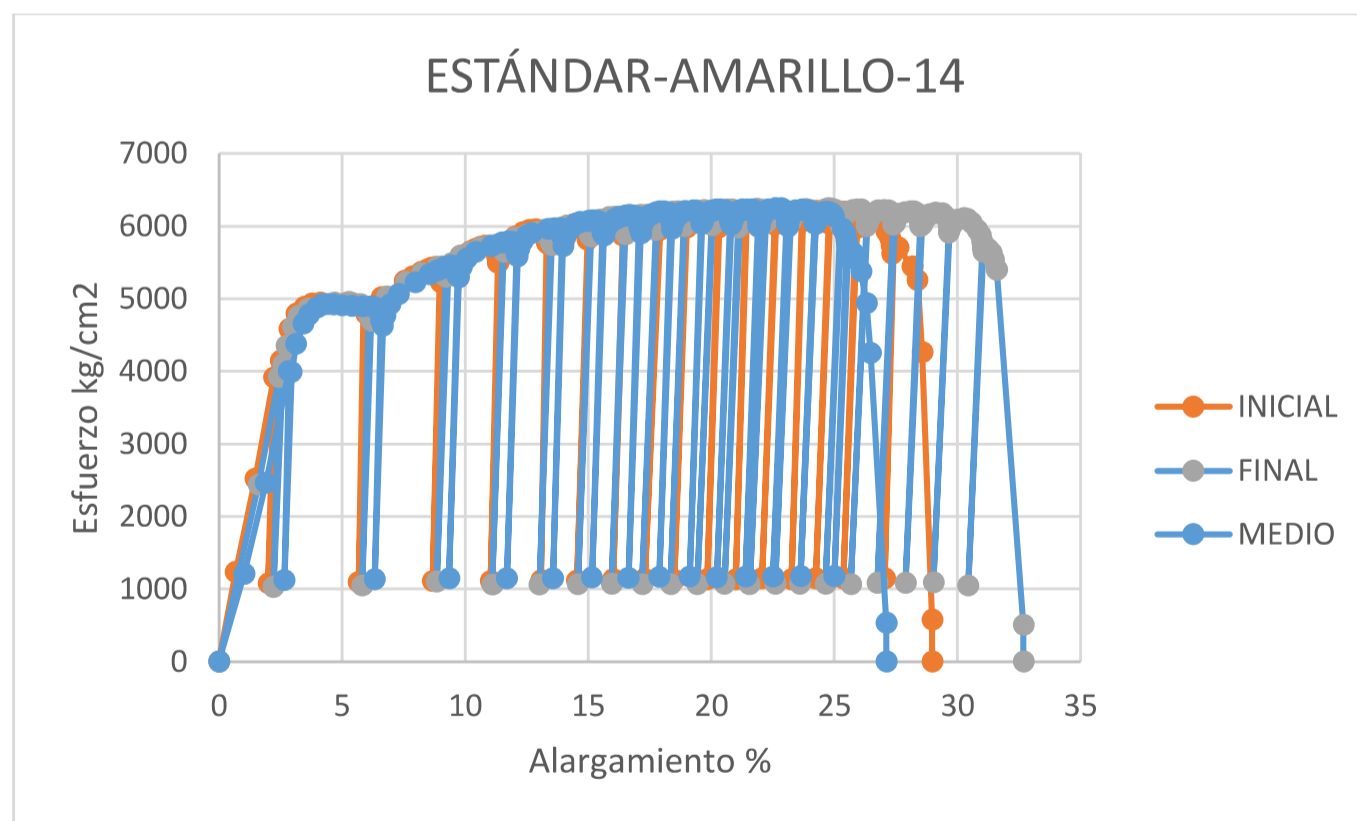
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.5: Ensayo estático probeta estándar, marca amarillo, Ø 14mm



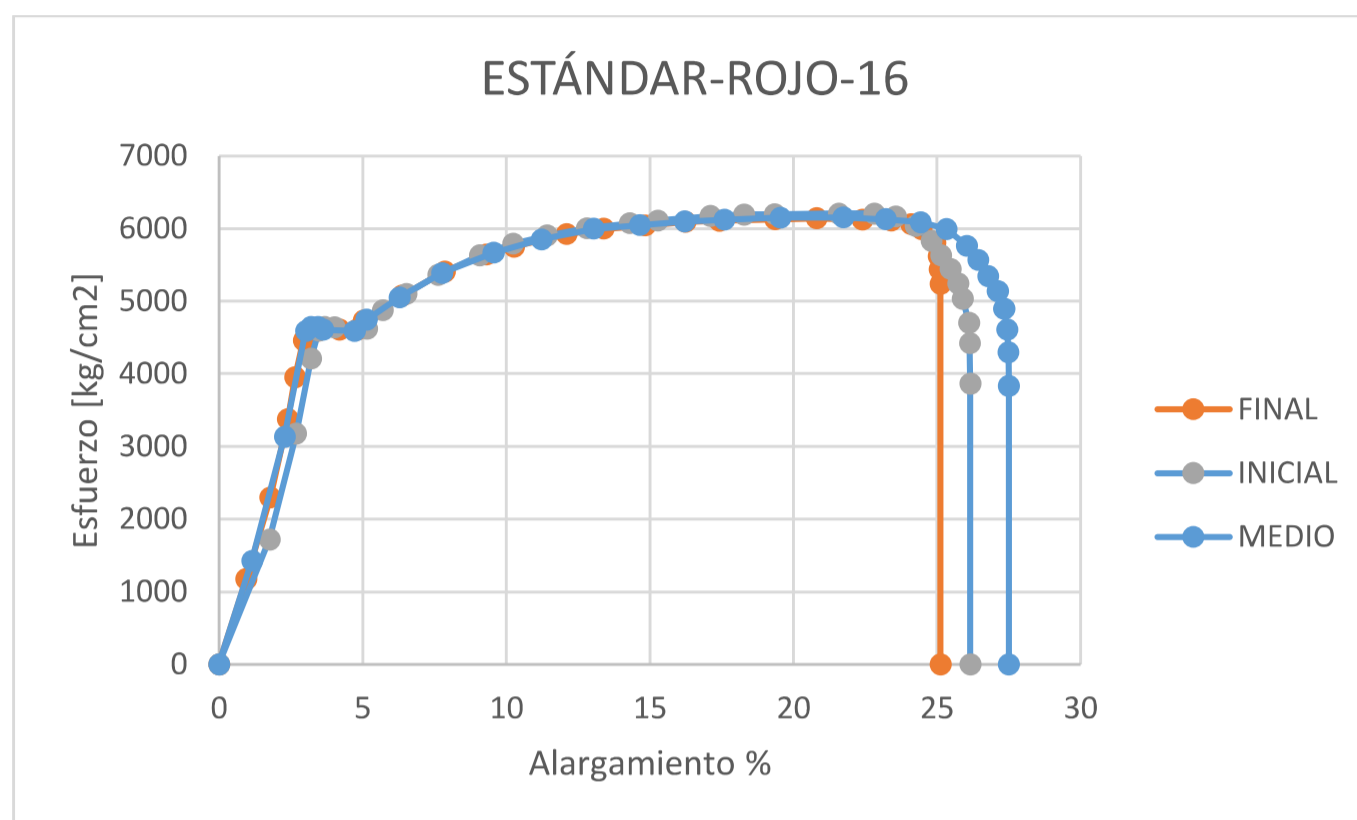
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.6: Ensayo cíclico probeta estándar, marca amarillo, Ø 14mm



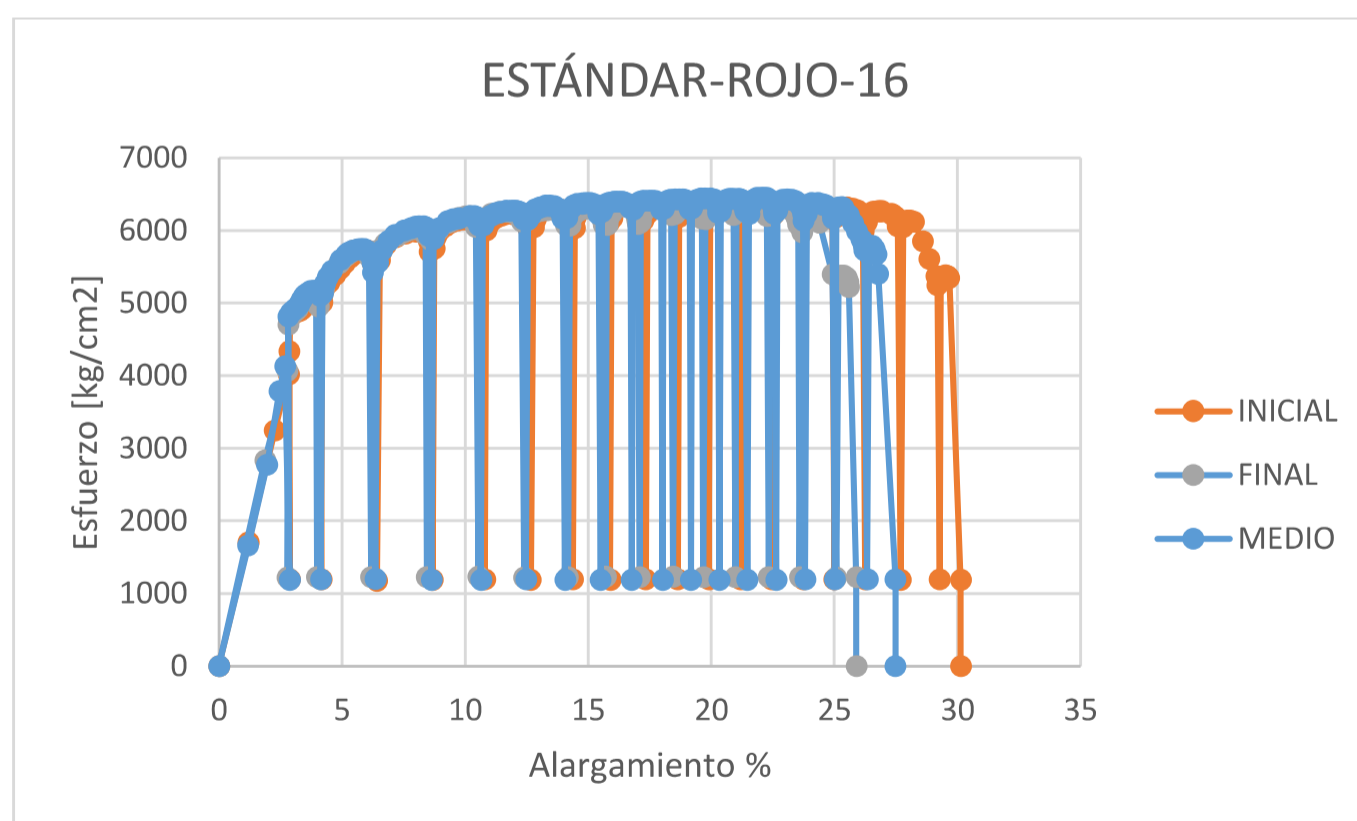
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.7: Ensayo estático probeta estándar, marca rojo, Ø 16mm



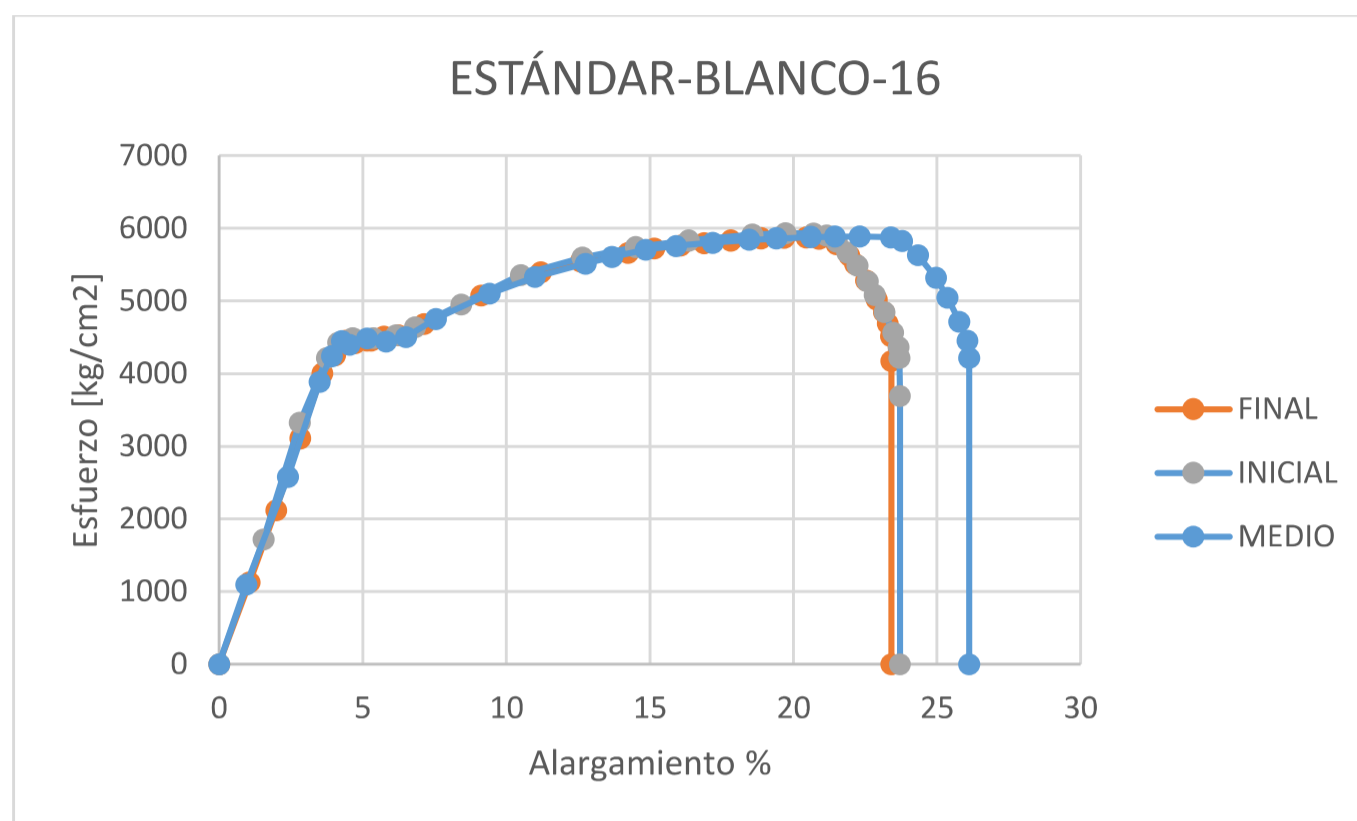
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.8: Ensayo cíclico probeta estándar, marca rojo, Ø 16mm



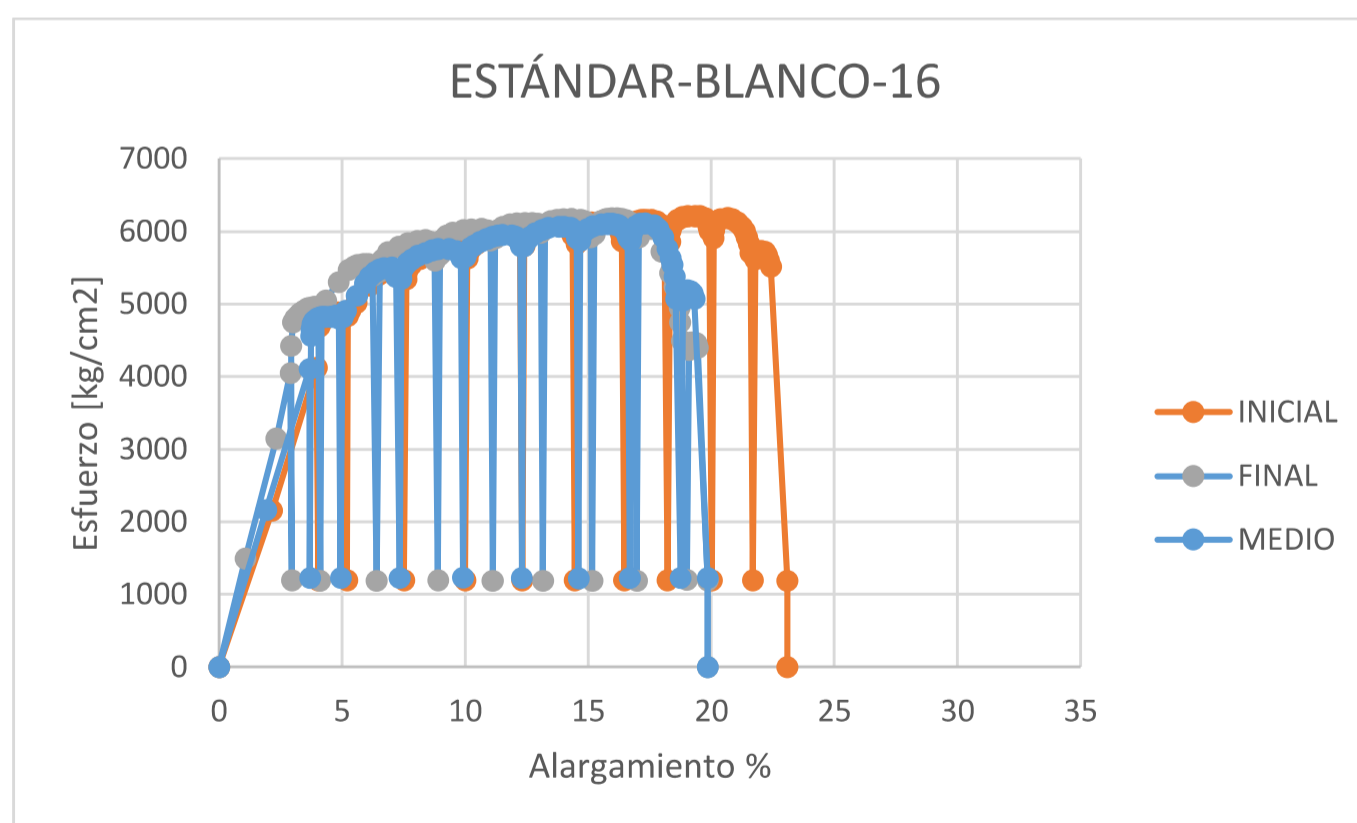
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.9: Ensayo estático probeta estándar, marca blanco, Ø 16mm



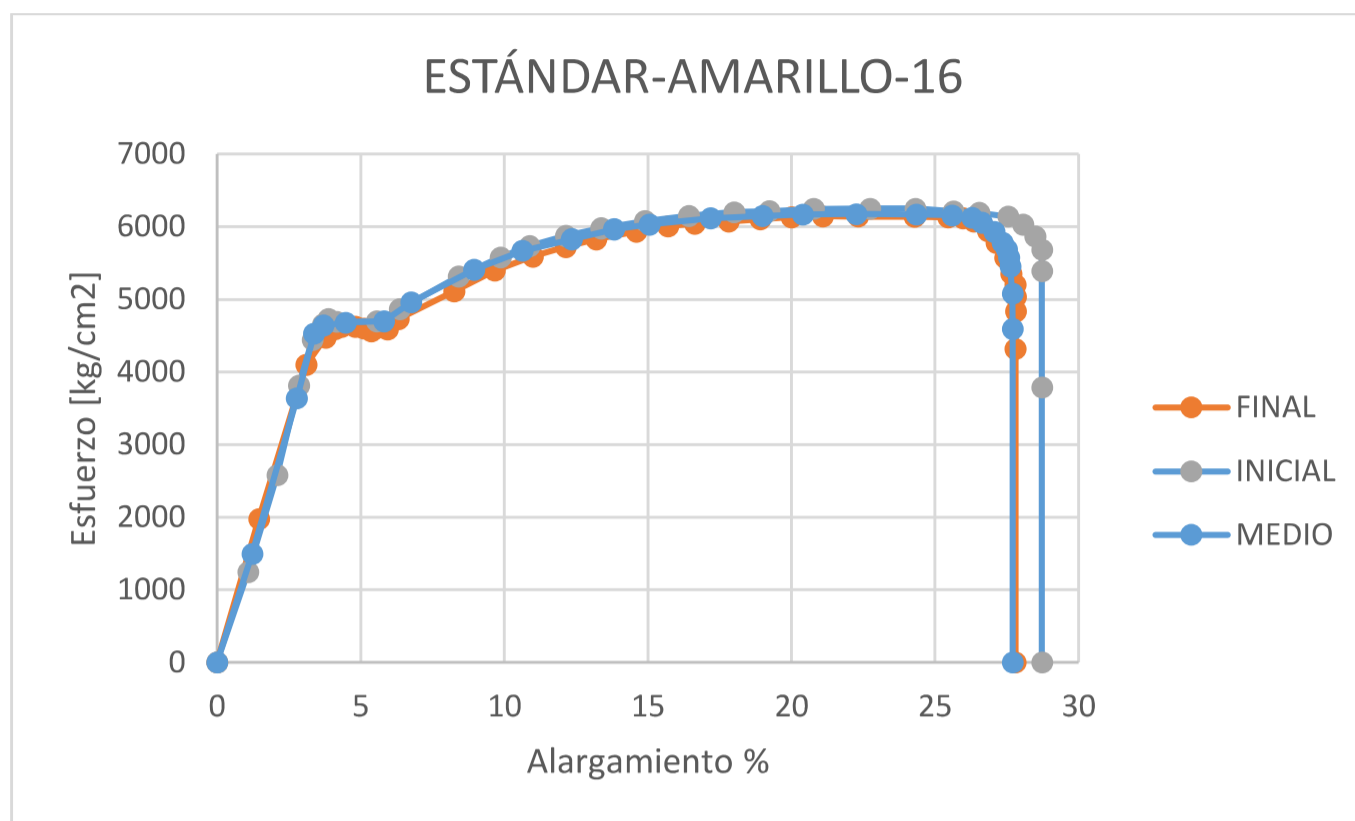
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.10: Ensayo cíclico probeta estándar, marca blanco, Ø 16mm



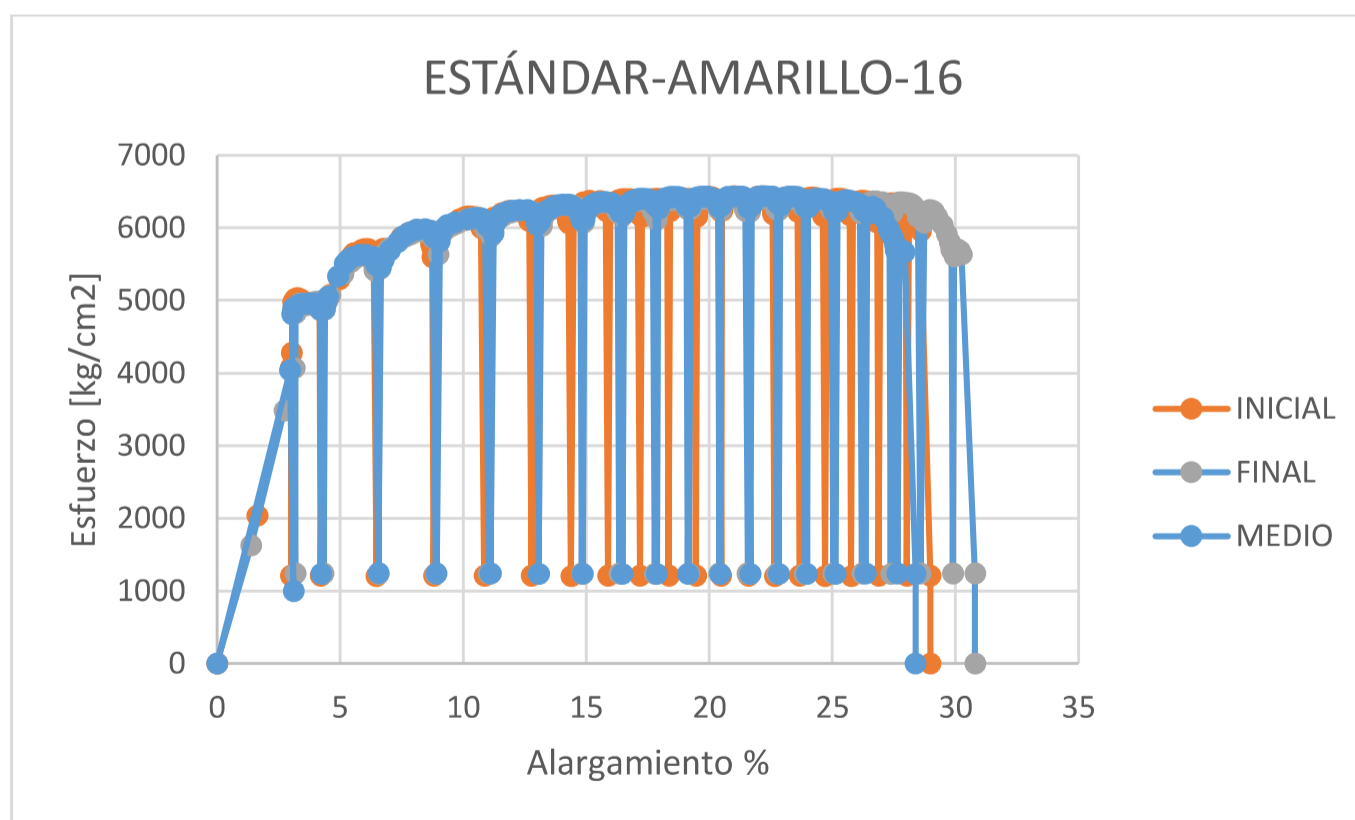
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.11: Ensayo estático probeta estándar, marca amarillo, Ø 16mm



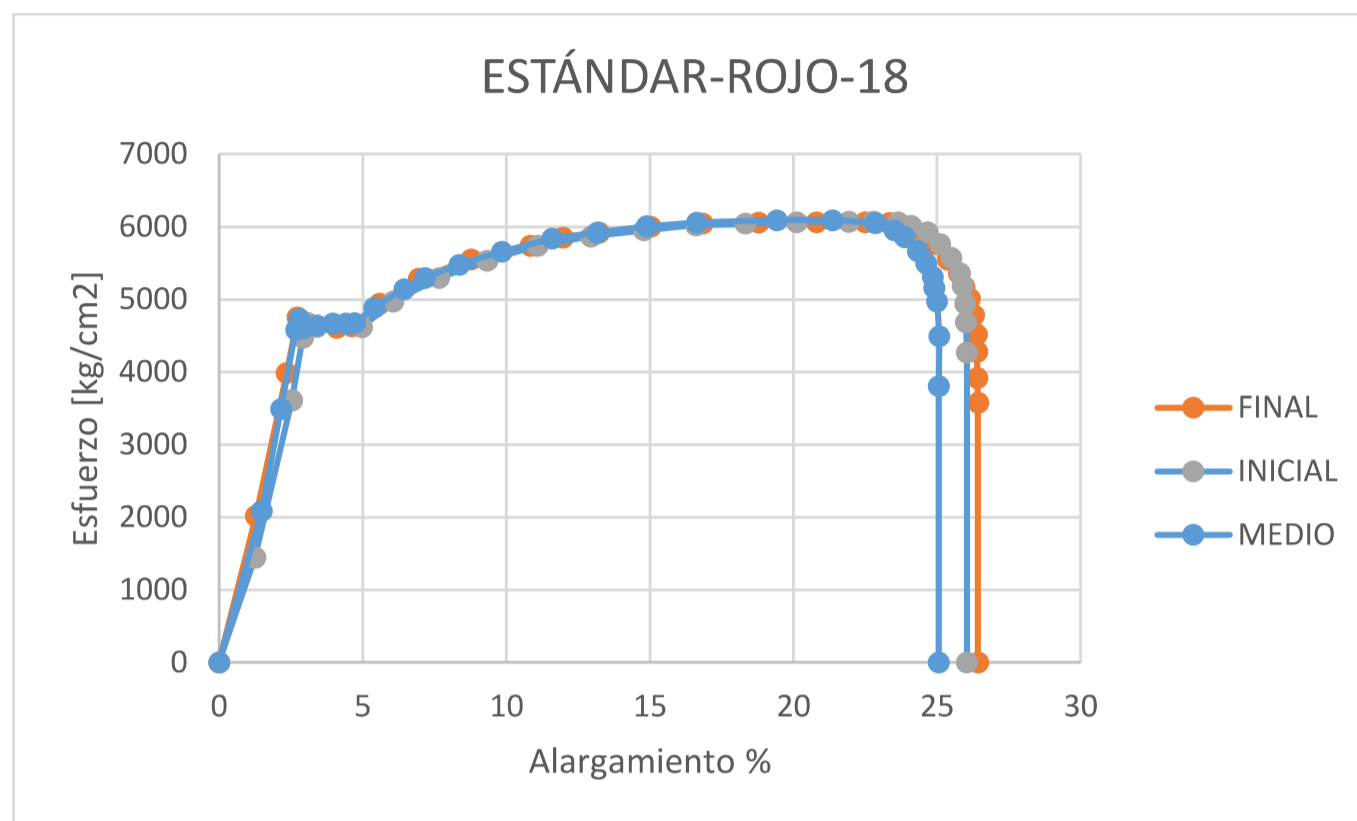
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.12: Ensayo cíclico probeta estándar, marca amarillo, Ø 16mm



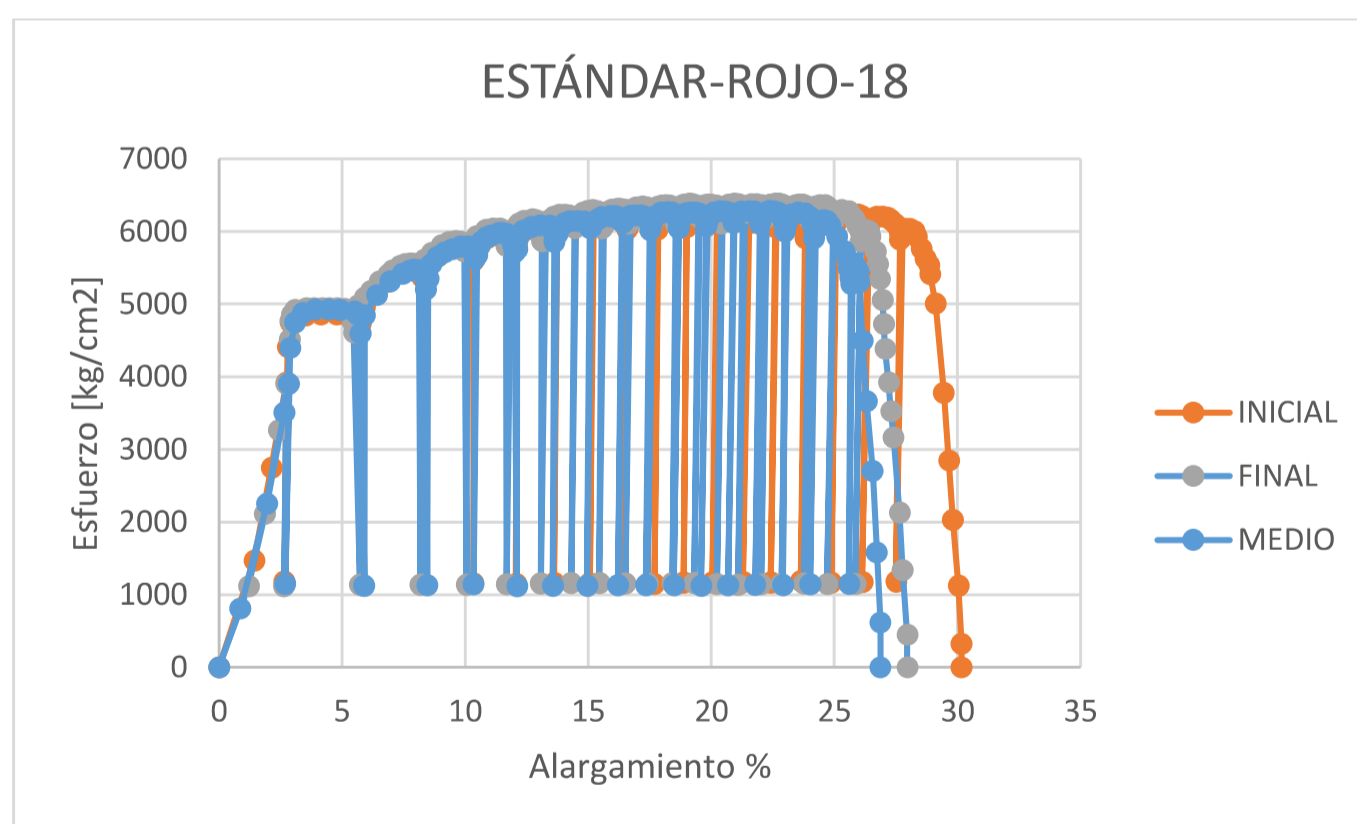
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.13: Ensayo estático probeta estándar, marca rojo, Ø 18mm



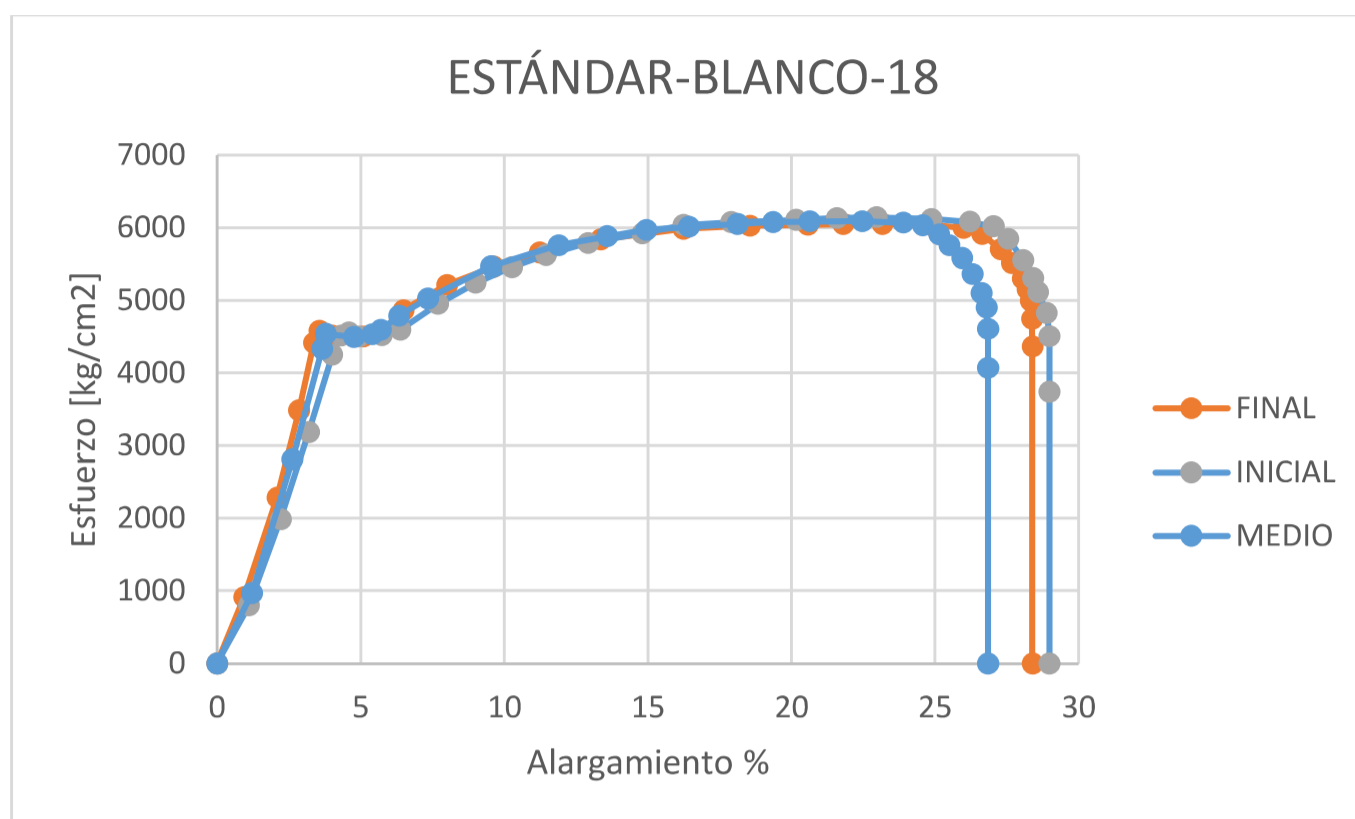
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.14: Ensayo cíclico probeta estándar, marca rojo, Ø 18mm



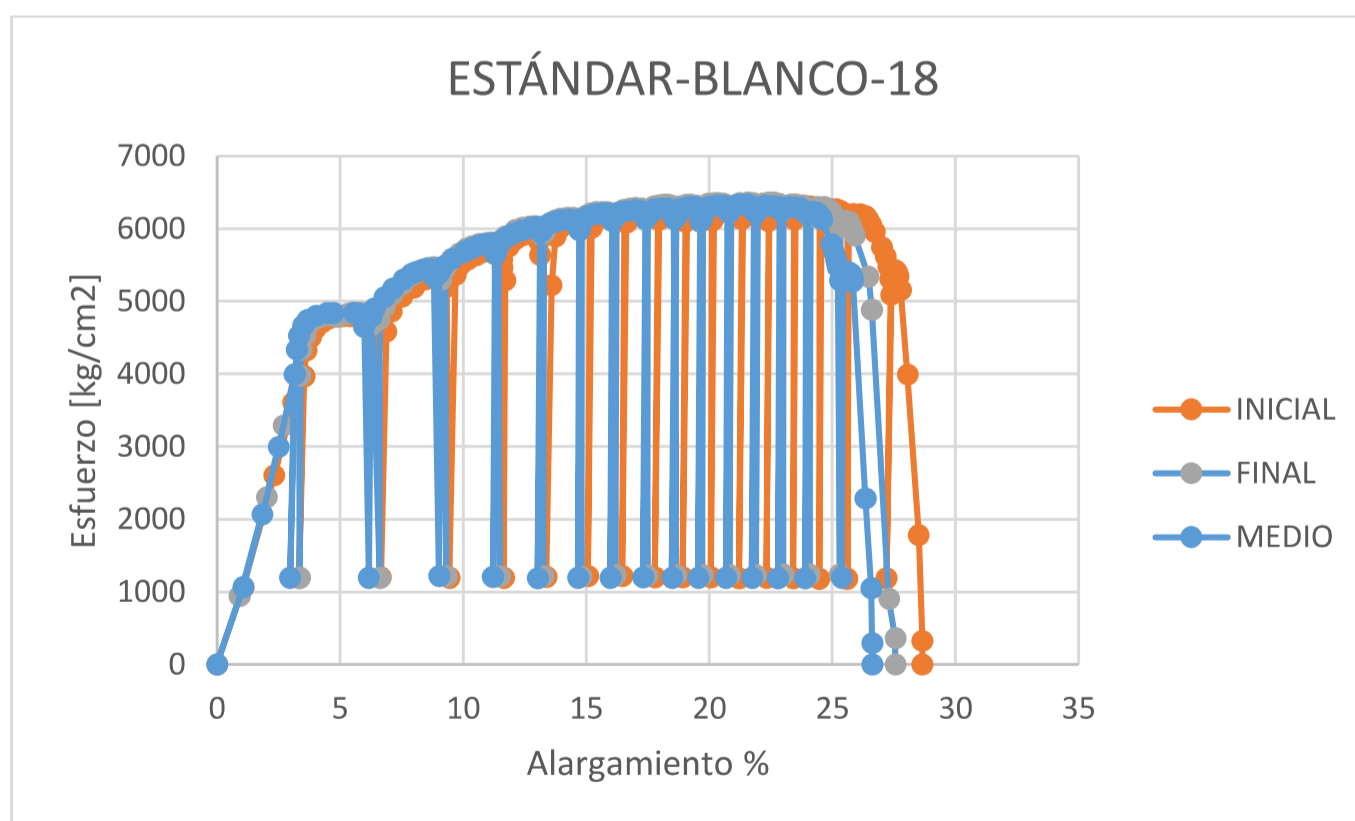
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.15: Ensayo estático probeta estándar, marca blanco, Ø 18mm



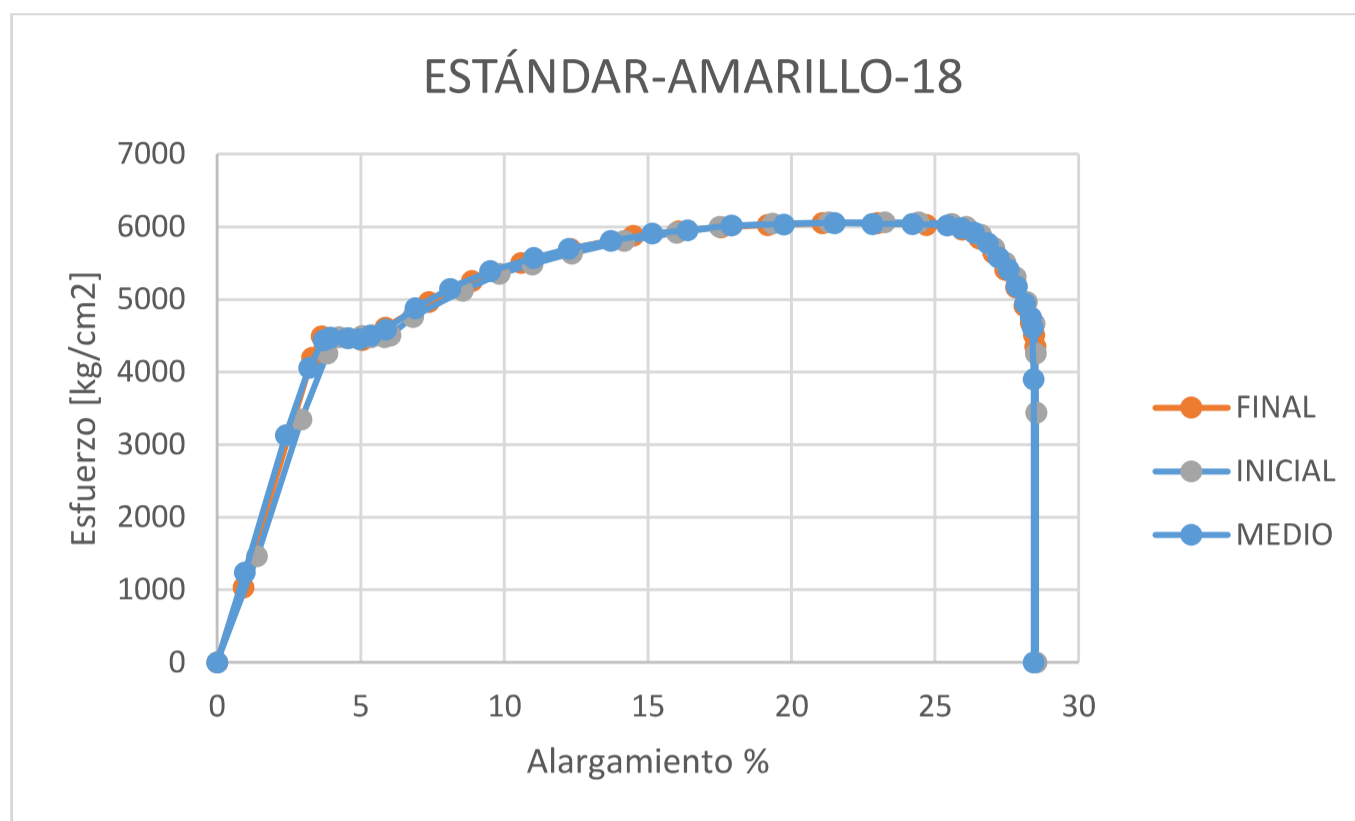
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.16: Ensayo cíclico probeta estándar, marca blanco, Ø 18mm



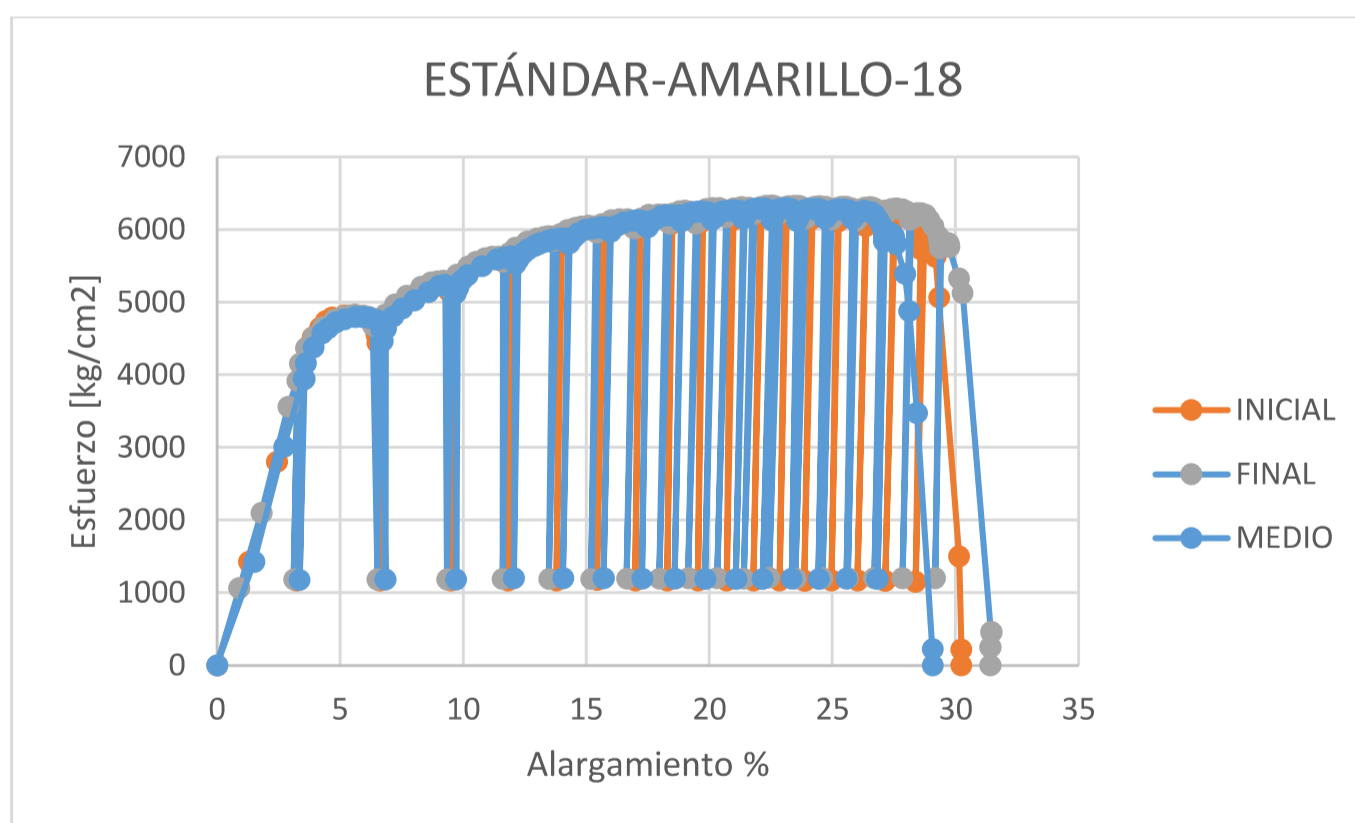
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.17: Ensayo estático probeta estándar, marca amarillo, Ø 18mm



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.18: Ensayo cíclico probeta estándar, marca amarillo, Ø 18mm



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.1.1 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica de las probetas estándar cumple satisfactoriamente con los requisitos mínimos establecido en la norma (INEN-2167, 2011), Tabla 5.1.

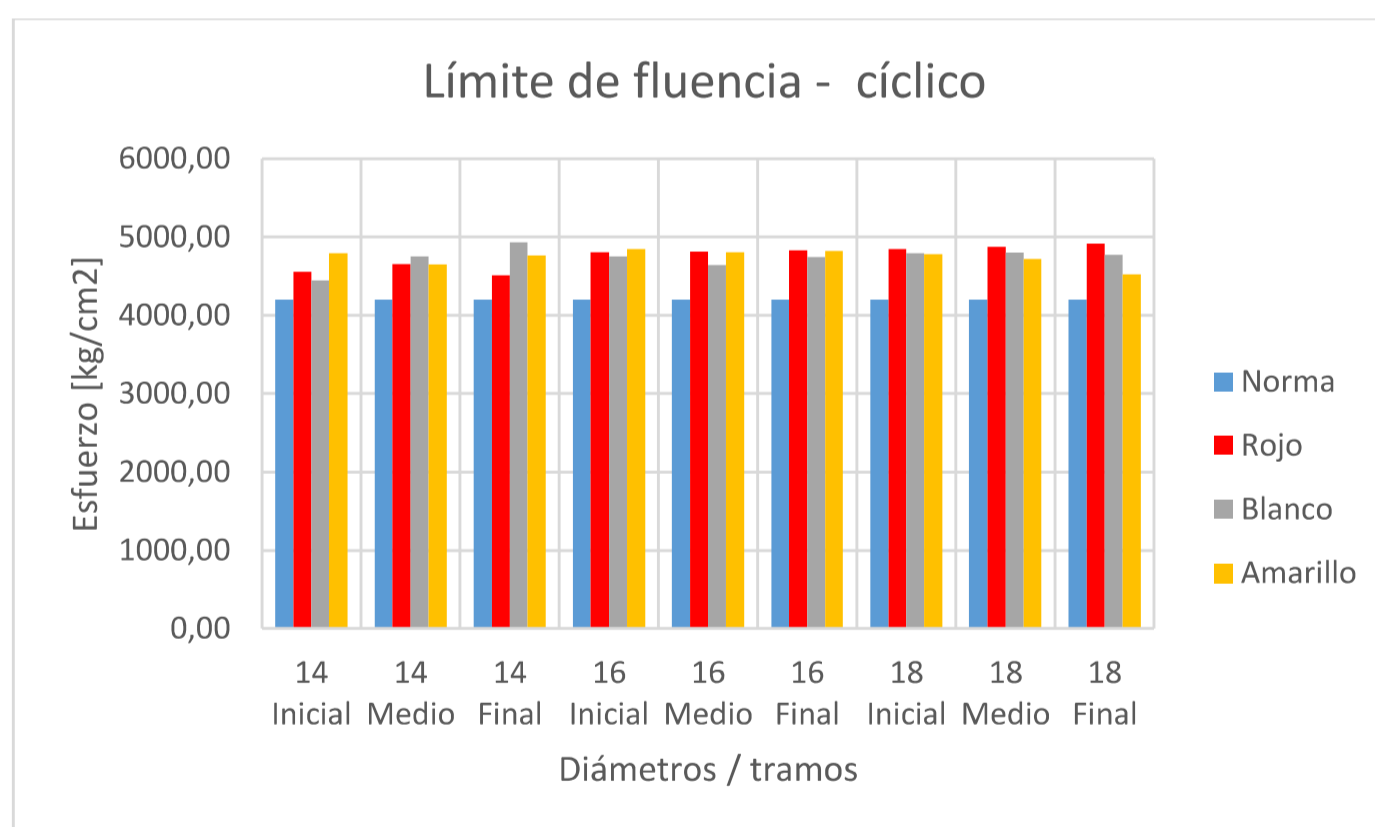
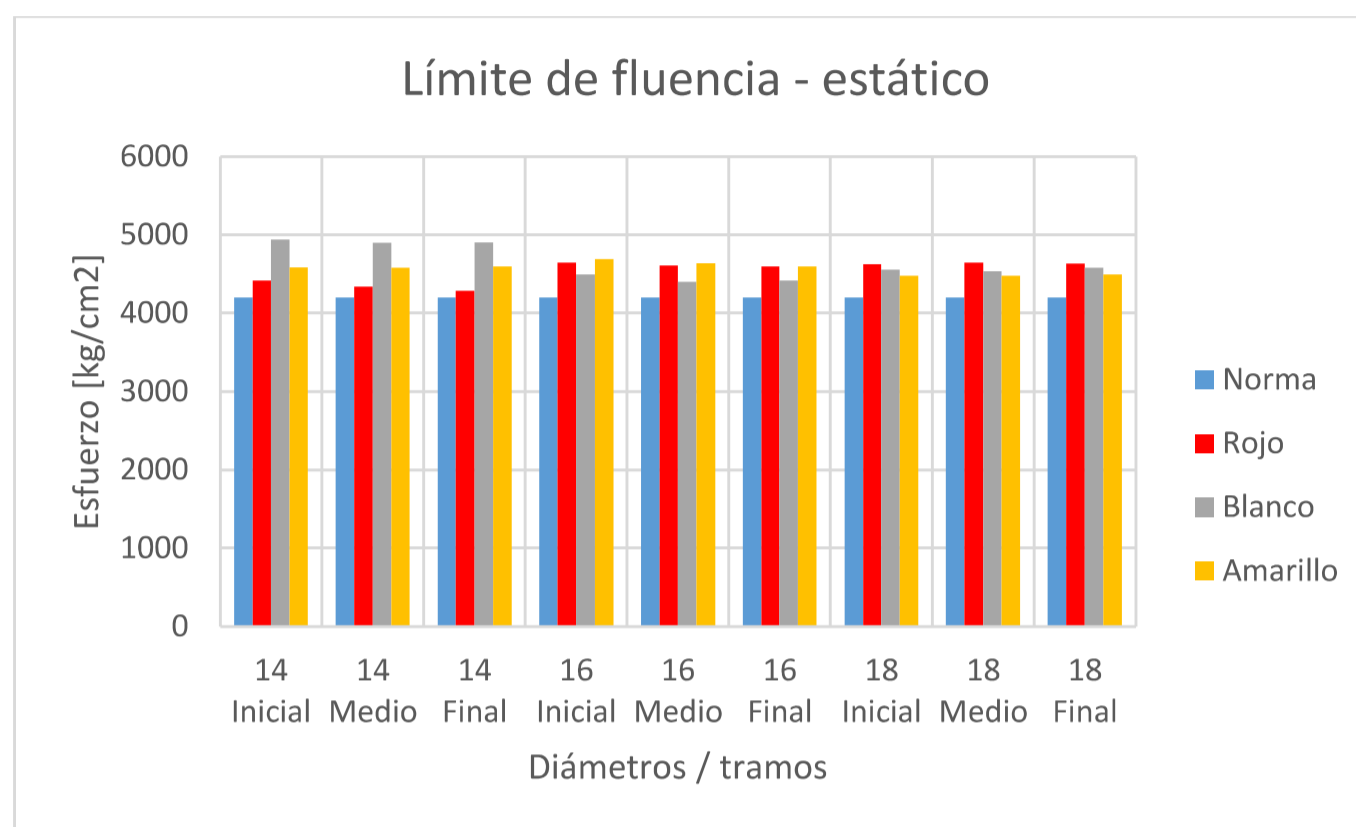
TABLA 5.1: Propiedades mecánicas probetas estándar

<i>Límite de fluencia - estático</i>		<i>Resistencia última a tracción - estático</i>	
Media	4579,040	Media	6089,772
Error típico	29,995	Error típico	28,722
Mediana	4584,915	Mediana	6066,600
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	155,857	Desviación estándar	149,242
Varianza de la muestra	24291,307	Varianza de la muestra	22273,274
Curtosis	0,851	Curtosis	0,219
Coefficiente de asimetría	0,632	Coefficiente de asimetría	0,612
Rango	651,760	Rango	557,836
Mínimo	4284,008	Mínimo	5871,083
Máximo	4935,768	Máximo	6428,920
Suma	123634,092	Suma	164423,845
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000
<i>Límite de fluencia - cíclico</i>		<i>Resistencia última a tracción- cíclico</i>	
Media	4747,974	Media	6313,786
Error típico	23,707	Error típico	23,393
Mediana	4786,655	Mediana	6309,966
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	123,187	Desviación estándar	121,555
Varianza de la muestra	15174,985	Varianza de la muestra	14775,514
Curtosis	0,410	Curtosis	-0,833
Coefficiente de asimetría	-0,979	Coefficiente de asimetría	-0,048
Rango	480,763	Rango	409,137
Mínimo	4448,346	Mínimo	6107,912
Máximo	4929,109	Máximo	6517,049
Suma	128195,301	Suma	170472,211
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

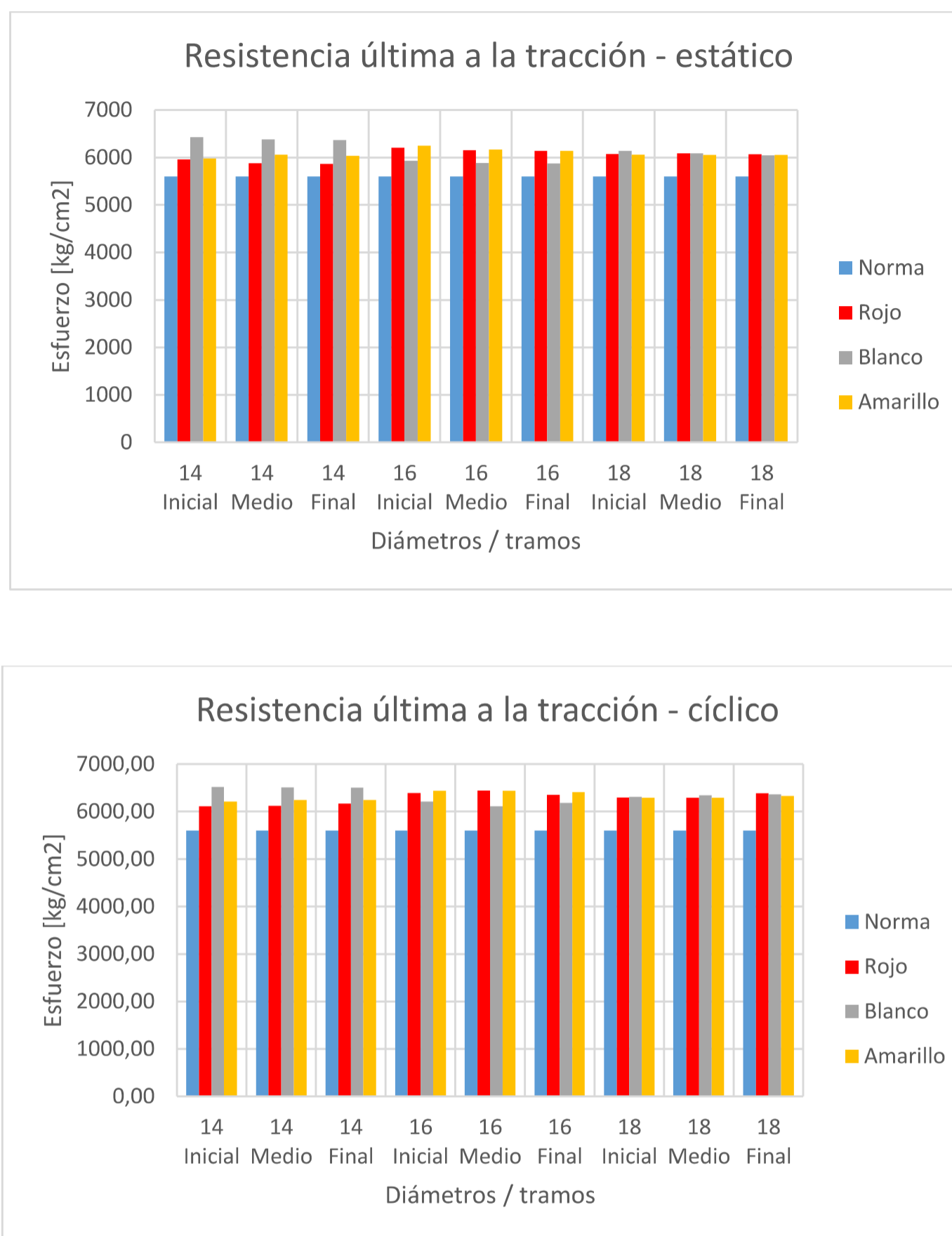
Registrando un valor del límite de fluencia mínimo de 4284 kg/cm² y un máximo de 4935 kg/cm² del global de probetas estándar, Figura 5.19.

FIGURA 5.19: Límite de fluencia probetas estándar



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La resistencia mecánica última supera el límite inferior establecido por la norma (INEN-2167, 2011), de los resultados globales de las probetas estándar, se obtiene un valor mínimo de 5871 kg/cm² y un máximo de 6517 kg/cm². Figura 5.20.

FIGURA 5.20: Resistencia última a la tracción probetas estándar

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La relación f_y/f_u promedio de las probetas estándar es de 1.33 que supera lo establecido por la norma (INEN-2167, 2011). Existe una variación de propiedades mecánicas a lo largo de la varilla comercial (12 metros), el límite de fluencia varía en 0.675% y la resistencia mecánica última 0.597%.

La menor variación de propiedades mecánicas es presentada por la marca amarillo con un 0.5%.

5.1.1.2 Elongación y contracción

La elongación, parámetro controlado por las normas (INEN-2167, 2011) e (INEN-0109, 2009), muestran que las probetas estándar tiene una elongación del 26 %, Tabla 5.2, (materiales dúctiles) tanto en el ensayo estático como cíclico.

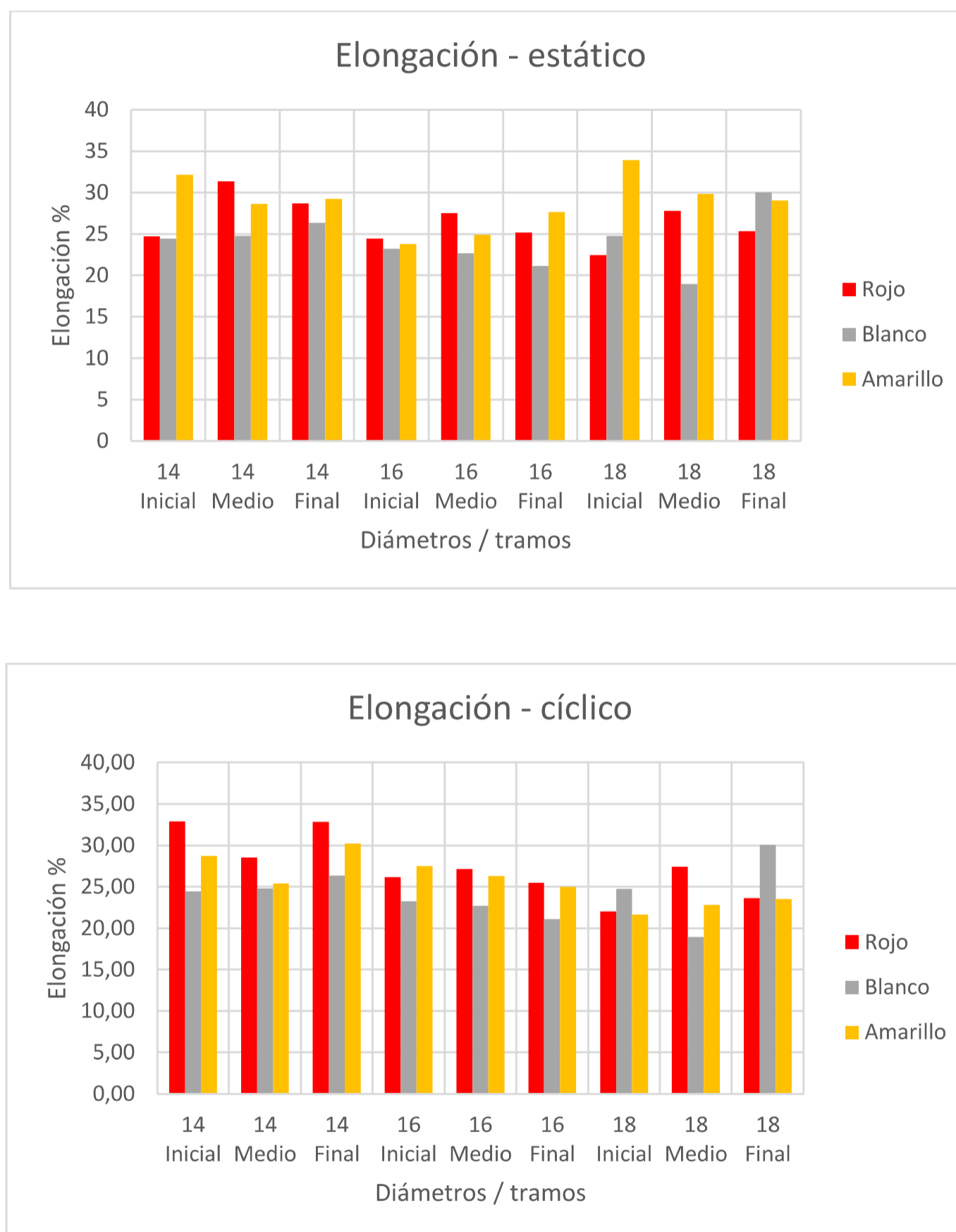
TABLA 5.2: Elongación y contracción – probetas estándar

<i>Elongación % - estático</i>		<i>Contracción % - estático</i>	
Media	26,333	Media	52,565
Error típico	0,673	Error típico	1,187
Mediana	25,356	Mediana	53,760
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	3,497	Desviación estándar	6,170
Varianza de la muestra	12,228	Varianza de la muestra	38,068
Curtosis	-0,064	Curtosis	0,426
Coefficiente de asimetría	0,090	Coefficiente de asimetría	-1,058
Rango	15,100	Rango	23,245
Mínimo	18,789	Mínimo	37,095
Máximo	33,889	Máximo	60,340
Suma	710,984	Suma	1419,250
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000
<i>Elongación % - cíclico</i>		<i>Contracción % - cíclico</i>	
Media	25,676	Media	50,148
Error típico	0,655	Error típico	1,255
Mediana	25,386	Mediana	51,929
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	3,404	Desviación estándar	6,519
Varianza de la muestra	11,588	Varianza de la muestra	42,498
Curtosis	0,019	Curtosis	0,115
Coefficiente de asimetría	0,398	Coefficiente de asimetría	-0,855
Rango	13,916	Rango	23,093
Mínimo	18,956	Mínimo	35,466
Máximo	32,871	Máximo	58,559
Suma	693,251	Suma	1354,002
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

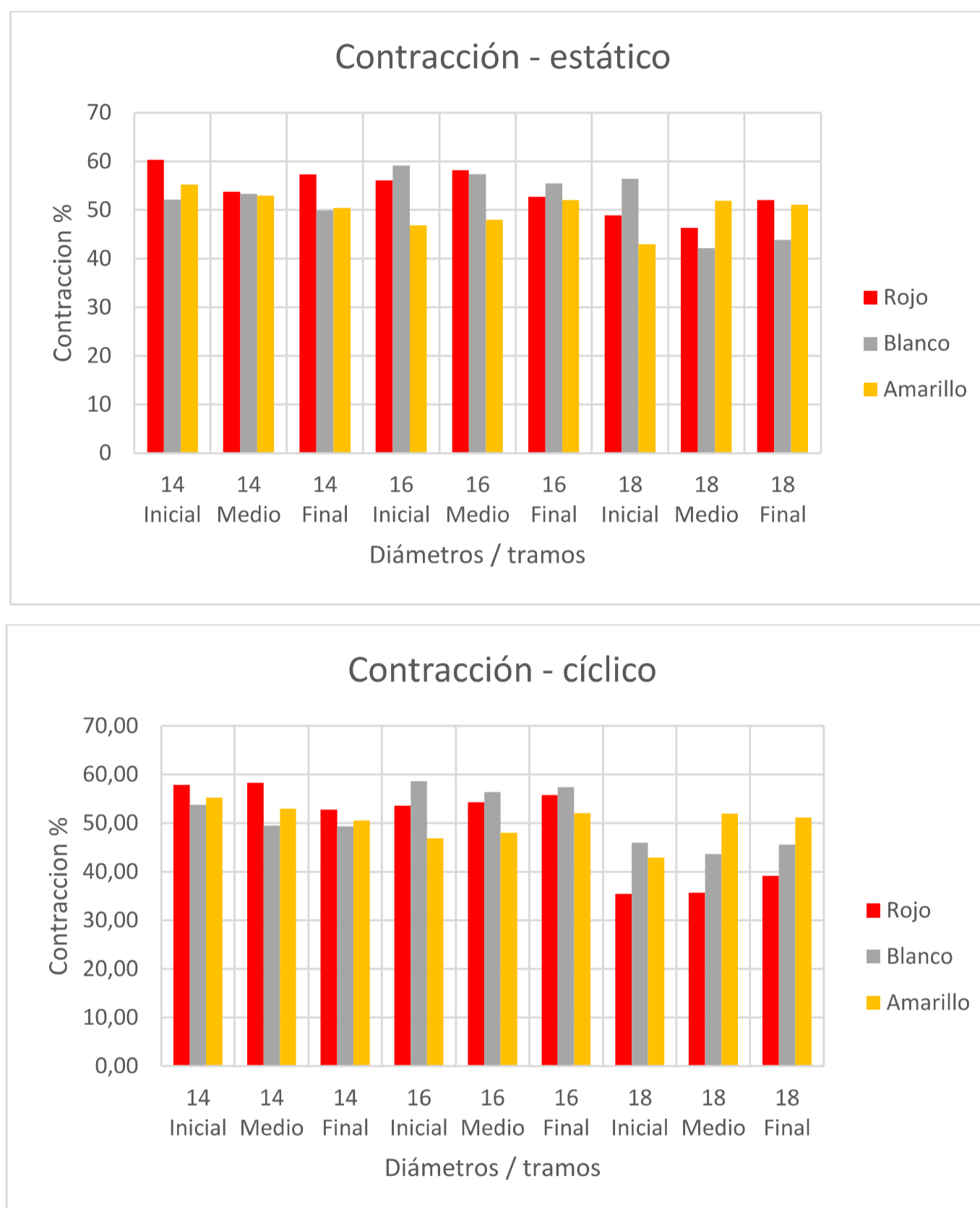
Identificando una notable variación de resultados en la elongación a lo largo de la varilla comercial de 12 metros, Figura 5.21. En promedio del 10% para el ensayo estático y 12 % para el cíclico.

FIGURA 5.21: Elongación – probetas estándar



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La contracción presenta una menor variación a lo largo de la varilla comercial de 12 metros, con un promedio de 5% para el ensayo estático y 4 % para el cíclico, Figura 5.22.

FIGURA 5.22: Contracción - probetas estándar

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La marca de amarillo presenta en promedio una mayor elongación con un valor de 26%, mientras que la mayor contracción es presentada por la marca rojo con 53%.

5.1.1.3 Energía absorbida

La energía absorbida fue calculada a partir de la digitalización de los diagramas estáticos y cíclicos (área bajo curva).

TABLA 5.3: Índice de la cantidad de energía – probetas estándar

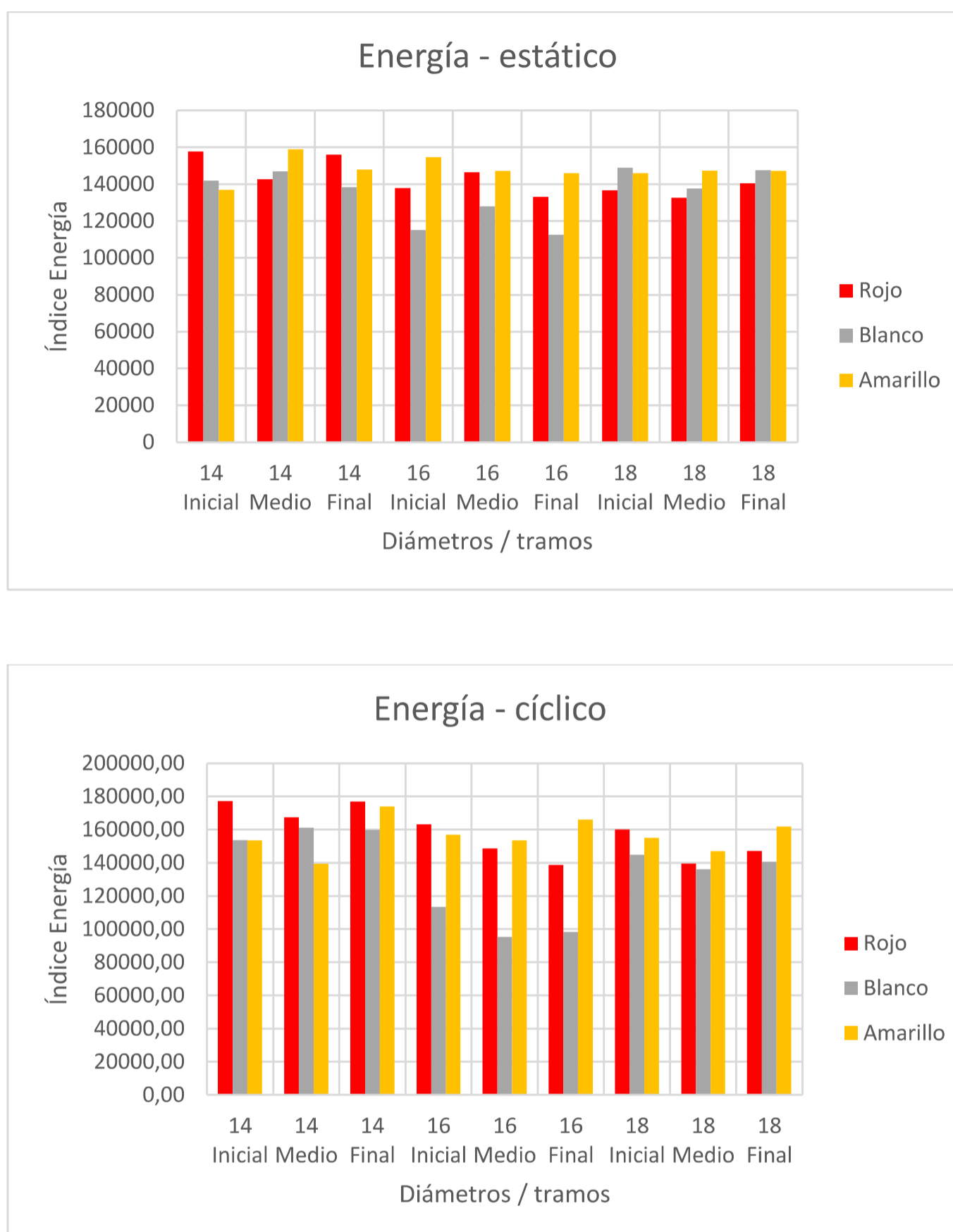
<i>Índice de energía - estático</i>		<i>Índice de energía - cíclico</i>	
Media	142009,568	Media	149237,209
Error típico	2150,835	Error típico	3958,857
Mediana	146082,291	Mediana	153446,933
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	11176,068	Desviación estándar	20570,826
Varianza de la muestra	124904500,637	Varianza de la muestra	423158876,549
Curtosis	1,475	Curtosis	1,702
Coefficiente de asimetría	-1,035	Coefficiente de asimetría	-1,250
Rango	46522,387	Rango	81898,383
Mínimo	112480,282	Mínimo	95344,518
Máximo	159002,669	Máximo	177242,901
Suma	3834258,338	Suma	4029404,641
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Mostrando una gran dispersión de resultados tanto como en ensayo estático como el cíclico, Tabla 5.3.

Con un promedio de índice de energía de 142009 unidades para el ensayo estático y 149237 para el cíclico. Tabla 5.3.

Presentando la marca blanco la mayor variación del índice de energía con 9%, Figura 5.23.

FIGURA 5.23: Índice de la cantidad de energía – probetas estándar

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Teniendo una menor variación del índice de energía en el ensayo estático la marca amarillo con alrededor del 1.5%, Figura 5.23.

5.1.1.4 Ciclos de agotamiento

Las probetas ensayadas cíclicamente agotaron su capacidad en un promedio de 18 ciclos de carga, Tabla 5.4.

TABLA 5.4: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas estándar

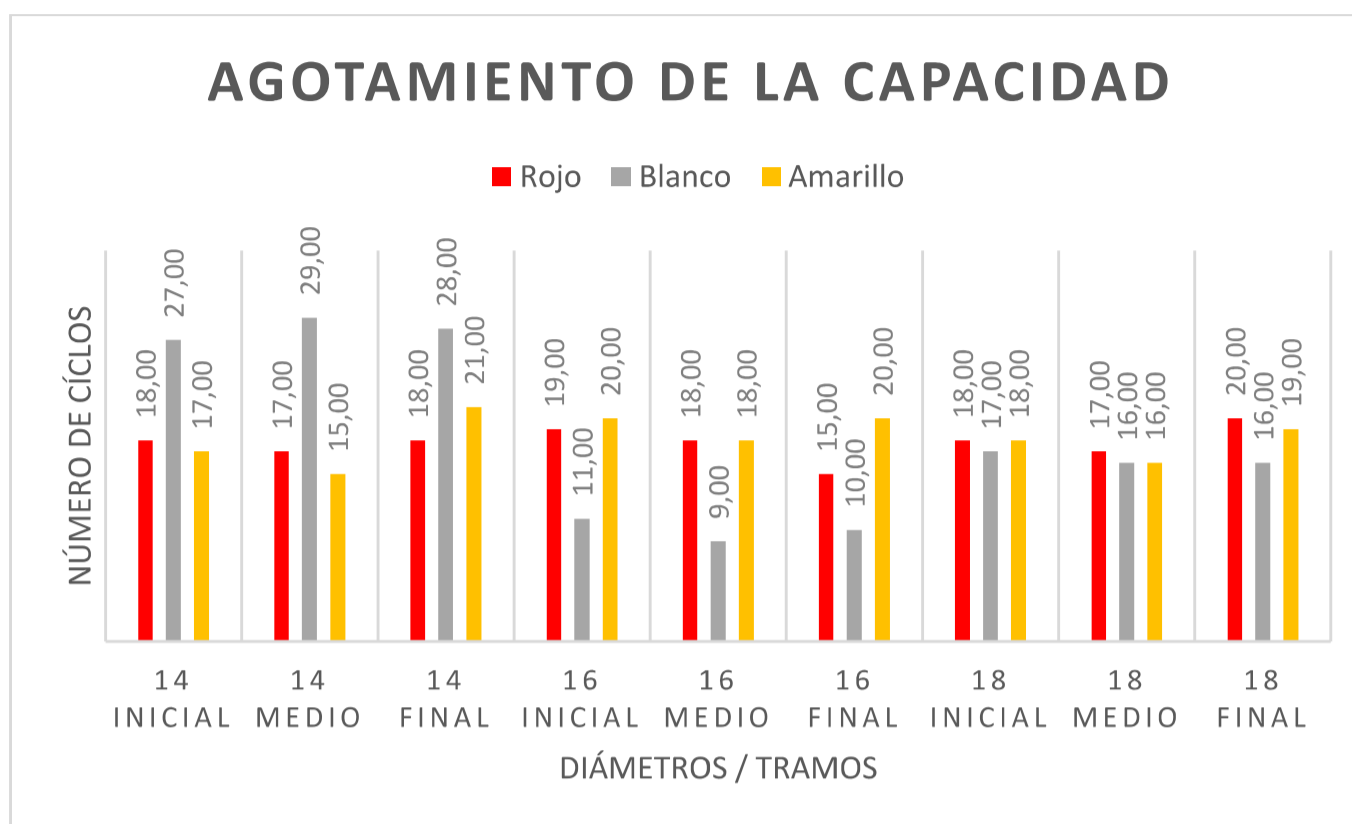
<i>Ciclos - agotamiento</i>	
Media	18,037
Error típico	0,888
Mediana	18,000
Moda	18,000
Desviación estándar	4,612
Varianza de la muestra	21,268
Curtosis	1,377
Coefficiente de asimetría	0,587
Rango	20,000
Mínimo	9,000
Máximo	29,000
Suma	487,000
Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Con un promedio de agotamiento de capacidad de 21, 17 y 15 ciclos para las varillas de 14, 16 y 18 milímetros de diámetro respectivamente, se determina que a menor diámetro mayor capacidad de ciclos de carga resiste el acero de refuerzo A706, bajo el mismo estado tensional.

Siendo la marca rojo, la que tiene una menor variación de resultados con un 6.3% a lo largo de la varilla comercial de 12 metros, sin embargo esta marca es la que menor cantidad de ciclos de aplicación de carga resiste con un promedio de 17 ciclos de carga.

La marca amarillo tiene una variación de ciclos de carga de alrededor del 8.7% a lo largo de la varilla comercial, agotando su capacidad en 18 ciclos de carga. La marca blanco tiene una variación de ciclos de agotamiento de un 15%, agotando su capacidad en un promedio de 18 ciclos, Figura 5.24. Siendo la marca amarillo la que tiene un mejor comportamiento bajo la acción de cargas cíclicas, agotando su capacidad en 18 ciclos promedio.

FIGURA 5.24: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas estándar

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.1.5 Inicio y propagación de fractura

El inicio y propagación de fractura está estrechamente relacionado con la geometría del material y el proceso de conformado de las varillas, en las probetas estándar se han identificado dos modos de falla, el primero, por el material, Figura 5.25, el segundo, por la base del resalte, Figura 5.26.

FIGURA 5.25: Fractura por el material

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

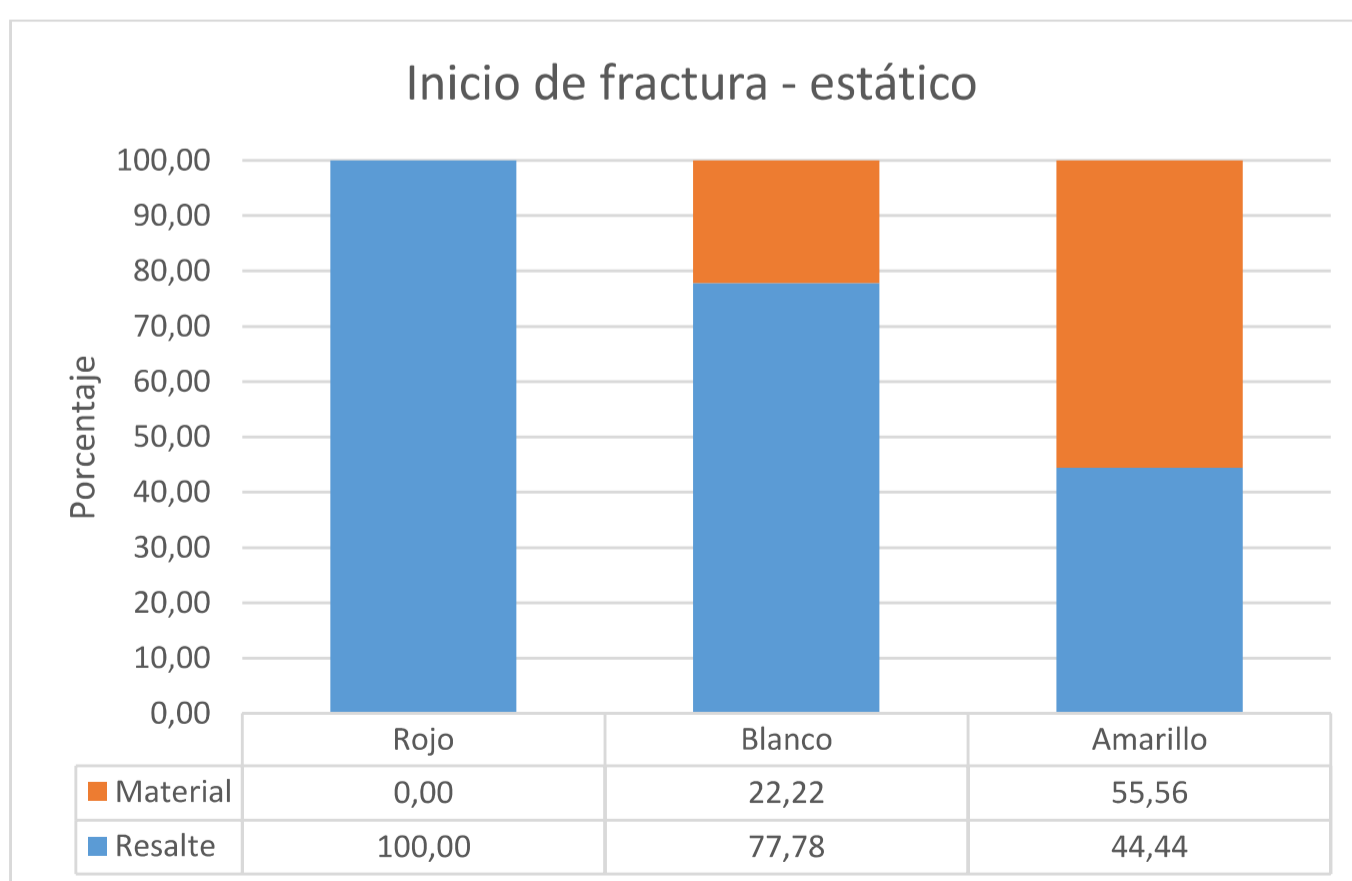
FIGURA 5.26: Fractura en el resalte

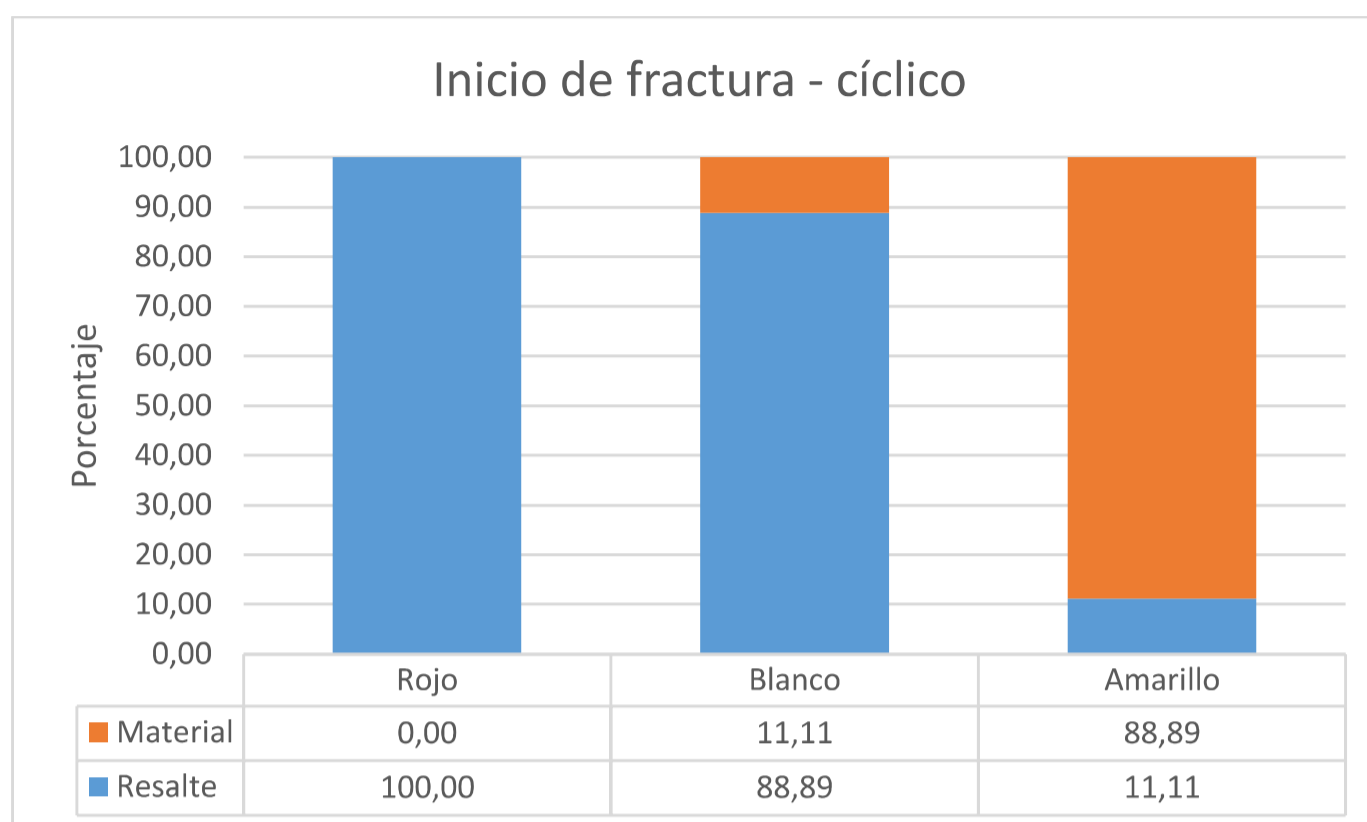
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La marca rojo tanto en el ensayo estático como cíclico, muestra que su inicio de fractura es por la base de los resaltes. Figura 5.37 y 5.38.

Al analizar la marca blanco se determina que un 77% y 88% su inicio de fractura es por la base de los resaltes, en ensayo estático y cíclico respectivamente.

La marca amarillo tiende a facturarse por el material.

FIGURA 5.27: Inicio de fractura – probetas estándar



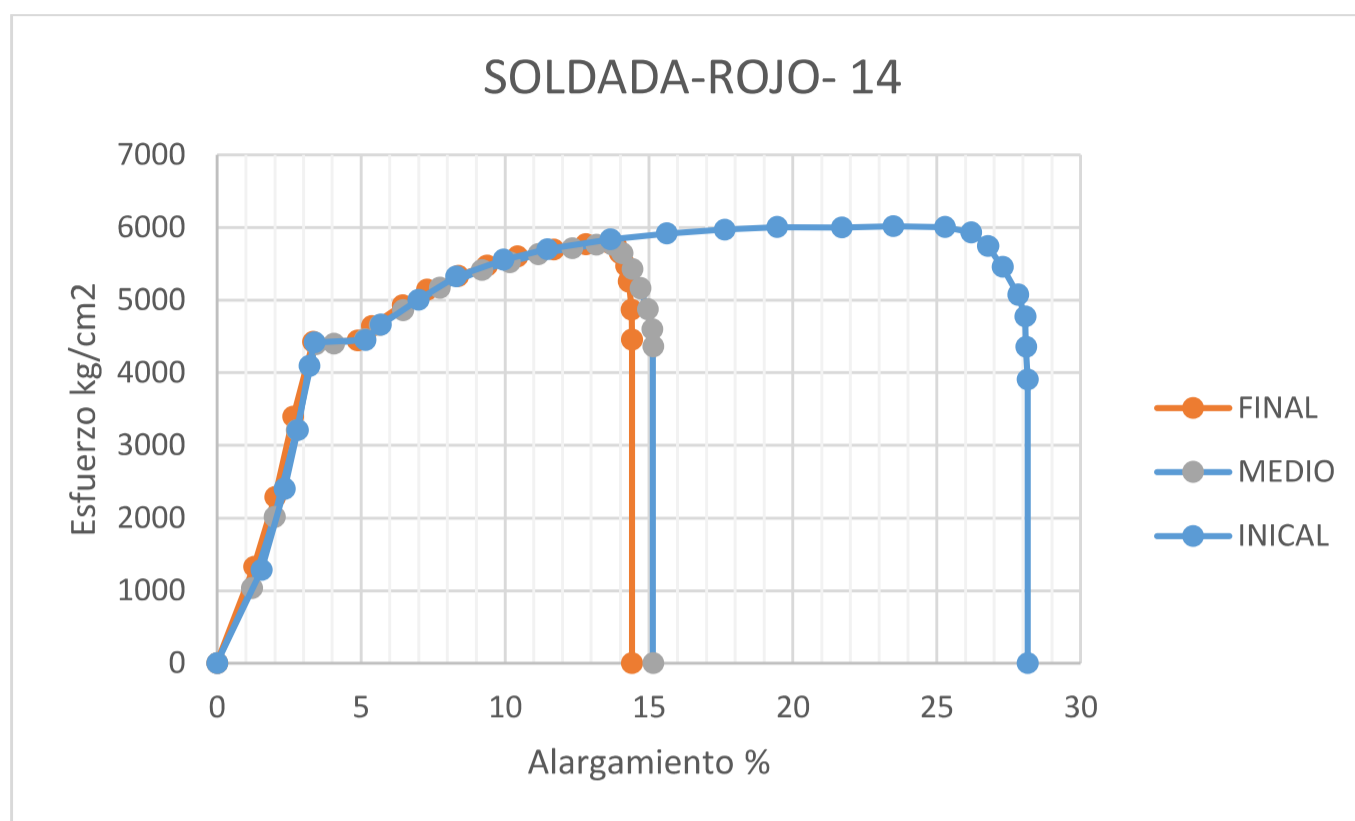
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Concluyendo que cada marca tiene su propio modo de inicio y propagación de fractura, debido a que sus procesos de fabricación son diferentes, siendo lo más ideal que su zona de fractura sea en el material.

5.1.2 PROBETAS SOLDADAS

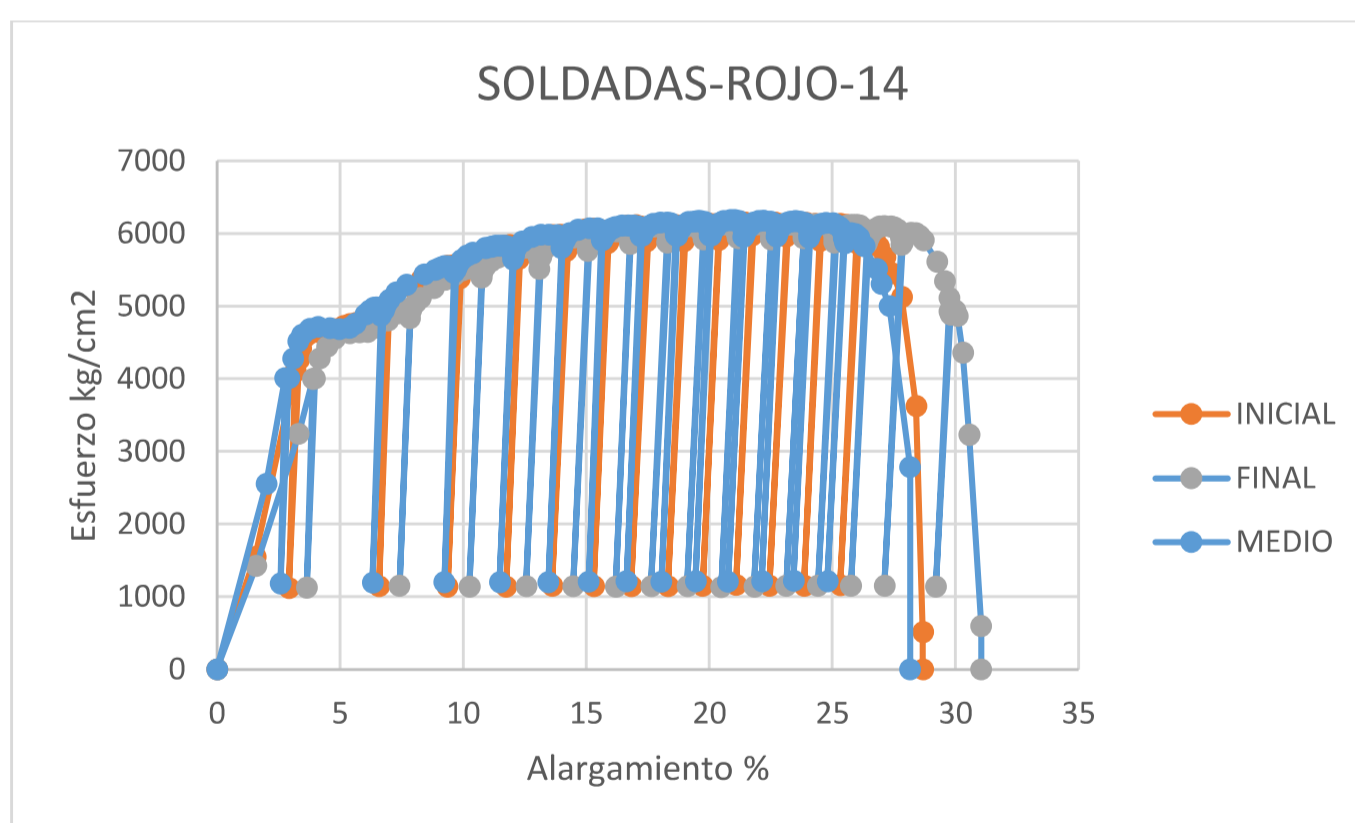
Los resultados de los ensayos mecánicos en probetas soldadas se muestran en las figuras 5.28 a la 5.45.

FIGURA 5.28: Ensayo estático probeta soldada, marca rojo, Ø 14mm



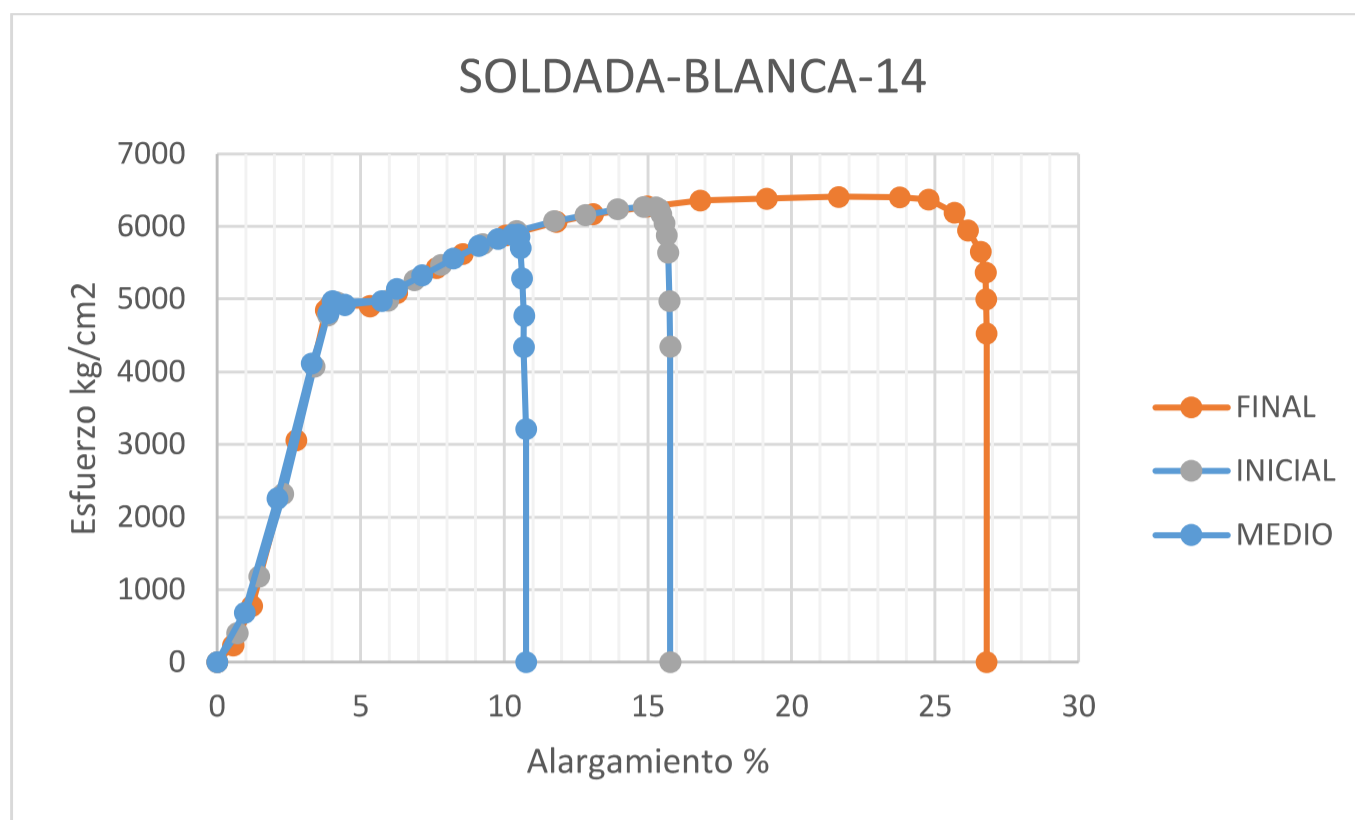
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.29: Ensayo cíclico probeta soldada, marca rojo, Ø 14mm



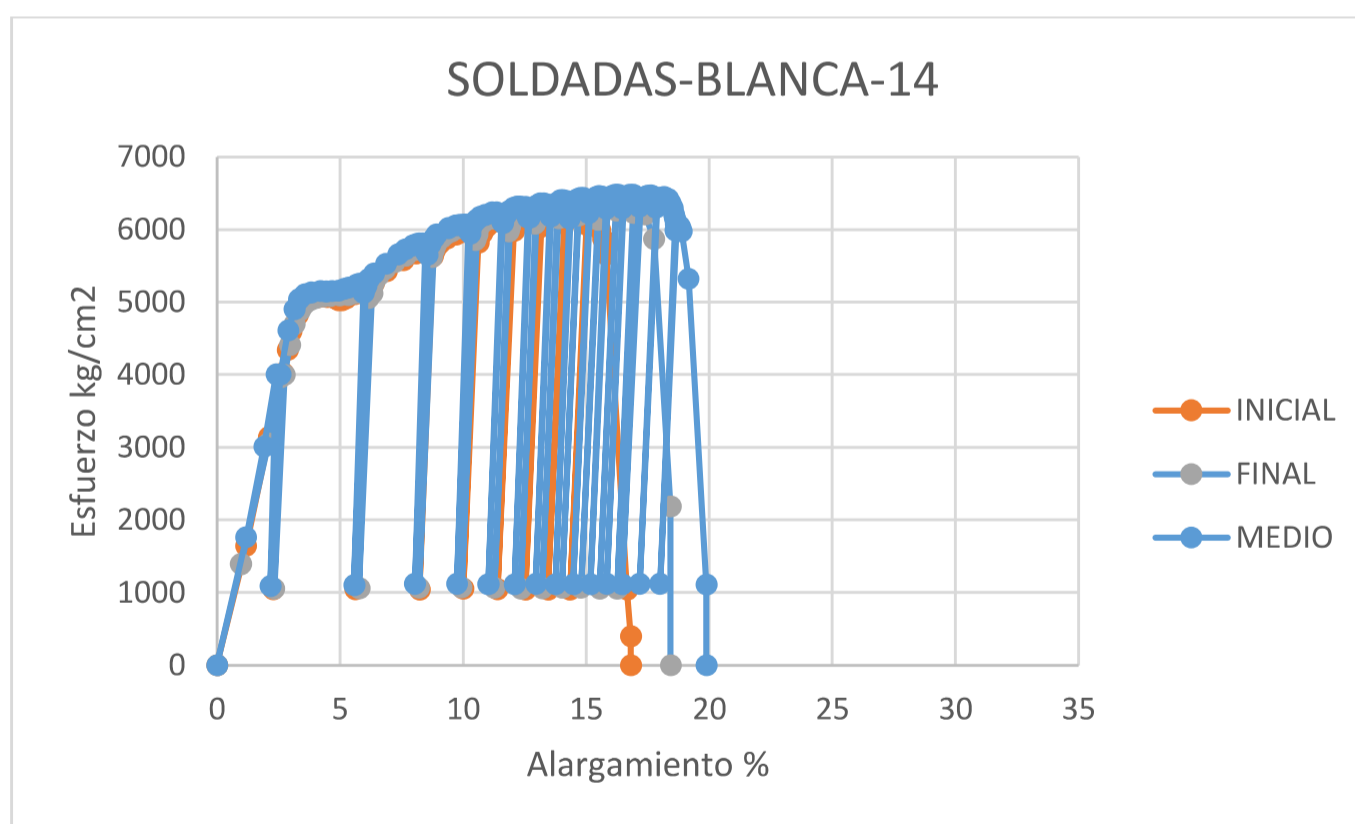
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.30: Ensayo estático probeta soldada, marca blando, Ø 14mm



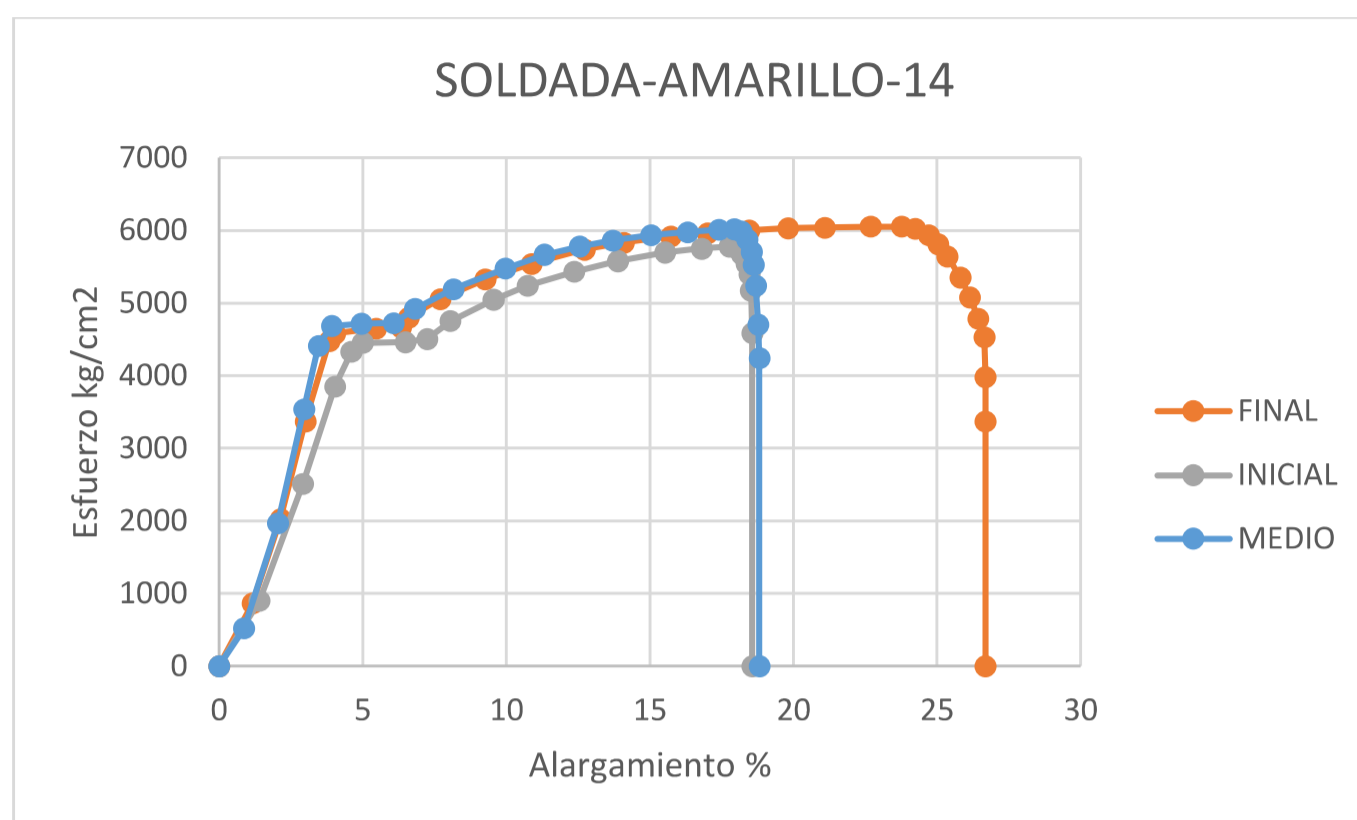
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.31: Ensayo cíclico probeta soldada, marca blanco, Ø 14mm



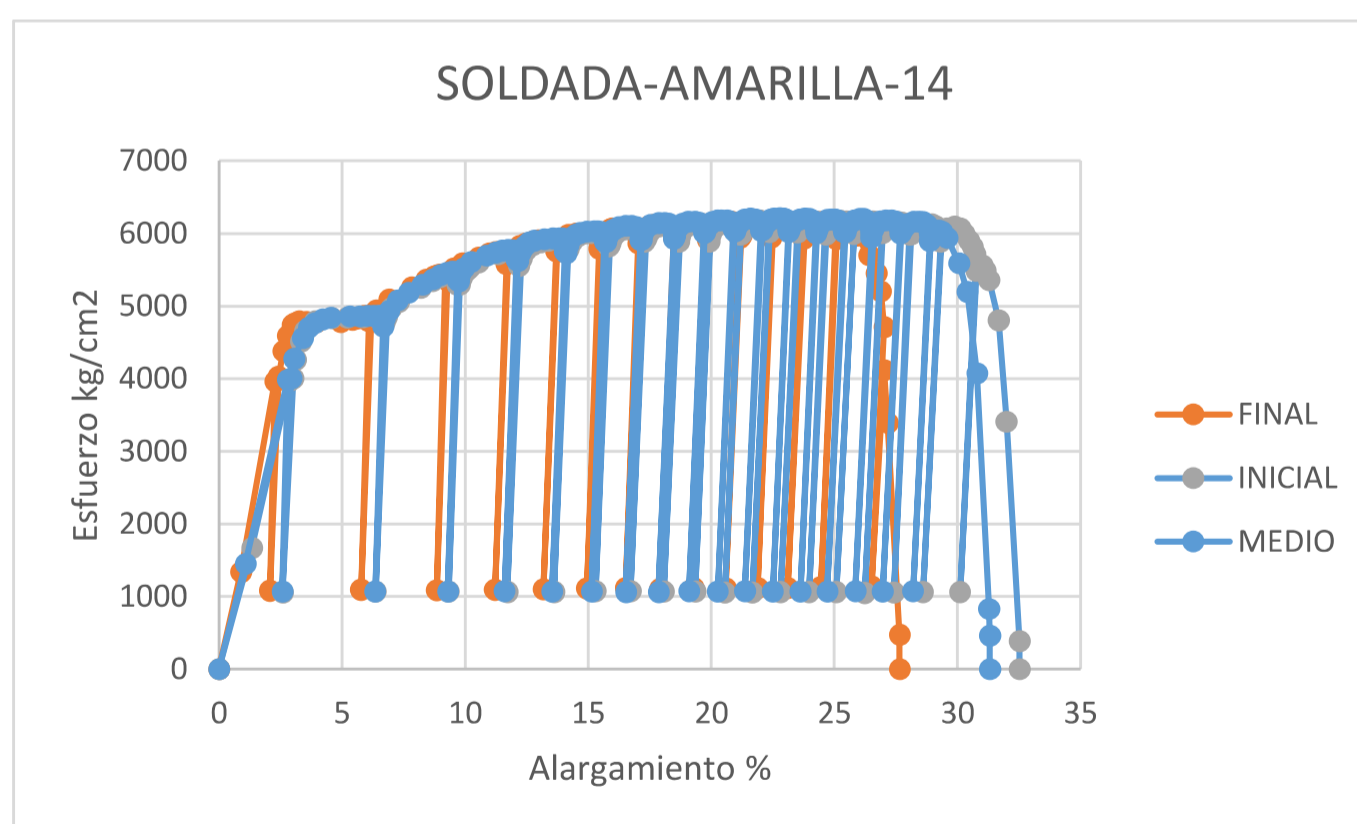
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.32: Ensayo estático probeta soldada, marca amarillo, Ø 14mm



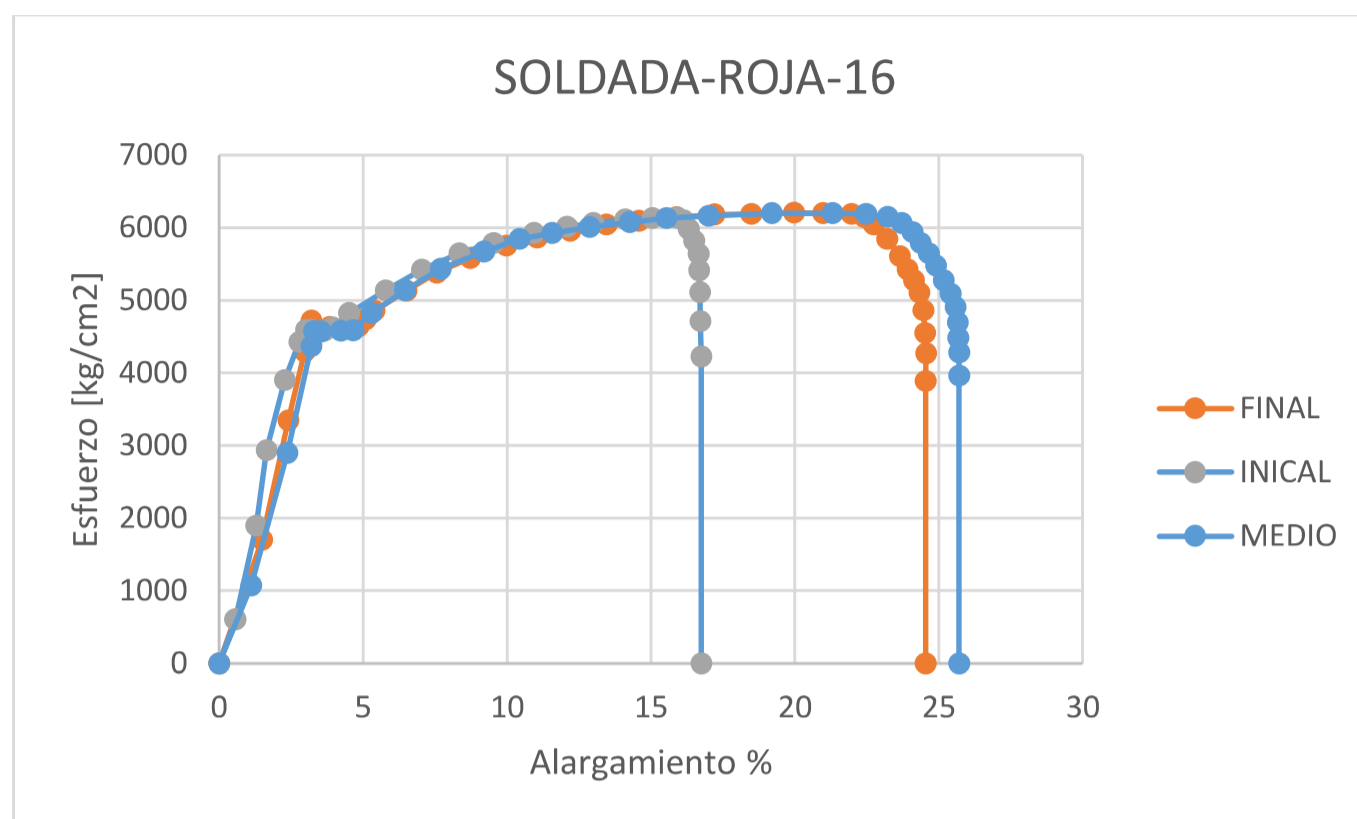
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.33: Ensayo cíclico probeta soldada, marca amarillo, Ø 14mm



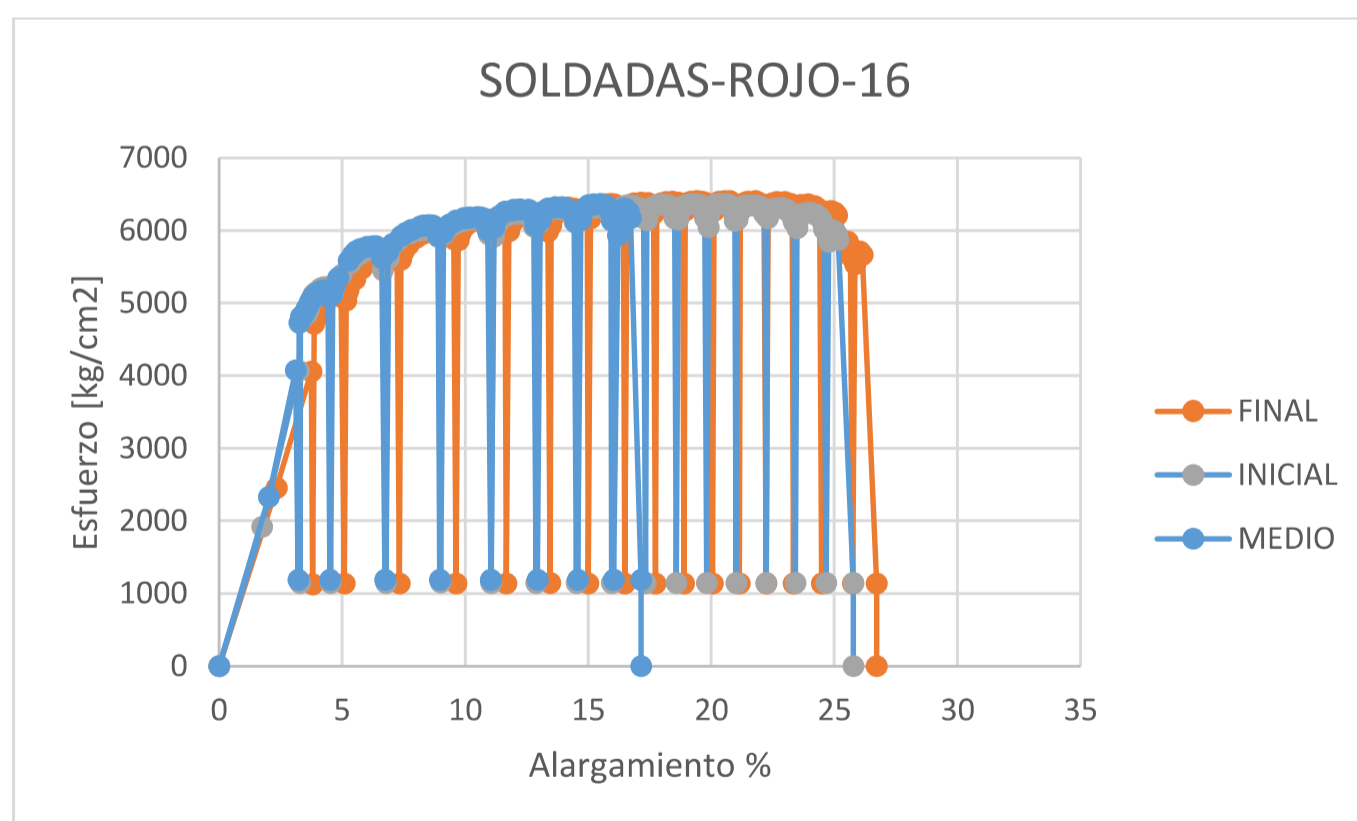
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.34: Ensayo estático probeta soldada, marca rojo, Ø 16mm



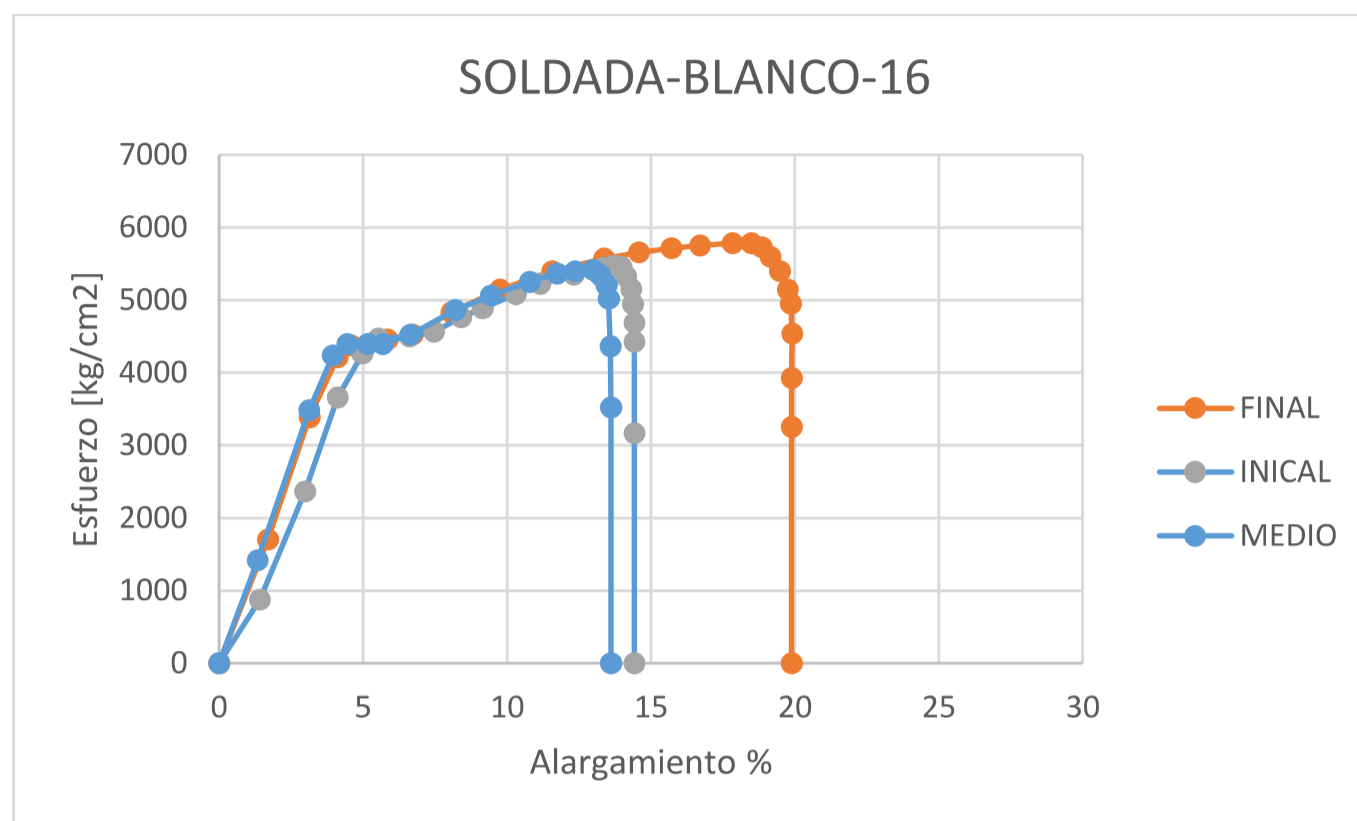
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.35: Ensayo cíclico probeta soldada, marca rojo, Ø 16mm



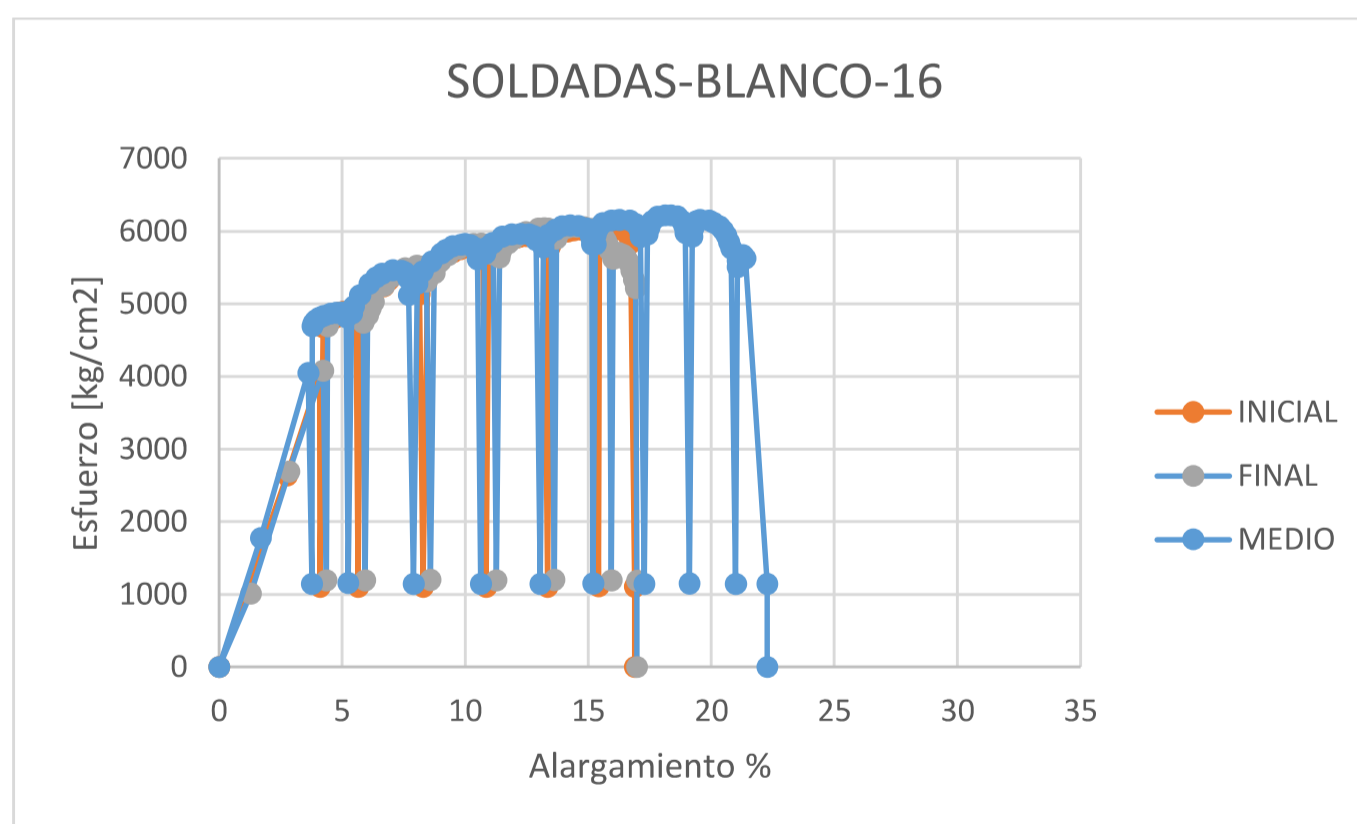
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.36: Ensayo estático probeta soldada, marca blanco, Ø 16mm



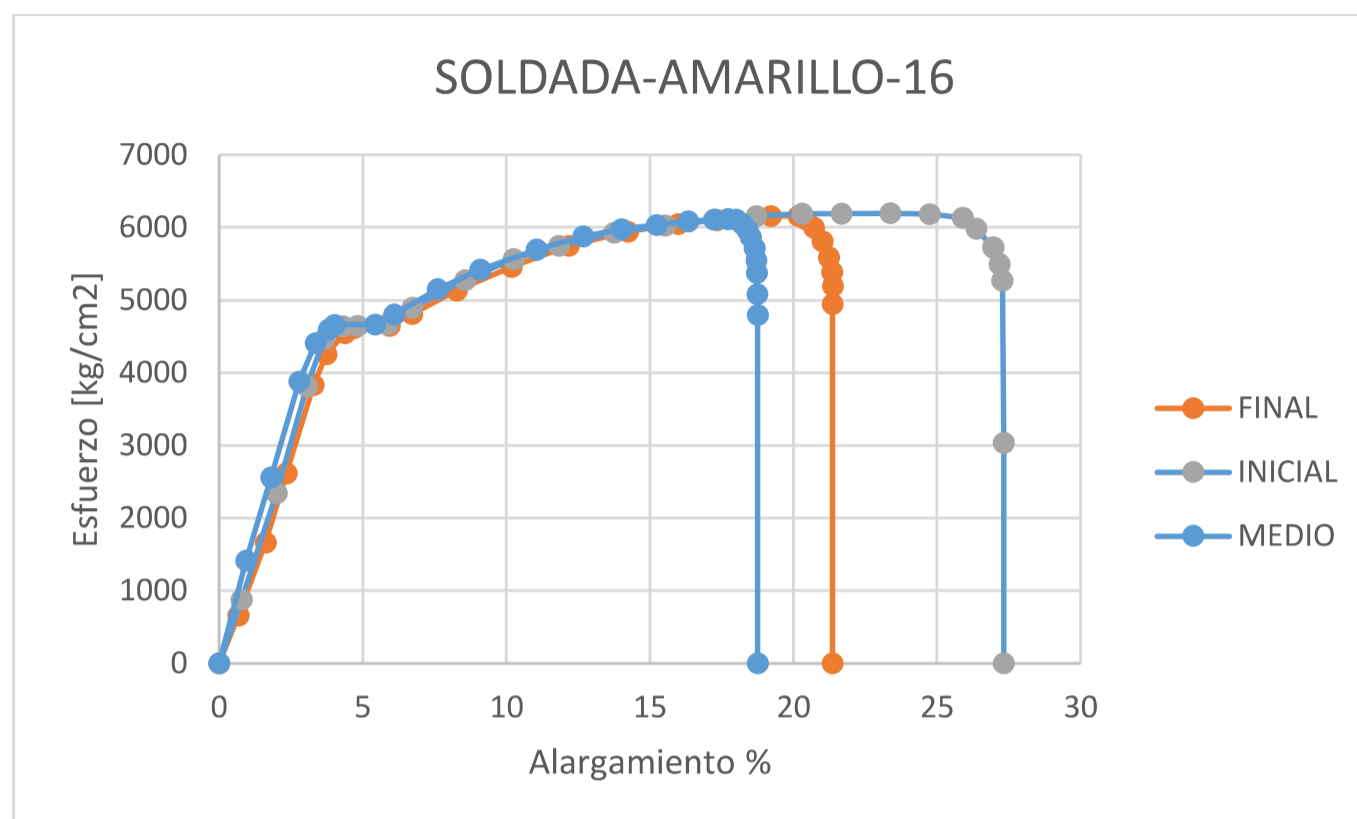
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.37: Ensayo cíclico probeta soldada, marca blanco, Ø 16mm



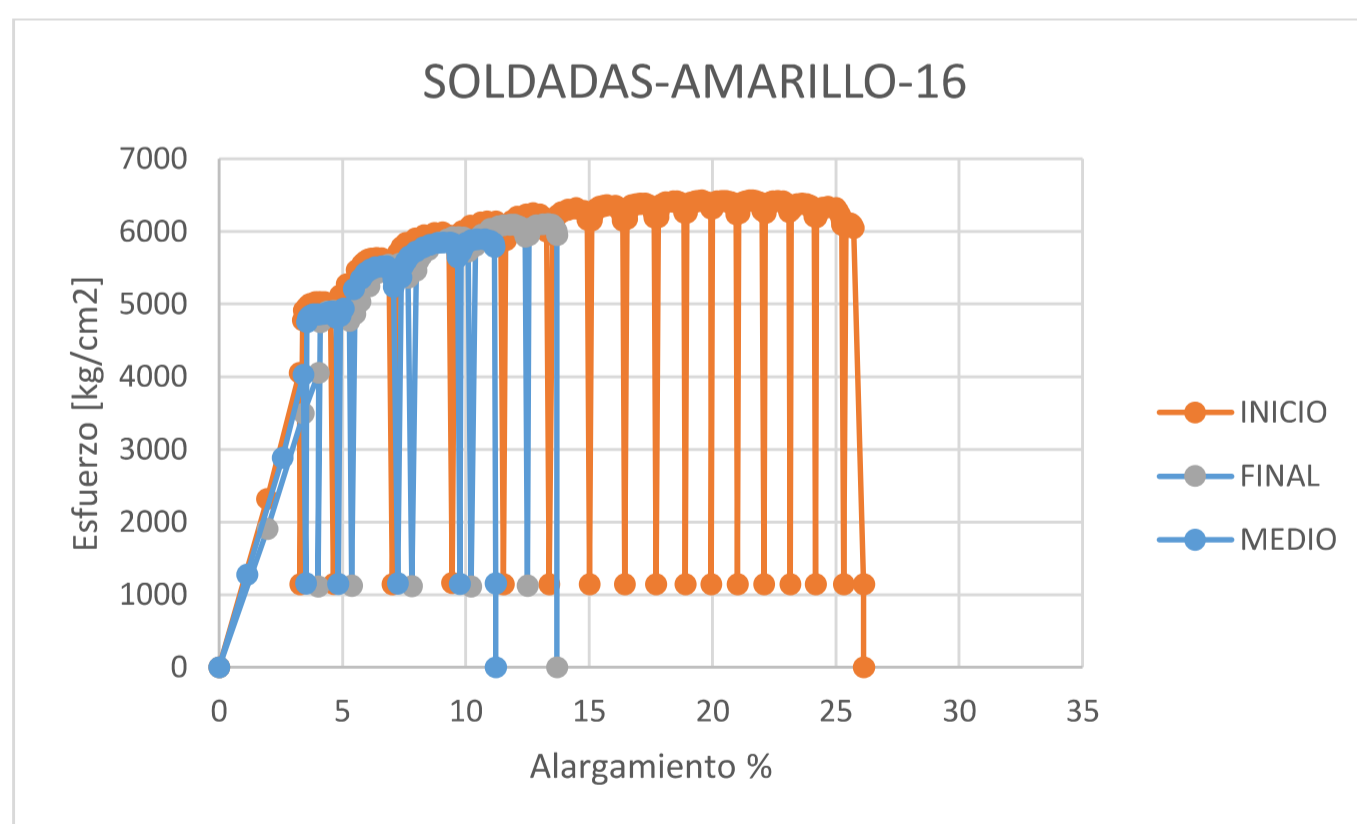
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.38: Ensayo estático probeta soldada, marca amarillo, Ø 16mm



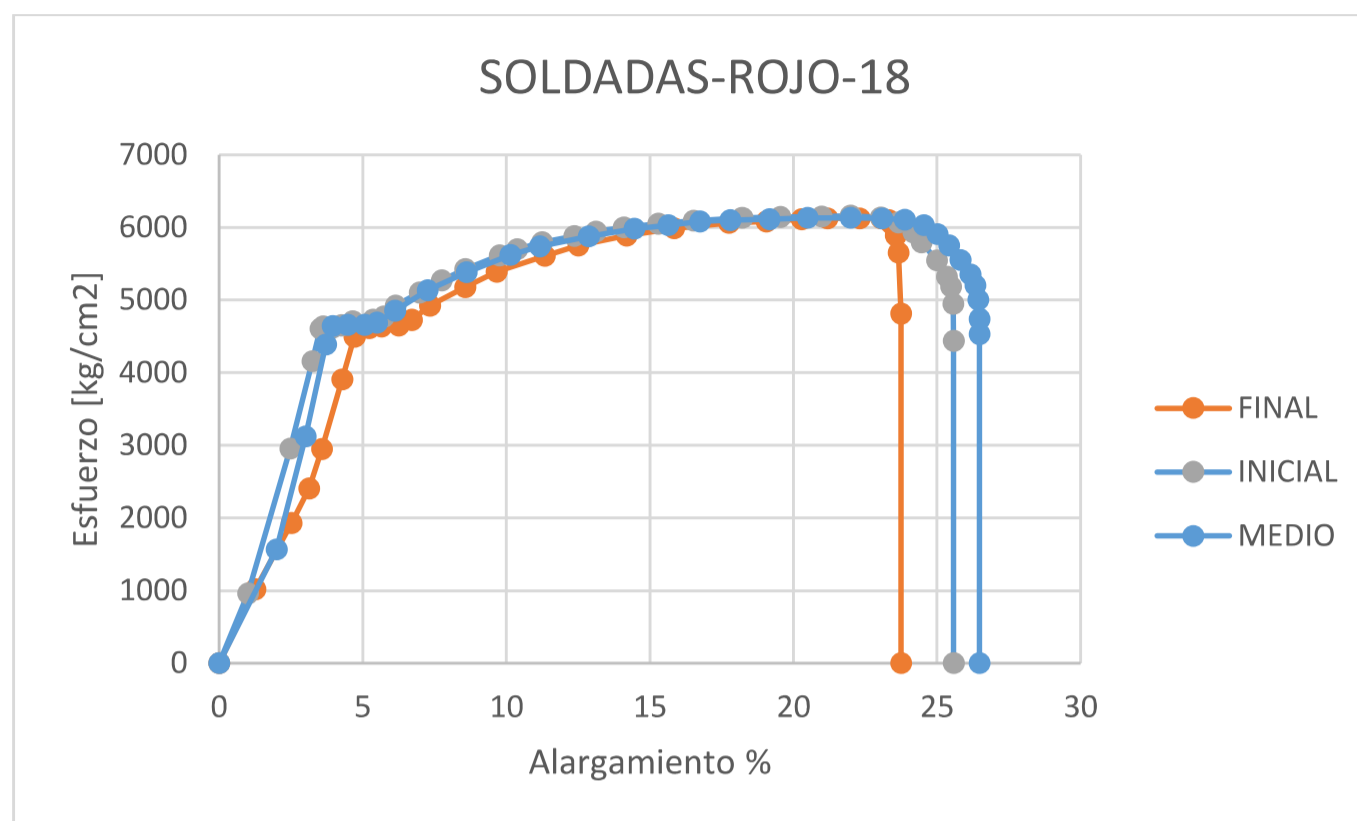
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.39: Ensayo cíclico probeta soldada, marca amarillo, Ø 16mm



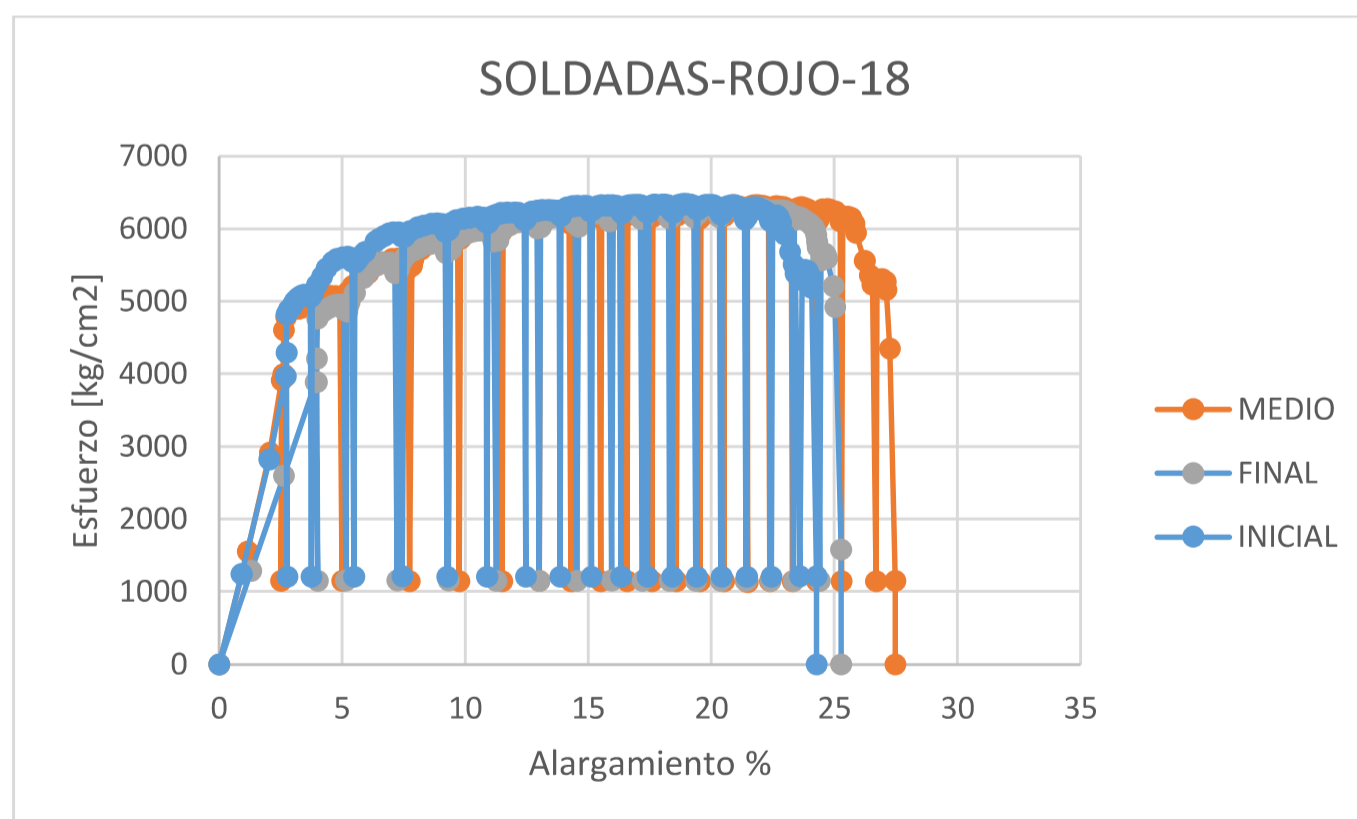
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.40: Ensayo estático probeta soldada, marca rojo, Ø 18mm



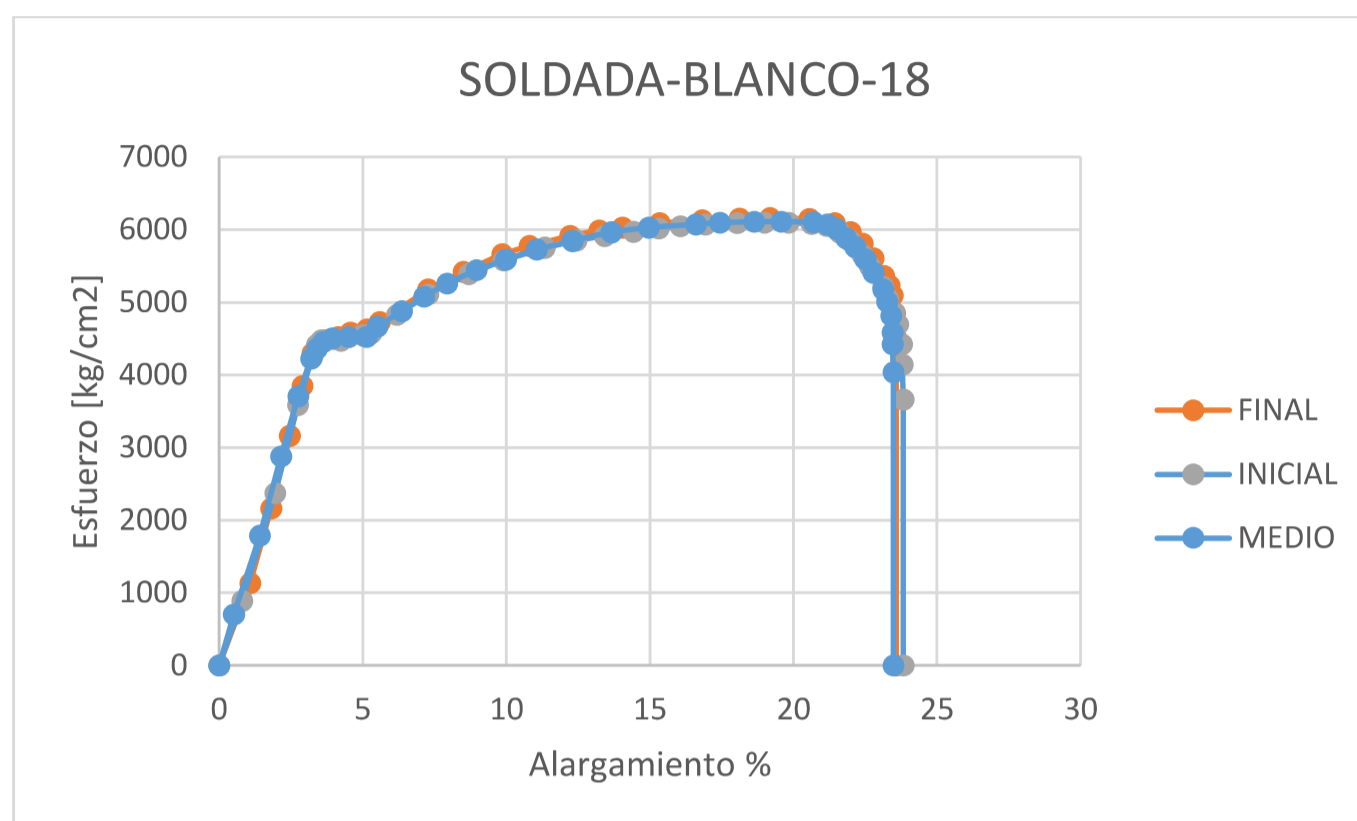
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.41: Ensayo cíclico probeta soldada, marca rojo, Ø 18mm



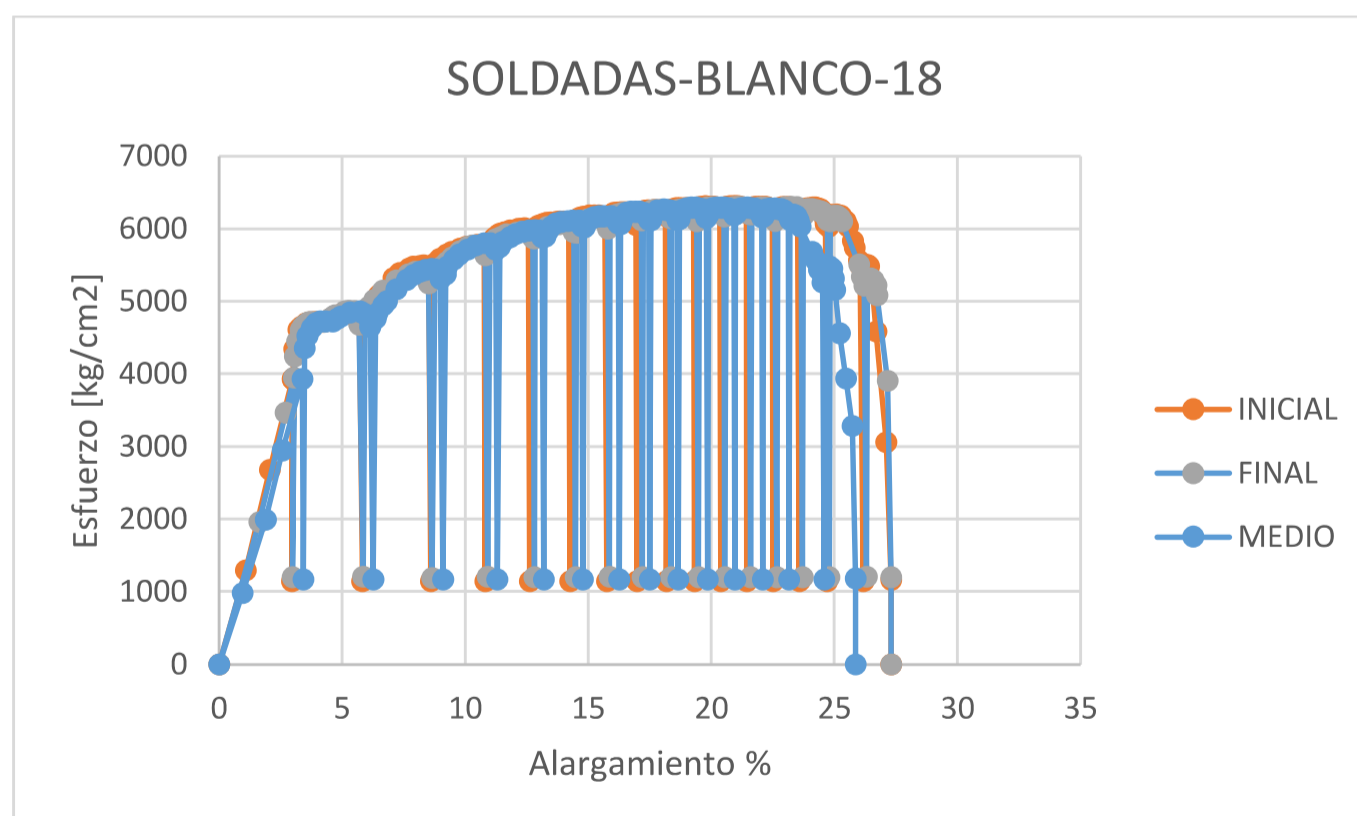
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.42: Ensayo estático probeta soldada, marca blanco, Ø 18mm



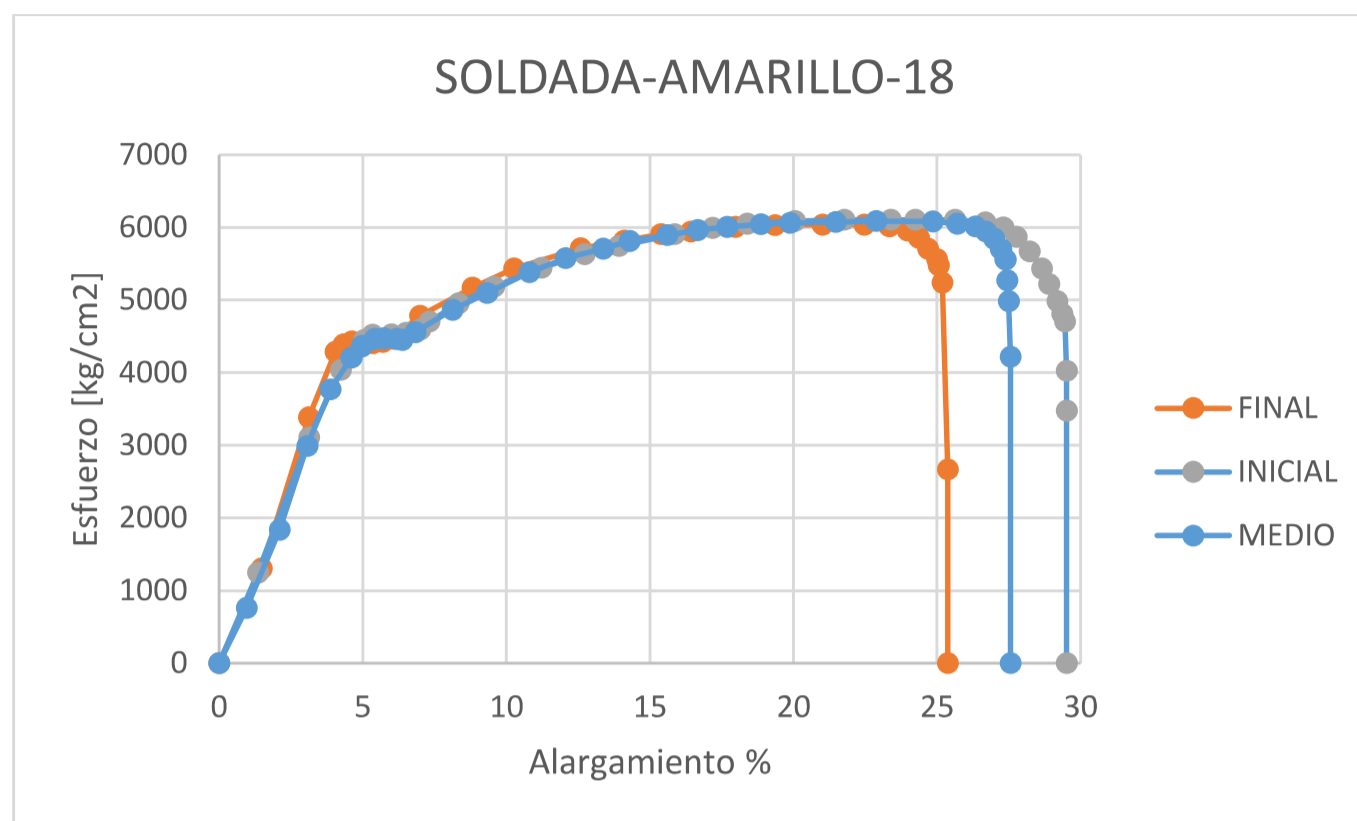
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.43: Ensayo cíclico probeta soldada, marca blanco, Ø 18mm



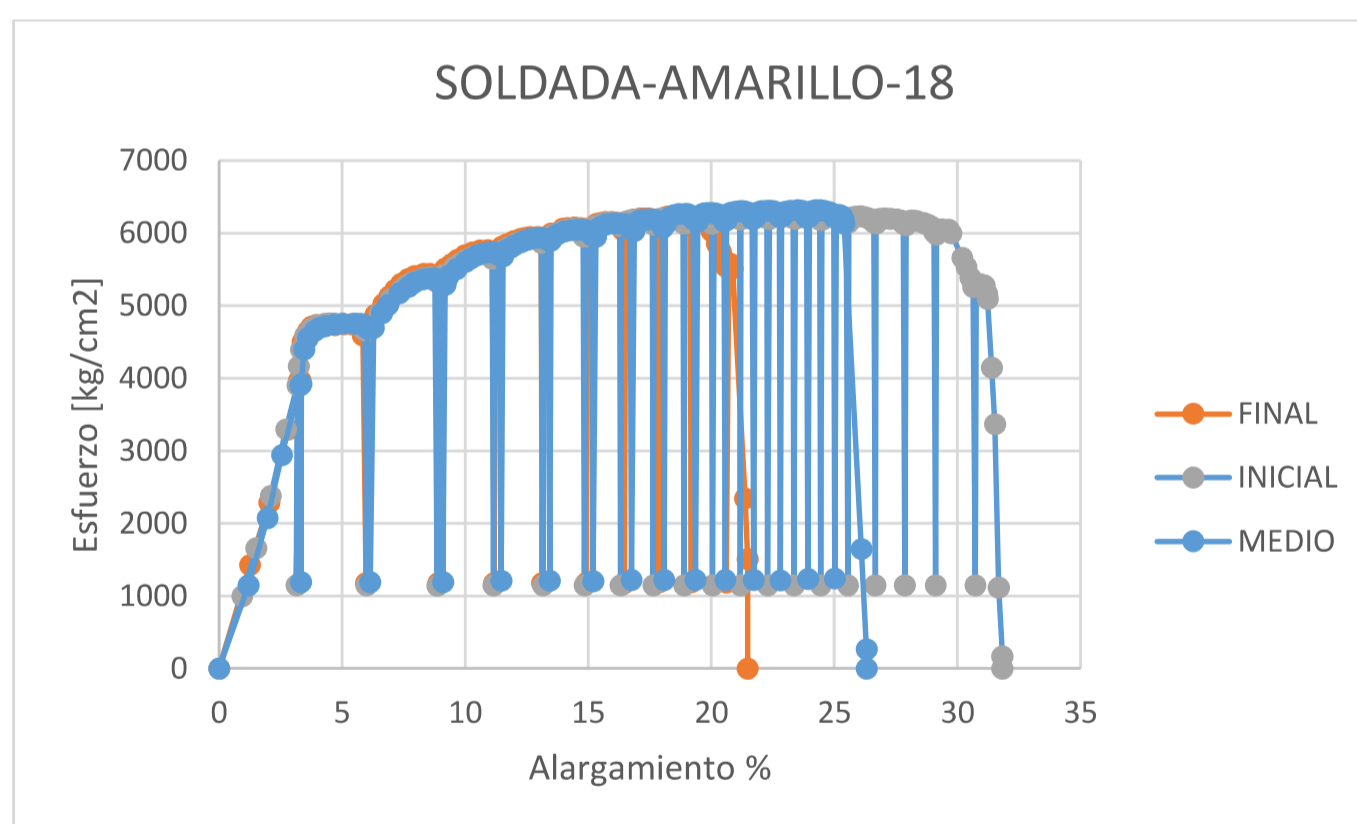
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.44: Ensayo estático probeta soldada, marca amarillo, Ø 18mm



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.45: Ensayo cíclico probeta soldada, marca amarillo, Ø 18mm



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.2.1 Resistencia mecánica

El límite de fluencia del 100% probetas soldadas, cumple satisfactoriamente con lo establecido en la norma (INEN-2167, 2011), mientras que en un 96% de cumplen con la resistencia última a la tracción. Tabla 5.5.

Dos de las 54 probetas soldadas, no cumplen con la resistencia última a la tracción, Figura 5.47. El 96% de las probetas soldadas cumplen satisfactoriamente con lo establecido en la norma (INEN-2167, 2011). Las probetas soldadas cumplen fácilmente con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos por las M.E.M. (Mínimas Especificaciones del Material). Siendo aptas para su uso en diseños que incluyen elementos de hormigón armado, previo a un chequeo por ensayos no destructivos a la soldadura.

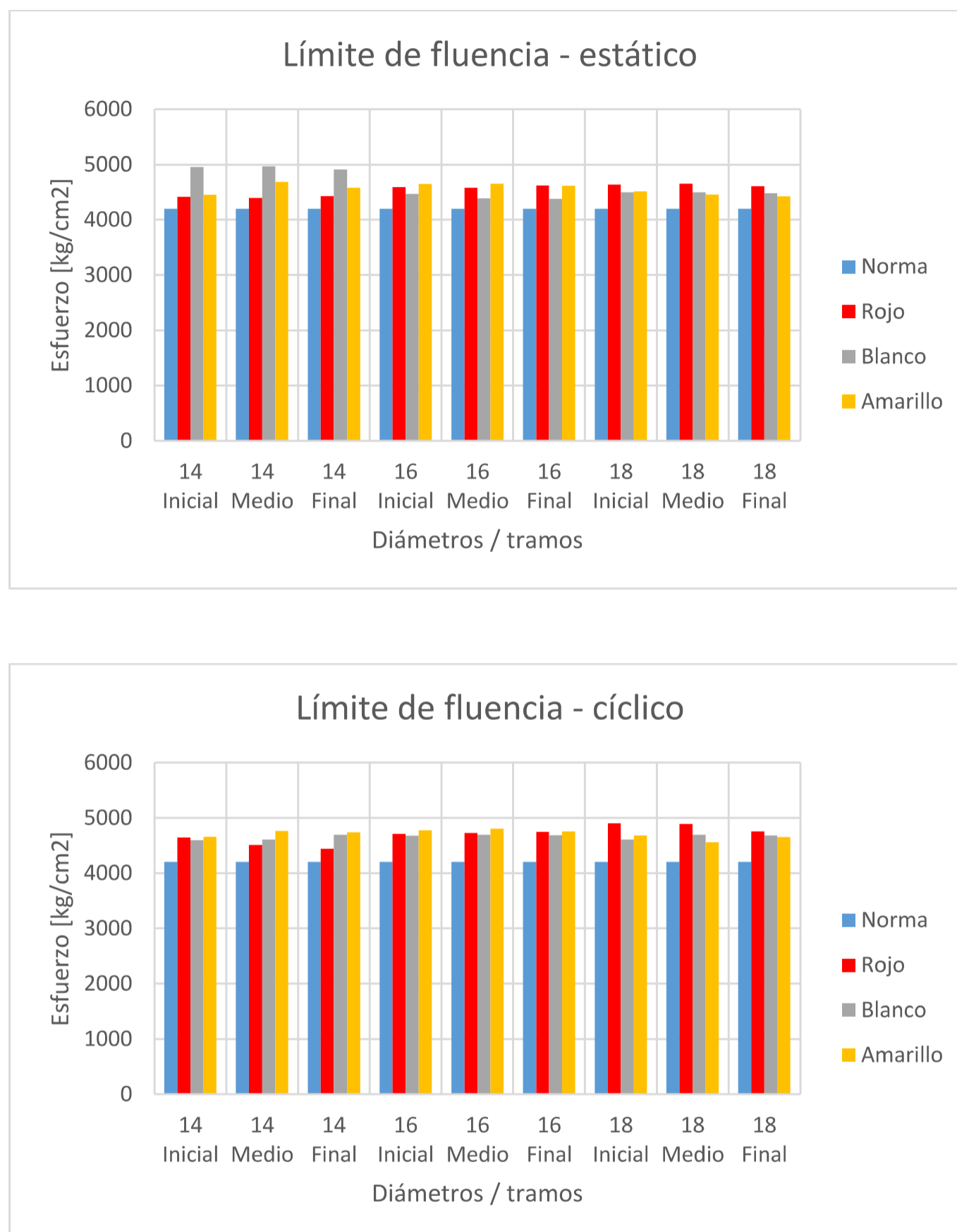
TABLA 5.5: Propiedades mecánicas probetas soldadas

<i>Límite de fluencia - estático</i>		<i>Resistencia última a tracción - estático</i>	
Media	4576,677	Media	6024,527
Error típico	31,357	Error típico	44,241
Mediana	4579,782	Mediana	6108,480
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	162,934	Desviación estándar	229,884
Varianza de la muestra	26547,582	Varianza de la muestra	52846,501
Curtosis	1,014	Curtosis	1,573
Coefficiente de asimetría	1,152	Coefficiente de asimetría	-1,258
Rango	594,238	Rango	998,381
Mínimo	4376,555	Mínimo	5410,795
Máximo	4970,793	Máximo	6409,176
Suma	123570,285	Suma	162662,219
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

<i>Límite de fluencia - cíclico</i>		<i>Resistencia última a la tracción- cíclico</i>	
Media	4579,040	Media	6089,772
Error típico	29,995	Error típico	28,722
Mediana	4584,915	Mediana	6066,600
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	155,857	Desviación estándar	149,242
Varianza de la muestra	24291,307	Varianza de la muestra	22273,274
Curtosis	0,851	Curtosis	0,219
Coefficiente de asimetría	0,632	Coefficiente de asimetría	0,612
Rango	651,760	Rango	557,836
Mínimo	4284,008	Mínimo	5871,083
Máximo	4935,768	Máximo	6428,920
Suma	123634,092	Suma	164423,845
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

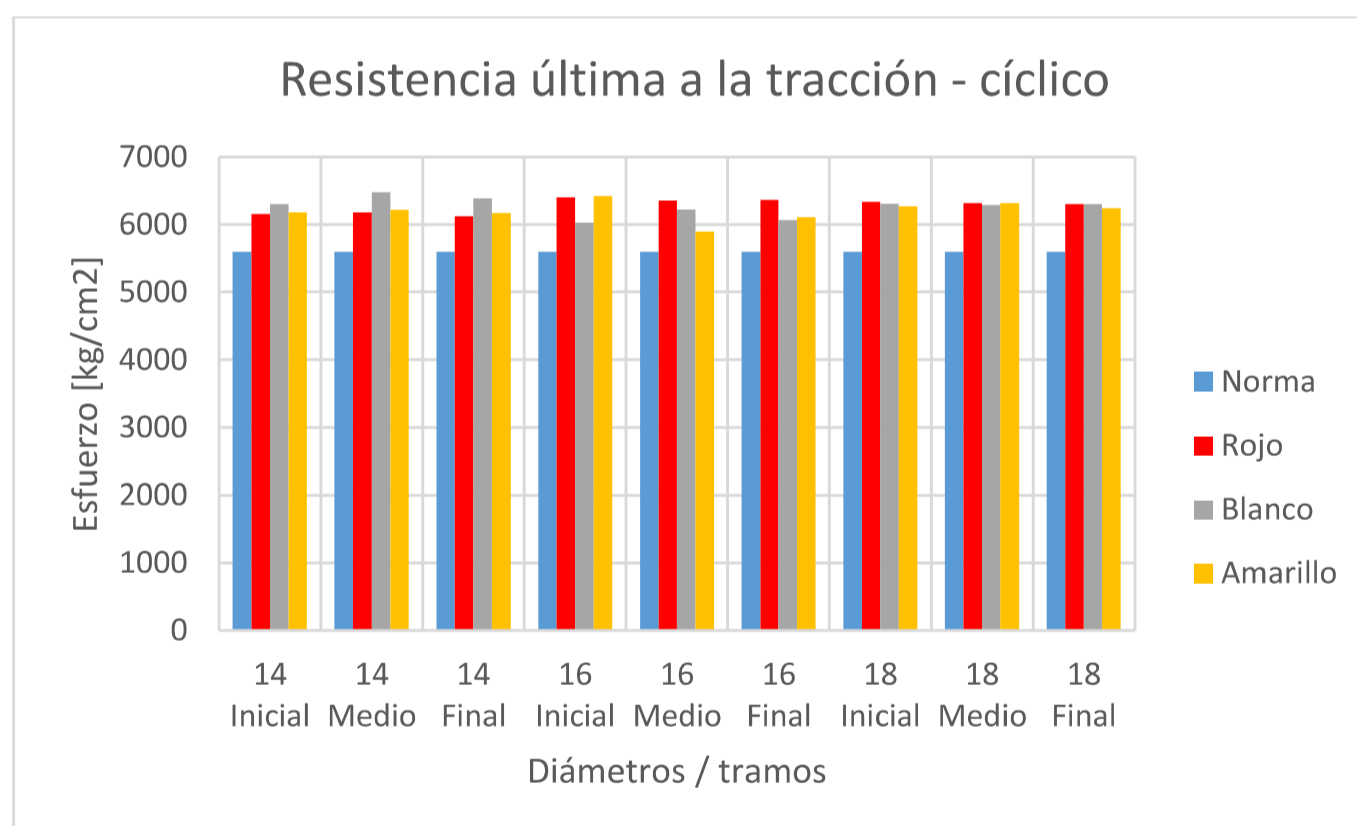
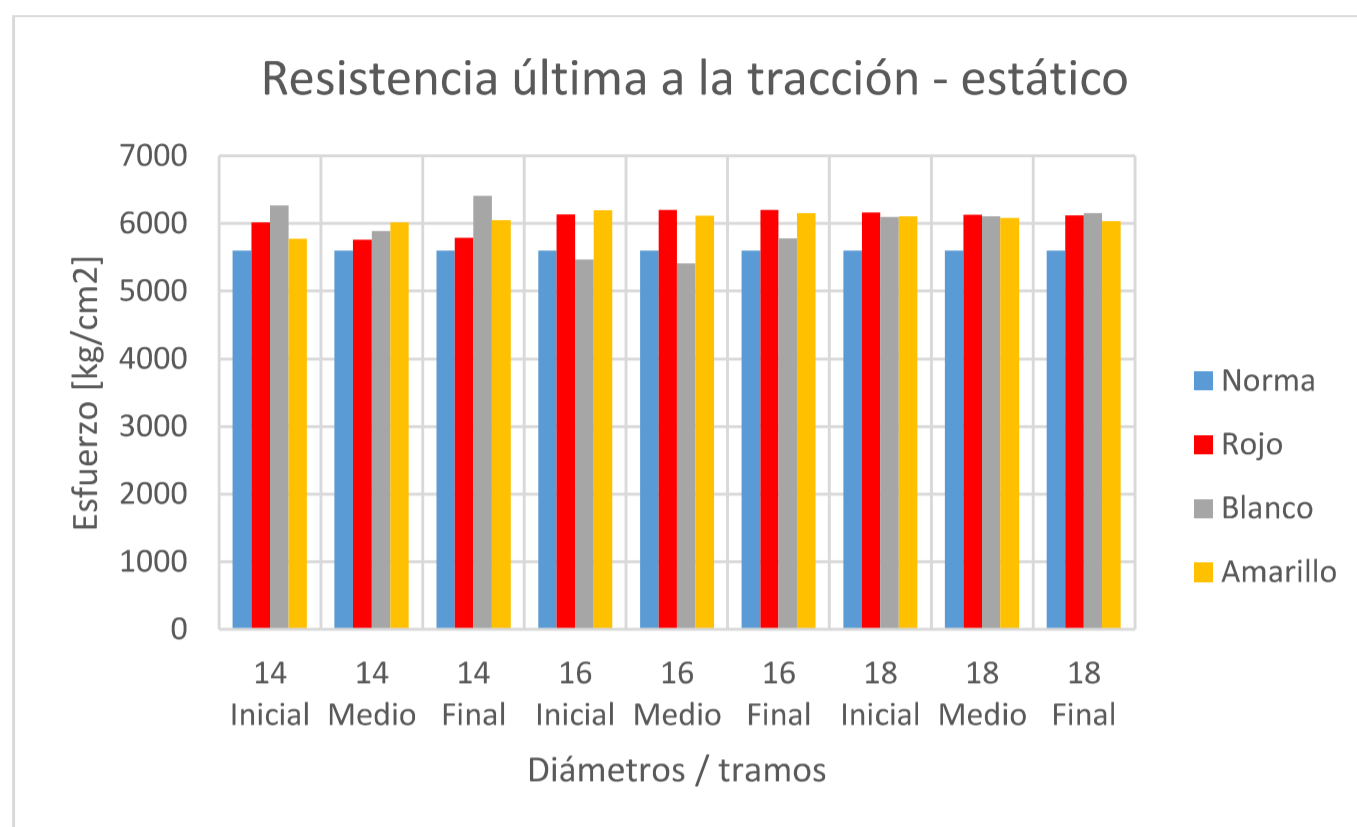
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.46: Límite de fluencia probetas soldadas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.47: Resistencia última a la tracción probetas soldadas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.2.2 Elongación y contracción

Las probetas soldadas si bien cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica, estas son menos dúctiles en comparación con las estándar, en un 25% en promedio. Tabla 5.6.

TABLA 5.6: Elongación y contracción – probetas soldadas

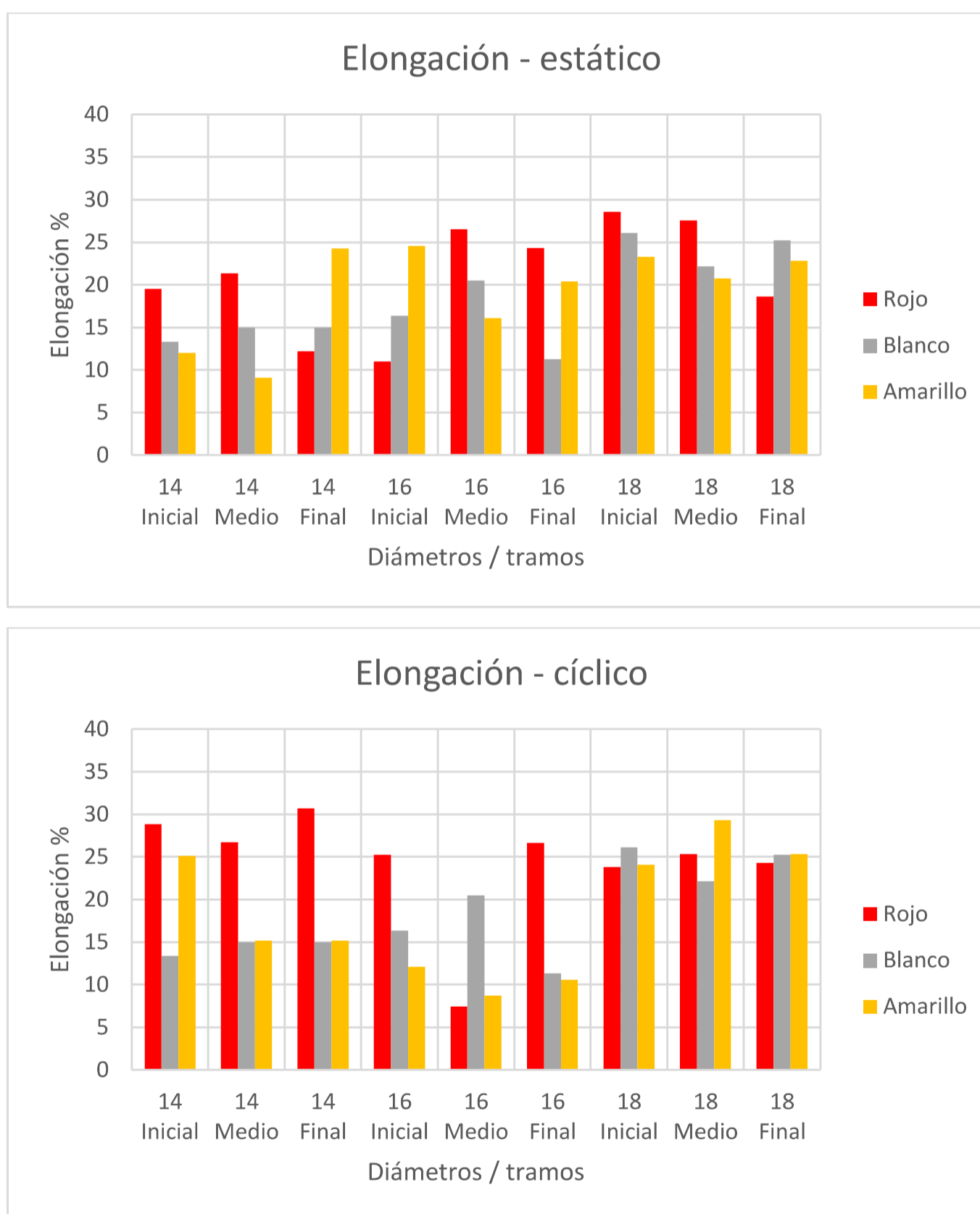
<i>Elongación % - estático</i>		<i>Contracción % - estático</i>	
Media	19,6422	Media	52,565
Error típico	1,3075	Error típico	1,187
Mediana	20,7444	Mediana	53,760
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	6,7940	Desviación estándar	6,170
Varianza de la muestra	46,1583	Varianza de la muestra	38,068
Curtosis	-1,1088	Curtosis	0,426
Coeficiente de asimetría	-0,2606	Coeficiente de asimetría	-1,058
Rango	22,7653	Rango	23,245
Mínimo	9,0125	Mínimo	37,095
Máximo	31,7778	Máximo	60,340
Suma	530,3397	Suma	1419,250
Cuenta	27,0000	Cuenta	27,000

<i>Elongación % - cíclico</i>		<i>Contracción % - cíclico</i>	
Media	25,676	Media	48,513
Error típico	0,655	Error típico	1,332
Mediana	25,386	Mediana	50,766
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	3,404	Desviación estándar	6,922
Varianza de la muestra	11,588	Varianza de la muestra	47,911
Curtosis	0,019	Curtosis	-0,456
Coeficiente de asimetría	0,398	Coeficiente de asimetría	-0,842
Rango	13,916	Rango	23,780
Mínimo	18,956	Mínimo	34,525
Máximo	32,871	Máximo	58,305
Suma	693,251	Suma	1309,844
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Siendo las probetas con menor diámetro las que poseen menor elongación, con un 15%, 19% y 23% que corresponden a la elongación promedio para las varillas de 14, 16 y 18 milímetros de diámetro respectivamente, Figura 5.48. Corroborando lo mencionado por el soldador certificado, quien expresó dificultad en el proceso de soldadura de probetas delgadas. Figura 5.48.

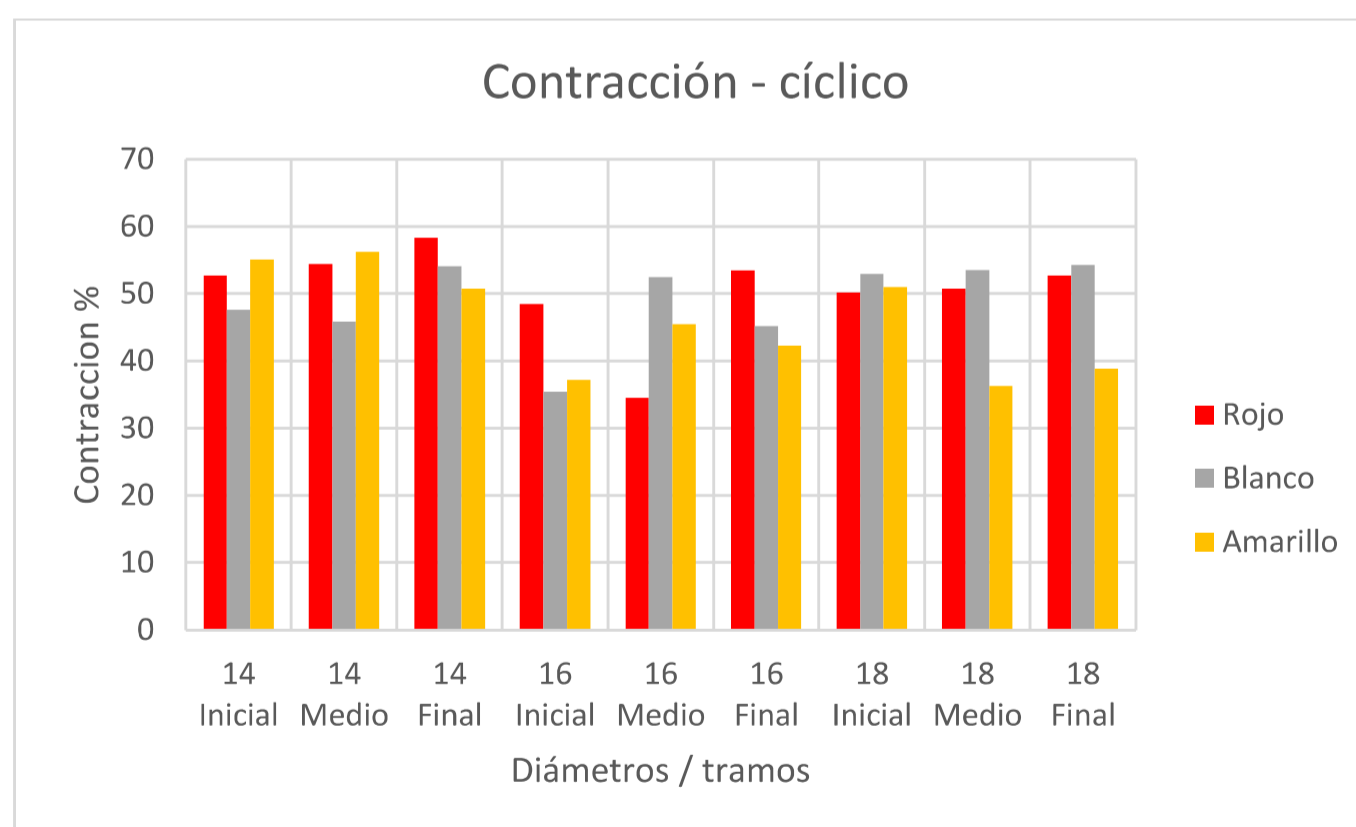
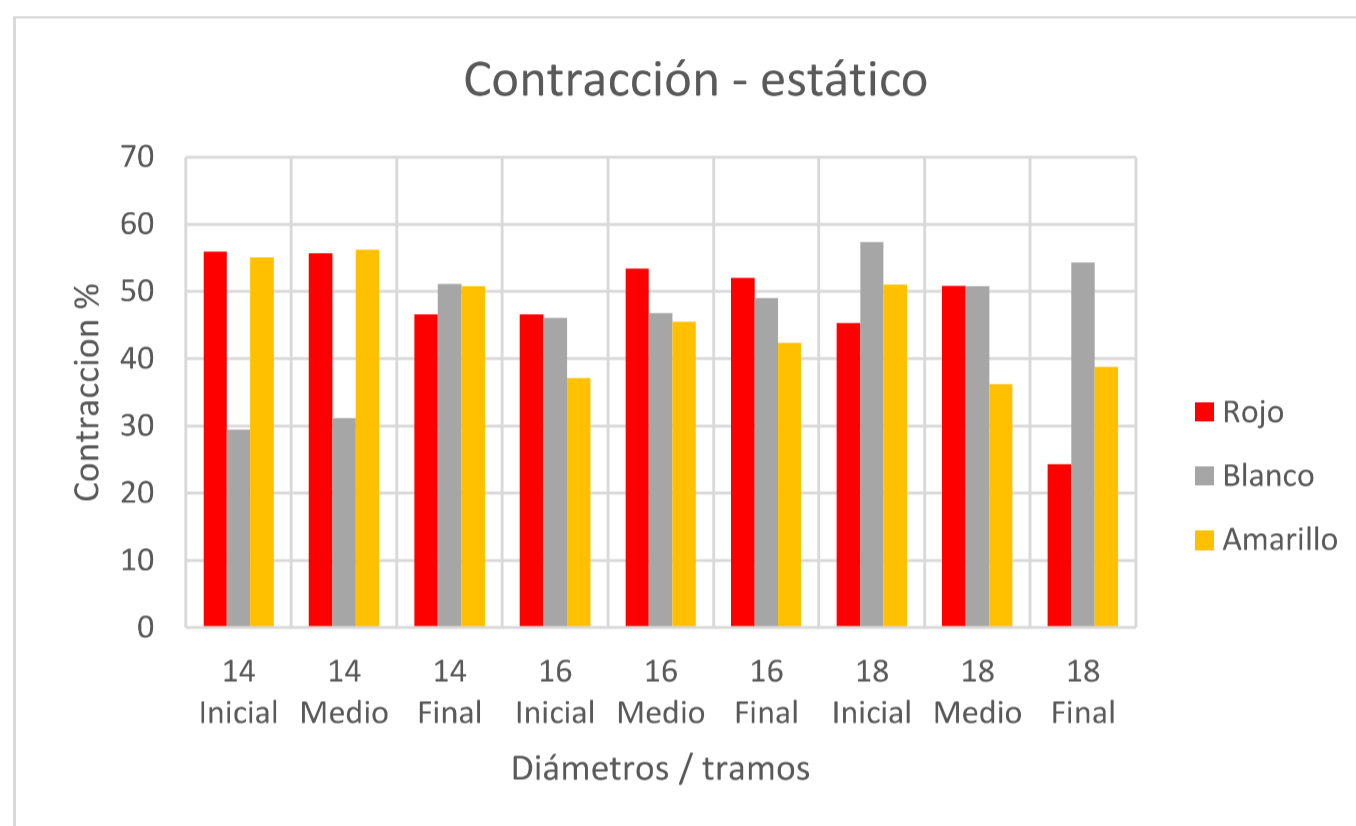
FIGURA 5.48: Elongación – probetas soldadas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Si bien la contracción es variable en las probetas soldadas, Figura 5.49, los resultados están en función de la localización de la fractura, ZAC o soldadura. Ya que si el material se fracturó por la ZAC o la soldadura, fue en promedio 25% menos dúctil que una probeta estándar.

FIGURA 5.49: Contracción - probetas soldadas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.2.3 Energía absorbida

La elongación está relacionado con la energía absorbida, anteriormente se detectó una disminución del 25% de elongación, que está directamente relacionado con la disminución de la energía absorbida por las probetas soldadas, Tabla 5.7.

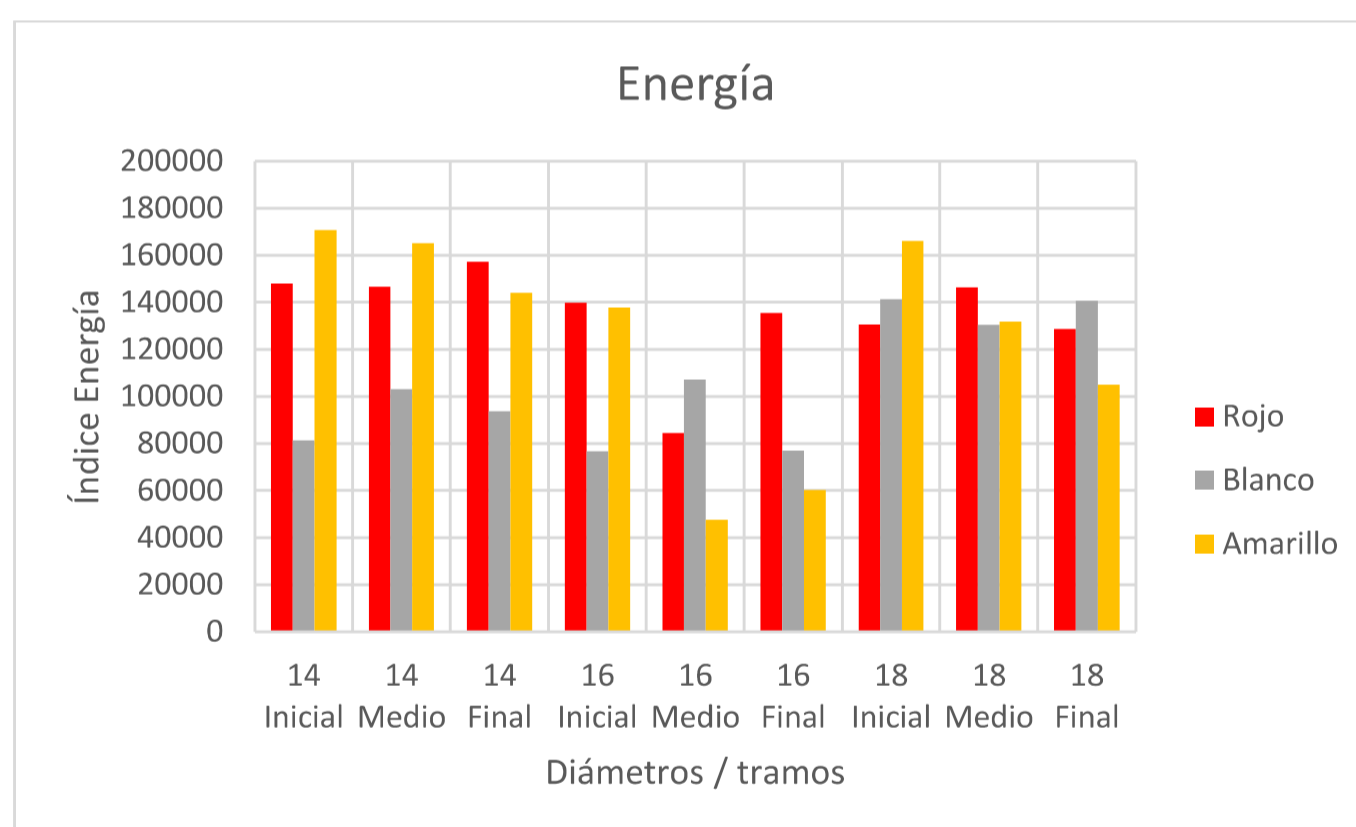
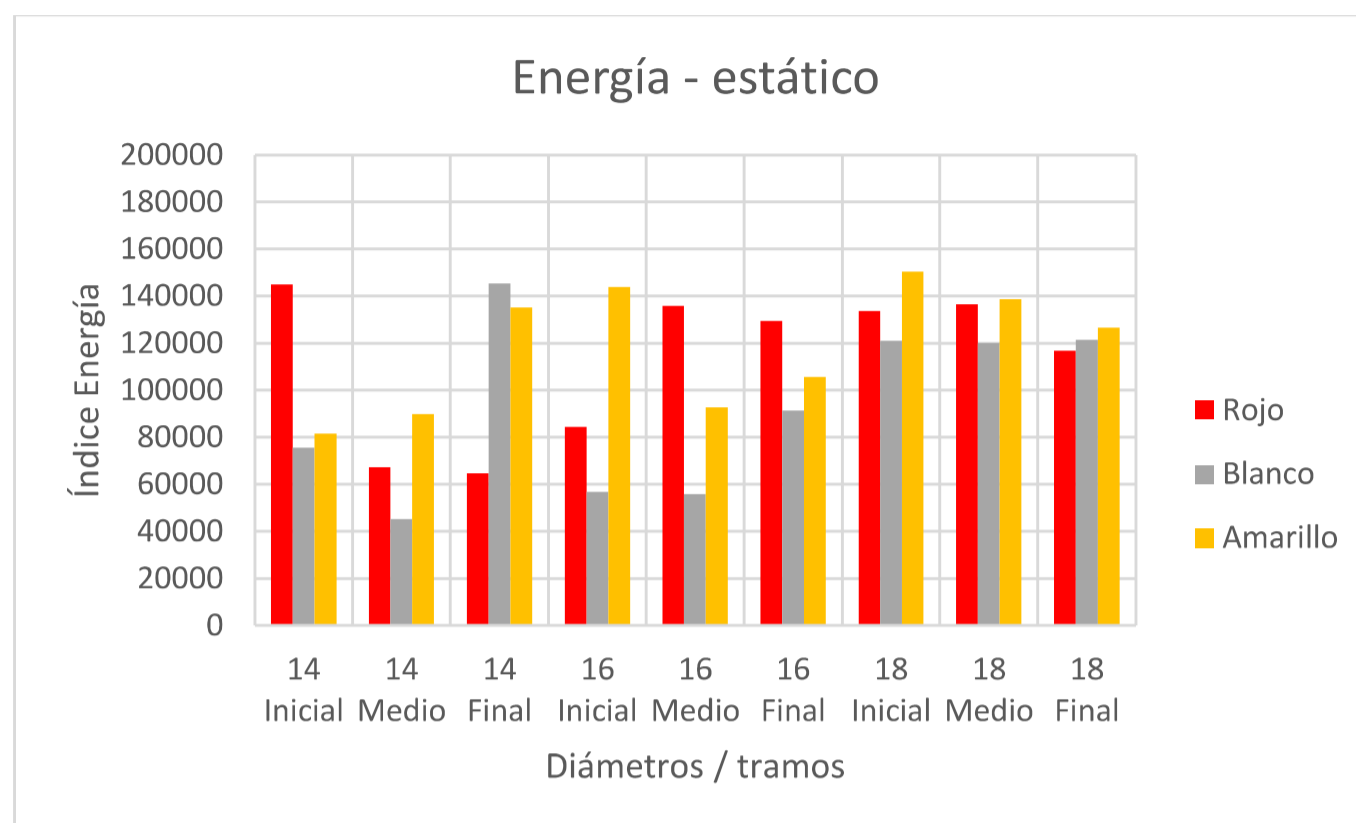
TABLA 5.7: Índice de la cantidad de energía – probetas soldadas

<i>Índice de energía</i>		<i>Índice de energía</i>	
Media	107825,609	Media	122091,969
Error típico	6214,130	Error típico	6506,811
Mediana	120175,753	Mediana	131796,646
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	32289,565	Desviación estándar	33810,380
Varianza de la muestra	1042615984,814	Varianza de la muestra	1143141796,647
Curtosis	-1,140	Curtosis	-0,569
Coefficiente de asimetría	-0,470	Coefficiente de asimetría	-0,634
Rango	105203,620	Rango	123189,913
Mínimo	45144,455	Mínimo	47497,159
Máximo	150348,076	Máximo	170687,072
Suma	2911291,453	Suma	3296483,170
Cuenta	27,000	Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La disminución porcentual en promedio de la cantidad de energía absorbida por las probetas soldadas es de un 25%.

Si bien se muestran resultados muy dispersos, Figura 5.50, cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica. Siendo estos elementos soldados no aptos en lugares donde se espera la formación de una rótula plástica debido a la disminución de ductilidad en comparación con una probeta estándar.

FIGURA 5.50: Índice de la cantidad de energía – probetas soldadas

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.2.4 Ciclos de agotamiento

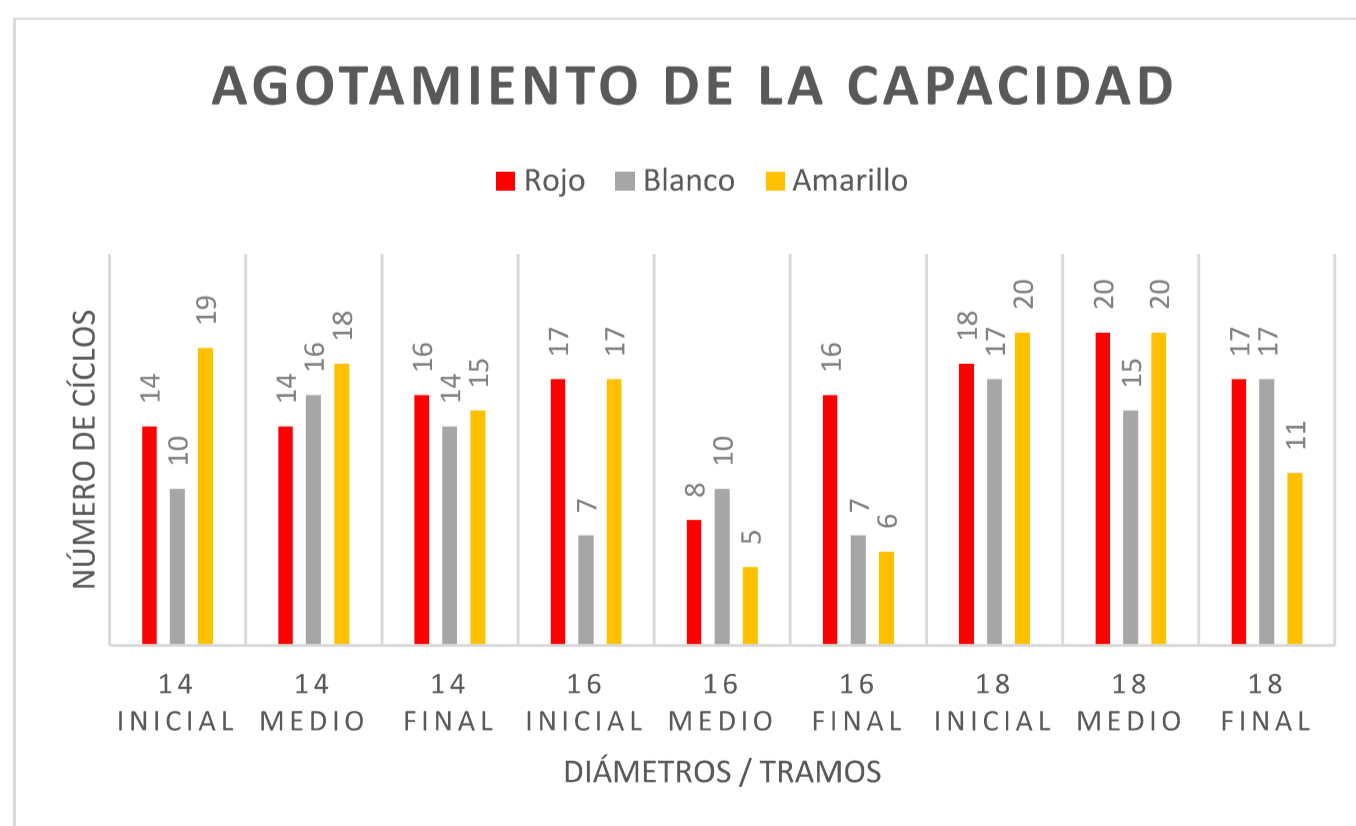
Los ciclos de agotamiento están directamente relacionado con la capacidad de con el material base menos la ductilidad perdida por el proceso de soldadura, obteniendo un promedio de agotamiento de capacidad de 14 ciclos por, es decir, un 23% menos que las probetas estándar, Tabla 5.8.

TABLA 5.8: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas soldadas

<i>Ciclos - agotamiento</i>	
Media	14,222
Error típico	0,879
Mediana	16,000
Moda	17,000
Desviación estándar	4,569
Varianza de la muestra	20,872
Curtosis	-0,700
Coefficiente de asimetría	-0,696
Rango	15,000
Mínimo	5,000
Máximo	20,000
Suma	384,000
Cuenta	27,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

En la Figura 5.51, se muestra una gran dispersión de resultados, producto del proceso de soldadura. Destacando que a pesar de la reducción en un 23% de los ciclos de agotamiento del material, estas probetas cumplen en un 96% con los requerimientos de resistencia mecánica establecidos en la (INEN-2167, 2011).

FIGURA 5.51: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas soldadas

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.2.5 Inicio y propagación de fractura

A diferencia de las probetas estándar, estas tienen dos posibilidades adicionales para su rotura, la primera por la ZAC (Zona Afectada por Calor), Figura 5.52, la segunda, imperfecciones en el proceso de soldadura, Figura 5.53.

FIGURA 5.52: Fractura por ZAC (Zona Afectada por Calor)



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.53: Fractura por imperfecciones en la soldadura

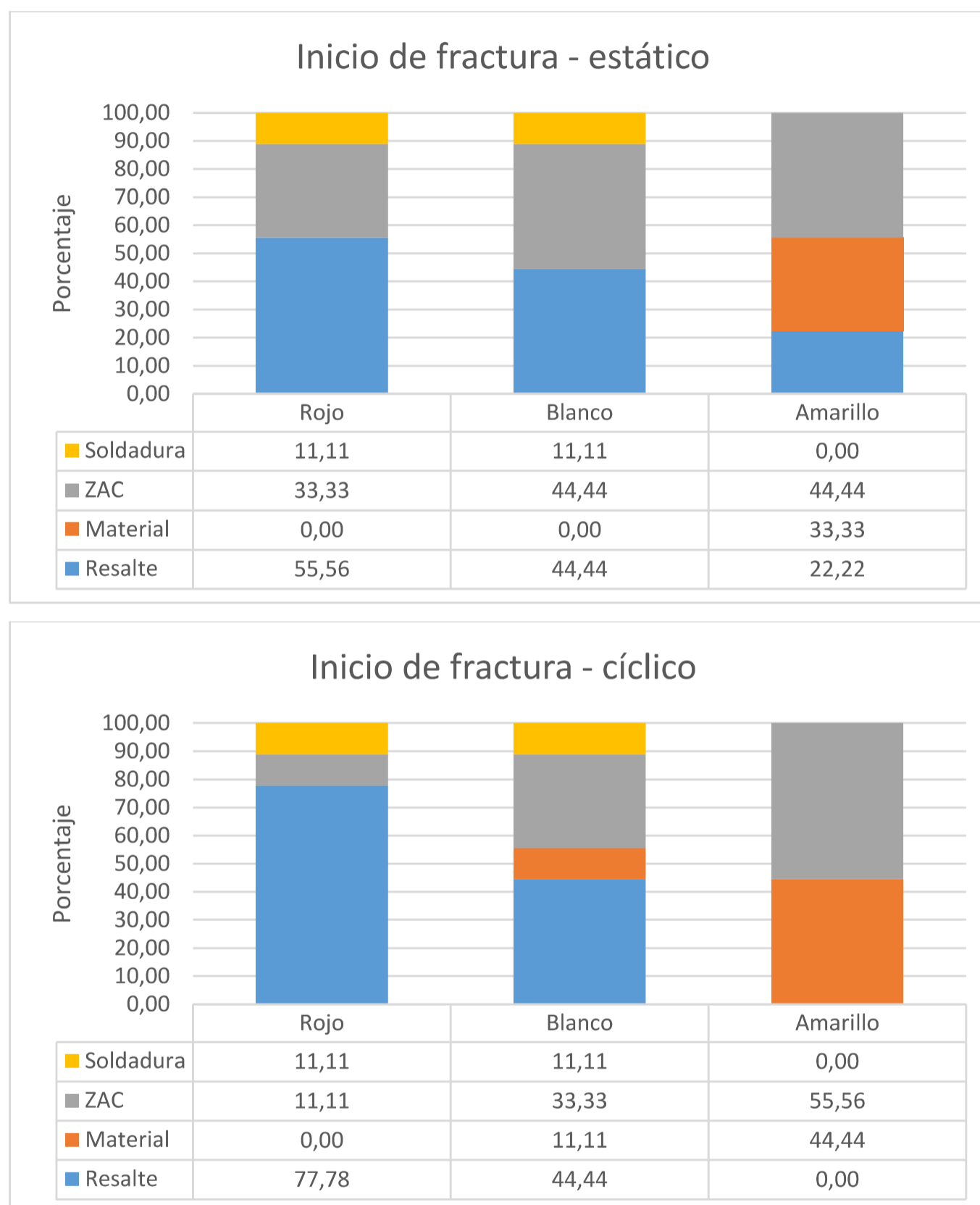


Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

Las probetas soldadas de la marca rojo en el ensayo estático, continúan marcando una tendencia de fractura por la base de los resaltes en un 55% y la ZAC en un

33%, Figura 5.54, la marca blanco presenta rotura en un 44% por la base de los resaltes y 44% por la ZAC, la marca amarillo se ve afectada mayoritariamente por la ZAC en un 44%, Figura 5.54.

FIGURA 5.54: Inicio de fractura – probetas soldadas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

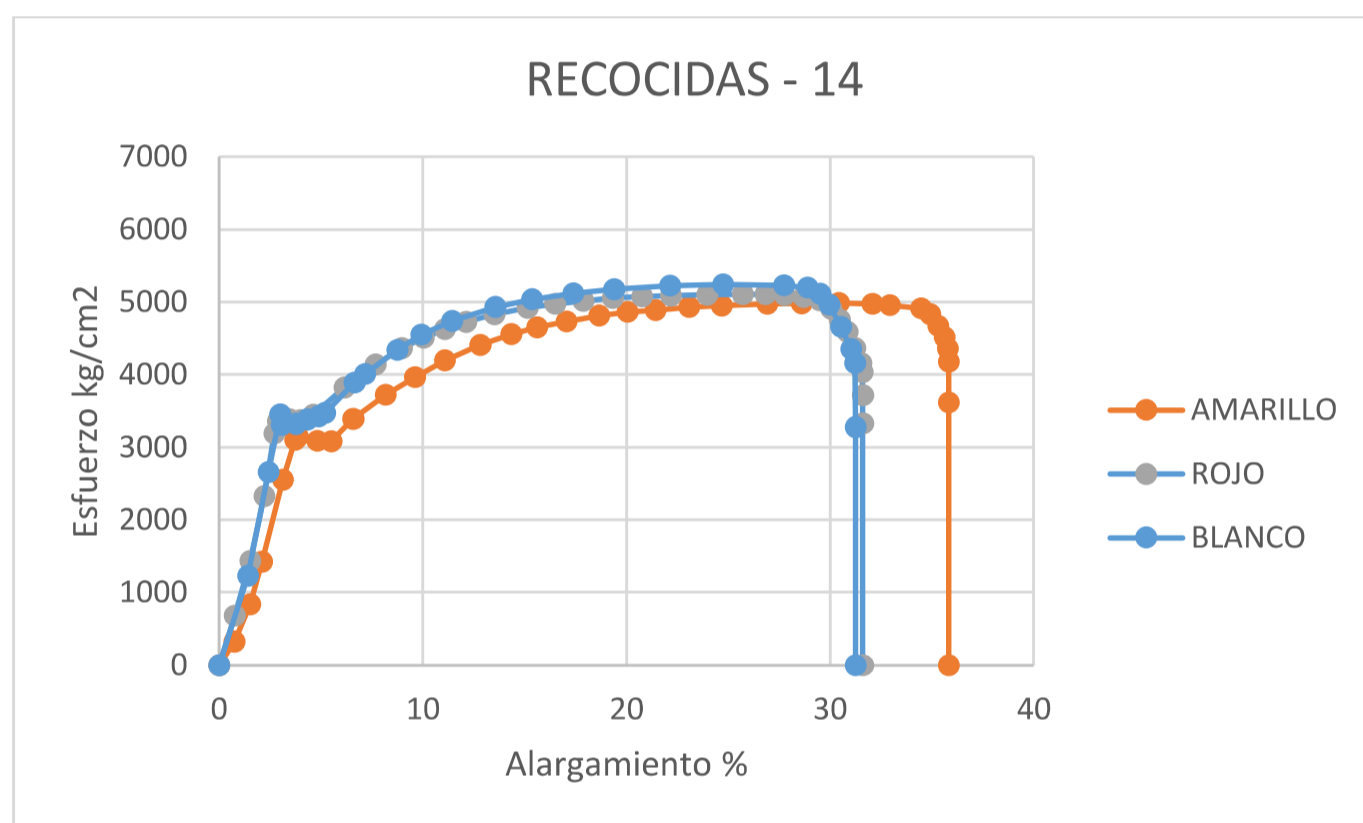
Al aplicar cargas cíclicas a las probetas soldadas, la marca rojo mayoritariamente falla por la base del resalte, la marca blanco por el resalte y ZAC, mientras que la marca amarillo se ve afectada en un 56% por la ZAC.

5.1.3 PROBETAS RECOCIDAS

Los resultados de los ensayos mecánicos de las probetas recocidas se muestran en las Figuras 5.55 hasta la 5.60.

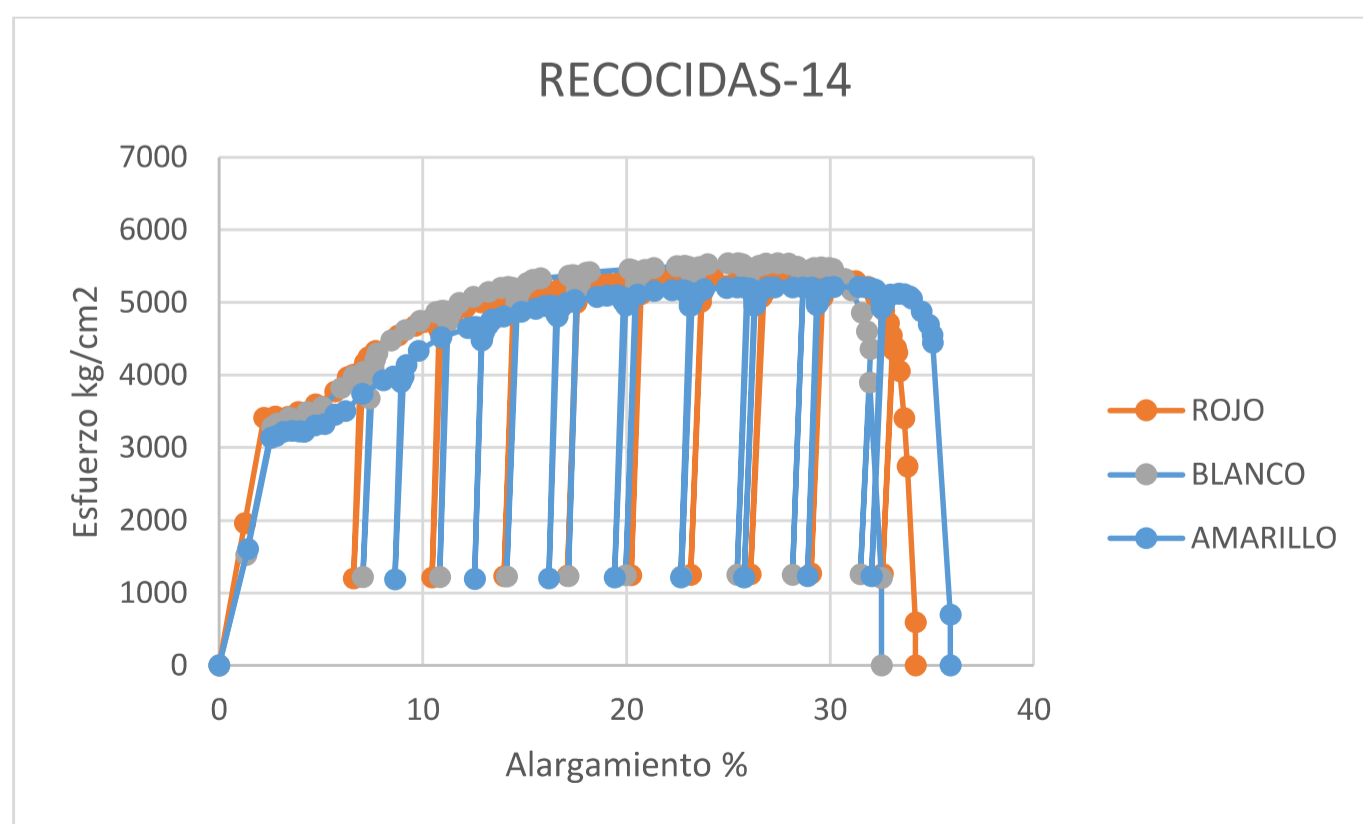
Posterior al tratamiento térmico, se espera, disminución de las propiedades mecánicas eliminando los factores mecánico o térmicos que aumentan la resistencia mecánica del material en análisis.

FIGURA 5.55: Ensayo estático probeta recocida, Ø 14mm



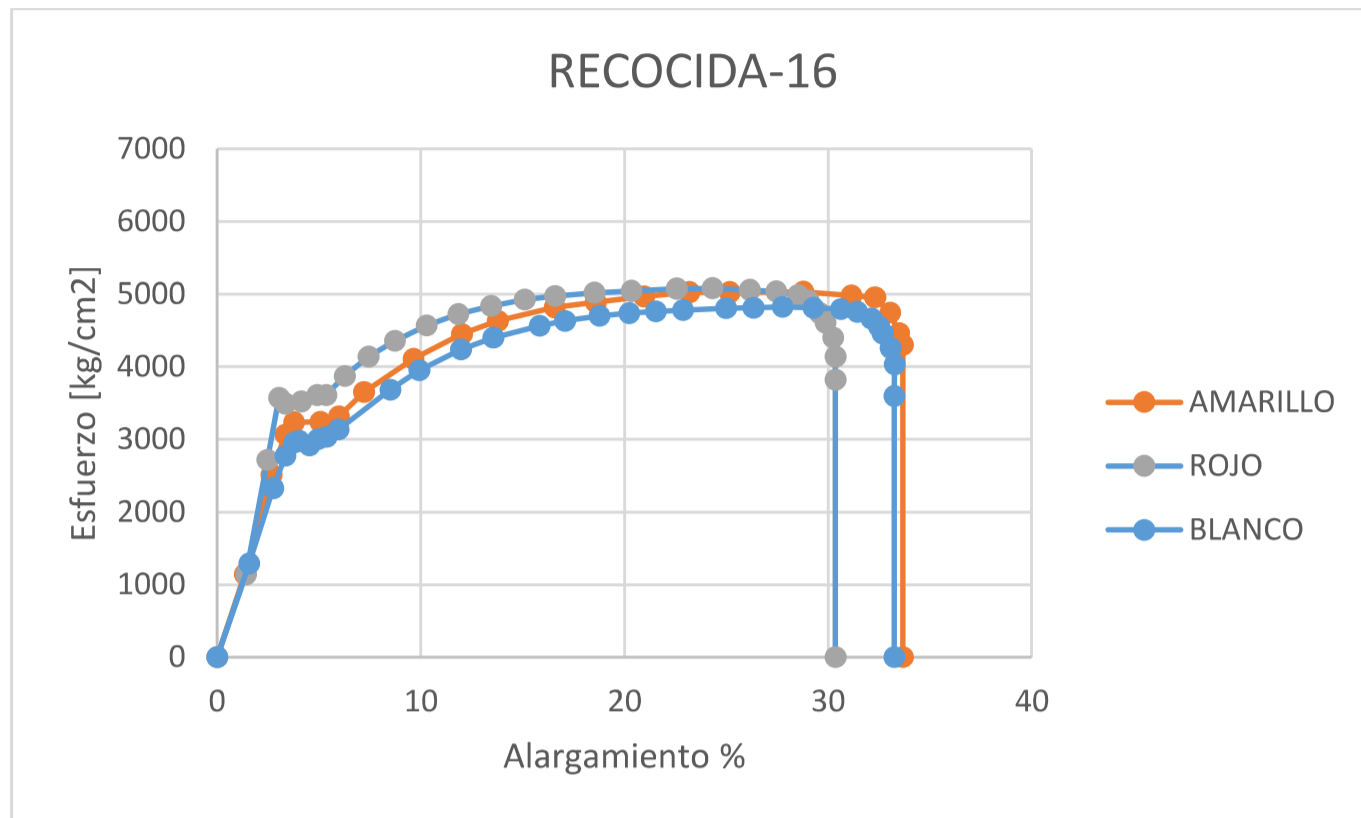
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.56: Ensayo cíclico probeta recocida, Ø 14mm



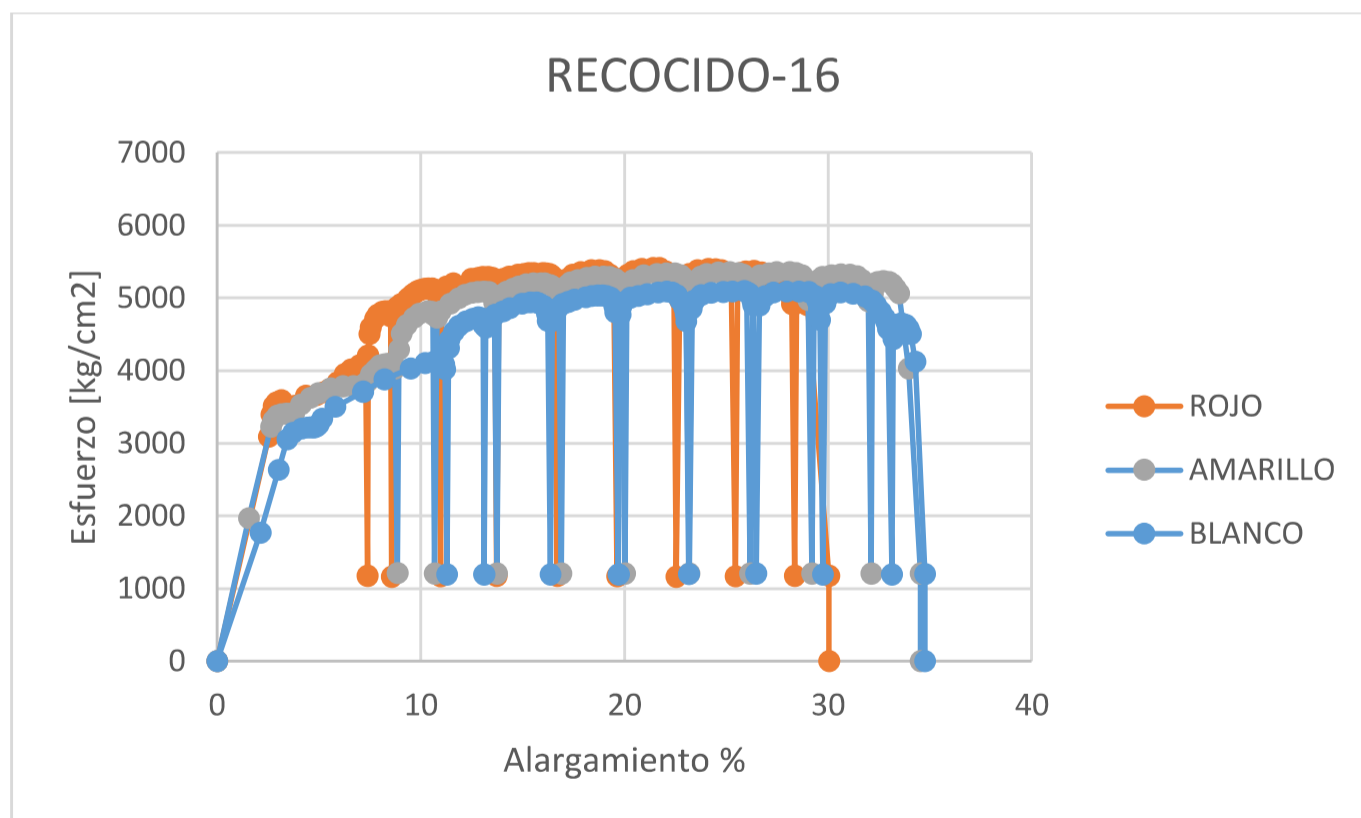
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.57: Ensayo estático probeta recocida, Ø 16mm



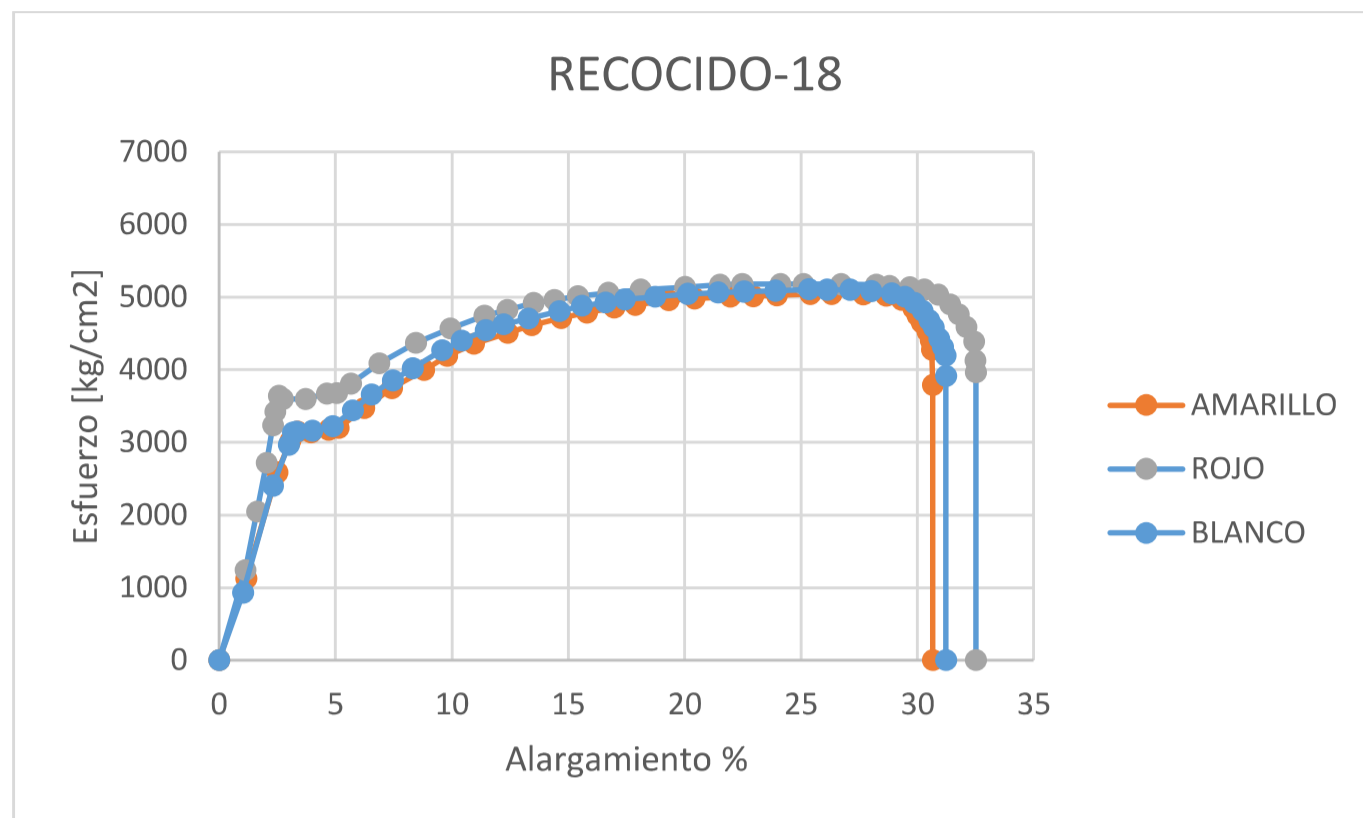
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.58: Ensayo cíclico probeta recocida, Ø 16mm



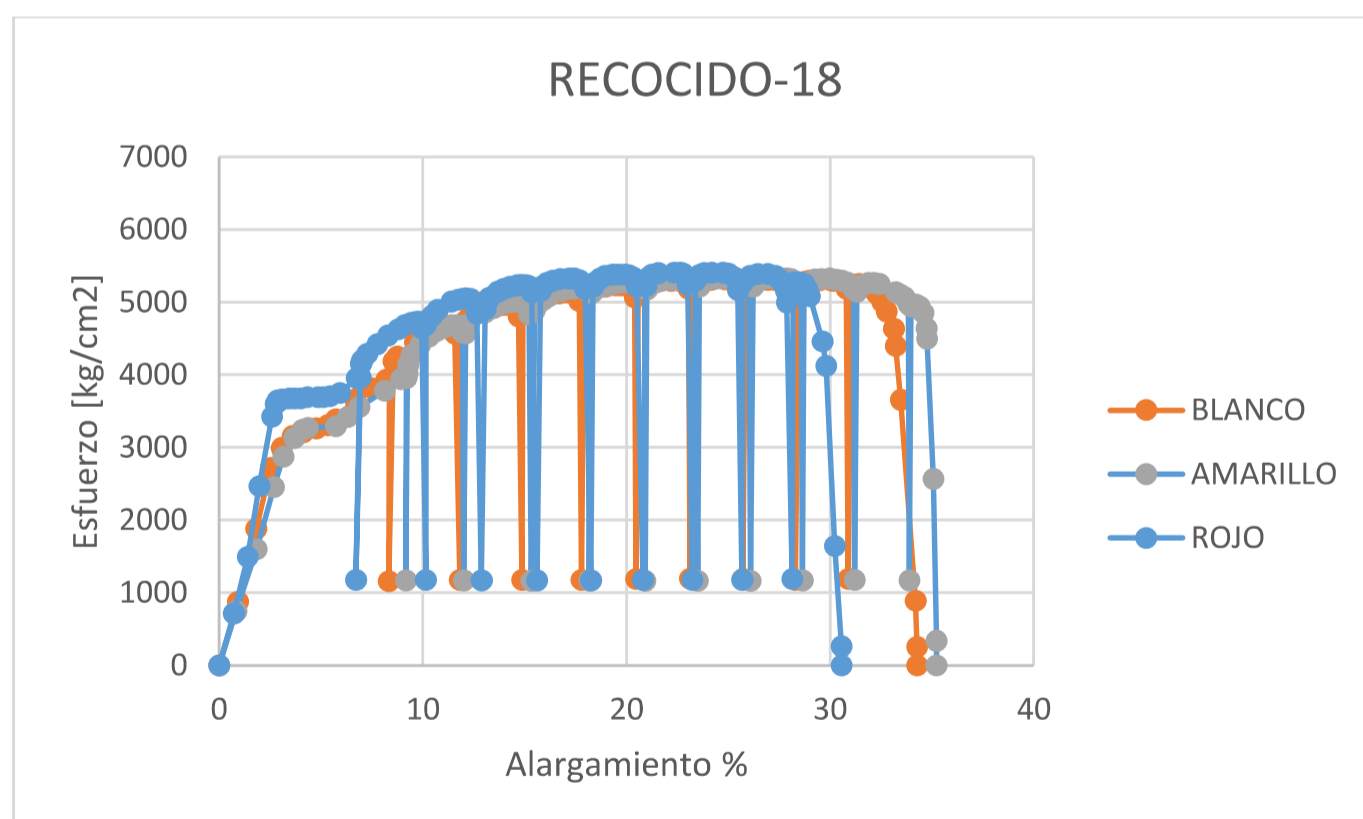
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.59: Ensayo estático probeta recocida, Ø 18mm



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.60: Ensayo cíclico-dinámico probeta recocida, Ø 18mm



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.3.1 Resistencia mecánica

Posterior al tratamiento térmico de recocido se evidencia la disminución de las propiedades mecánicas del material base en un 28% en comparación con las probetas estándar, Tabla 5.9.

TABLA 5.9 : Propiedades mecánicas probetas recocidas

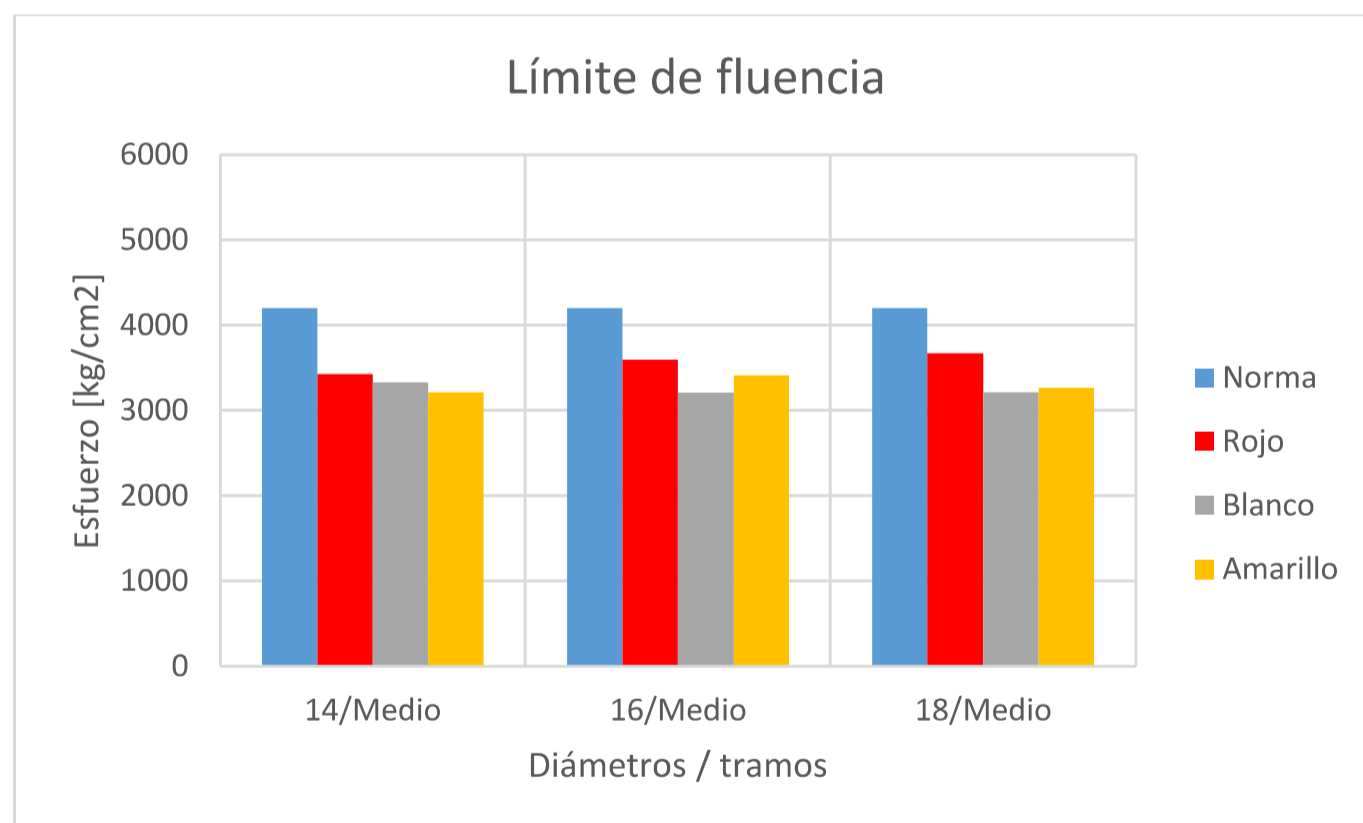
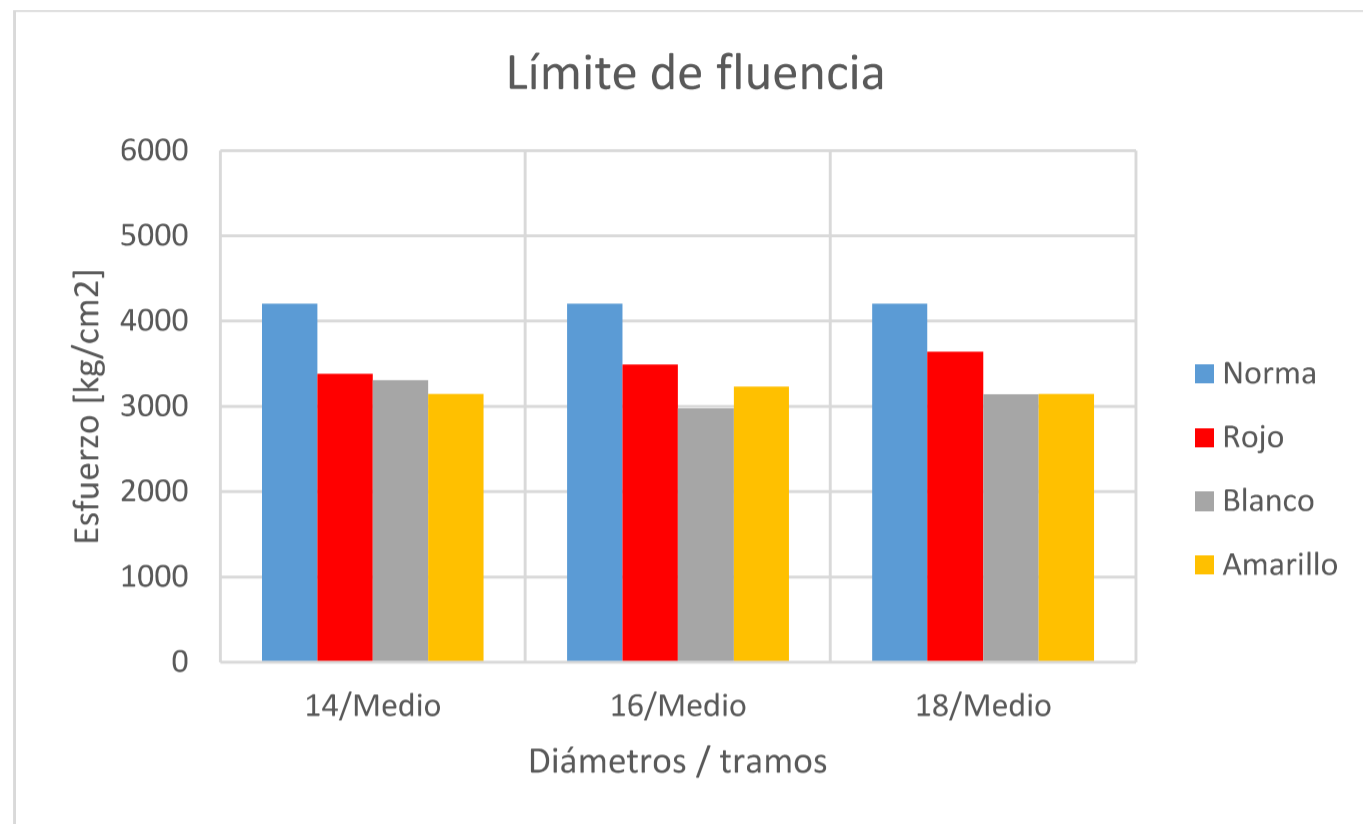
<i>Límite de fluencia</i>		<i>Resistencia última a la tracción</i>	
Media	3274,625	Media	5067,093
Error típico	68,175	Error típico	39,639
Mediana	3233,830	Mediana	5079,122
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	204,525	Desviación estándar	118,918
Varianza de la muestra	41830,418	Varianza de la muestra	14141,432
Curtosis	-0,090	Curtosis	1,596
Coeficiente de asimetría	0,535	Coeficiente de asimetría	-0,726
Rango	664,893	Rango	419,672
Mínimo	2977,297	Mínimo	4825,424
Máximo	3642,190	Máximo	5245,096
Suma	29471,629	Suma	45603,835
Cuenta	9,000	Cuenta	9,000

<i>Límite de fluencia</i>		<i>Resistencia última a la tracción</i>	
Media	3369,826	Media	5336,064
Error típico	57,052	Error típico	42,141
Mediana	3330,390	Mediana	5348,187
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	171,156	Desviación estándar	126,424
Varianza de la muestra	29294,433	Varianza de la muestra	15983,060
Curtosis	-0,571	Curtosis	1,180
Coeficiente de asimetría	0,822	Coeficiente de asimetría	-0,525
Rango	463,229	Rango	447,003
Mínimo	3206,270	Mínimo	5093,985
Máximo	3669,499	Máximo	5540,988
Suma	30328,435	Suma	48024,576
Cuenta	9,000	Cuenta	9,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

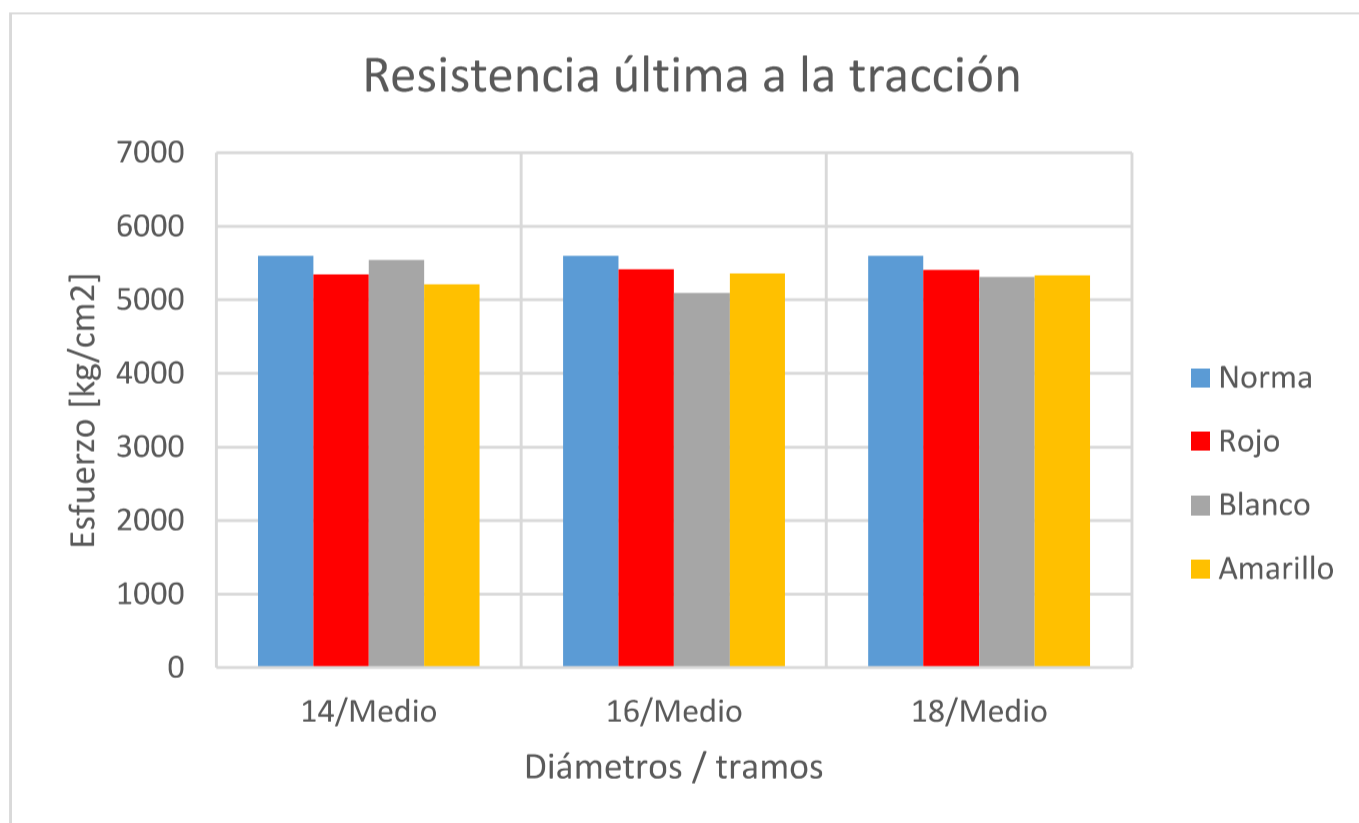
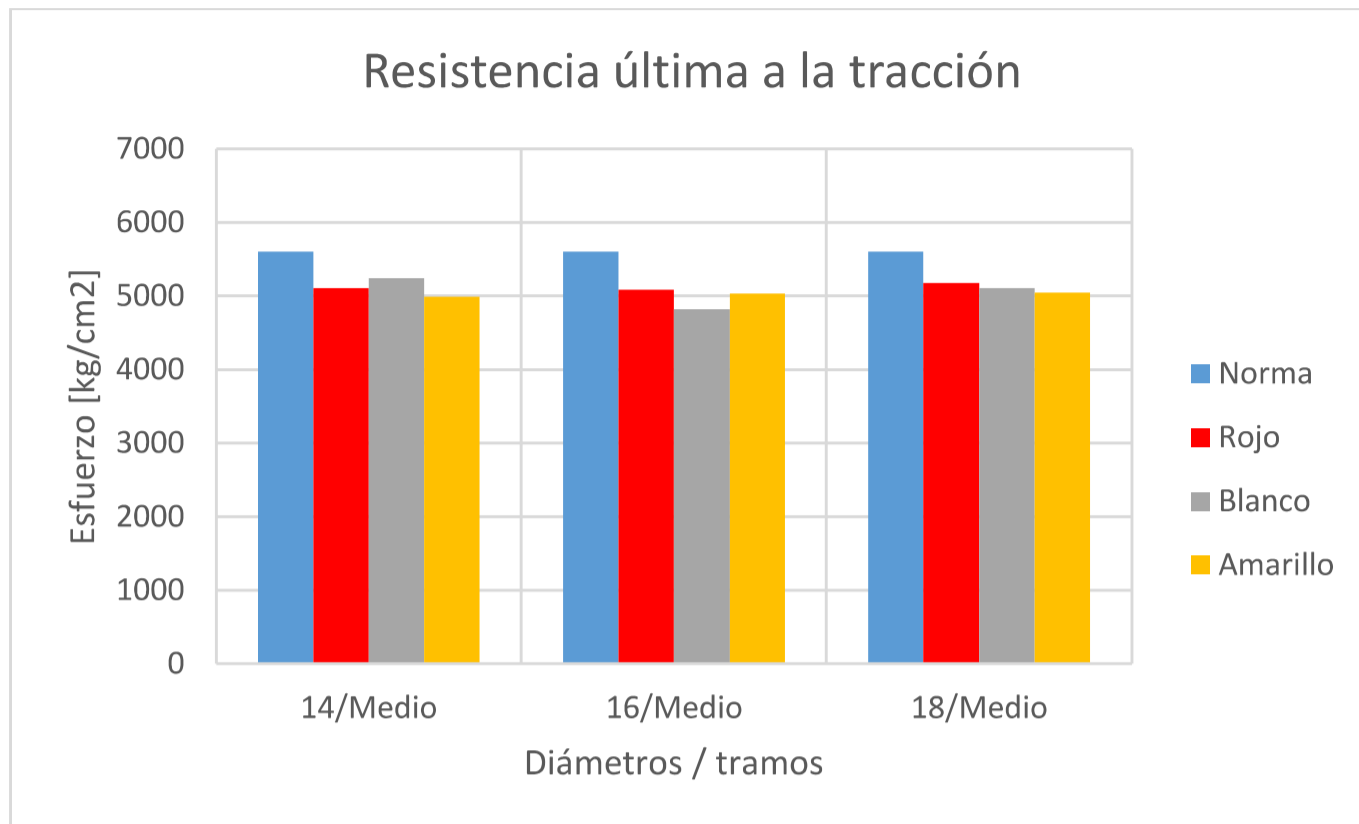
El límite de fluencia de las probetas recocidas es poco disperso inclusive entre marcas, Figura 5.61.

FIGURA 5.61: Límite de fluencia - probetas recocidas



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La resistencia última a la tracción de las probetas recocidas es poco disperso inclusive entre marcas, Figura 5.62.

FIGURA 5.62: Resistencia última a la tracción - probetas recocidas

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.3.2 Elongación y contracción

El alargamiento promedio de las probetas recocidas es superior a las probetas estándares en un 26%, Tabla 5.10.

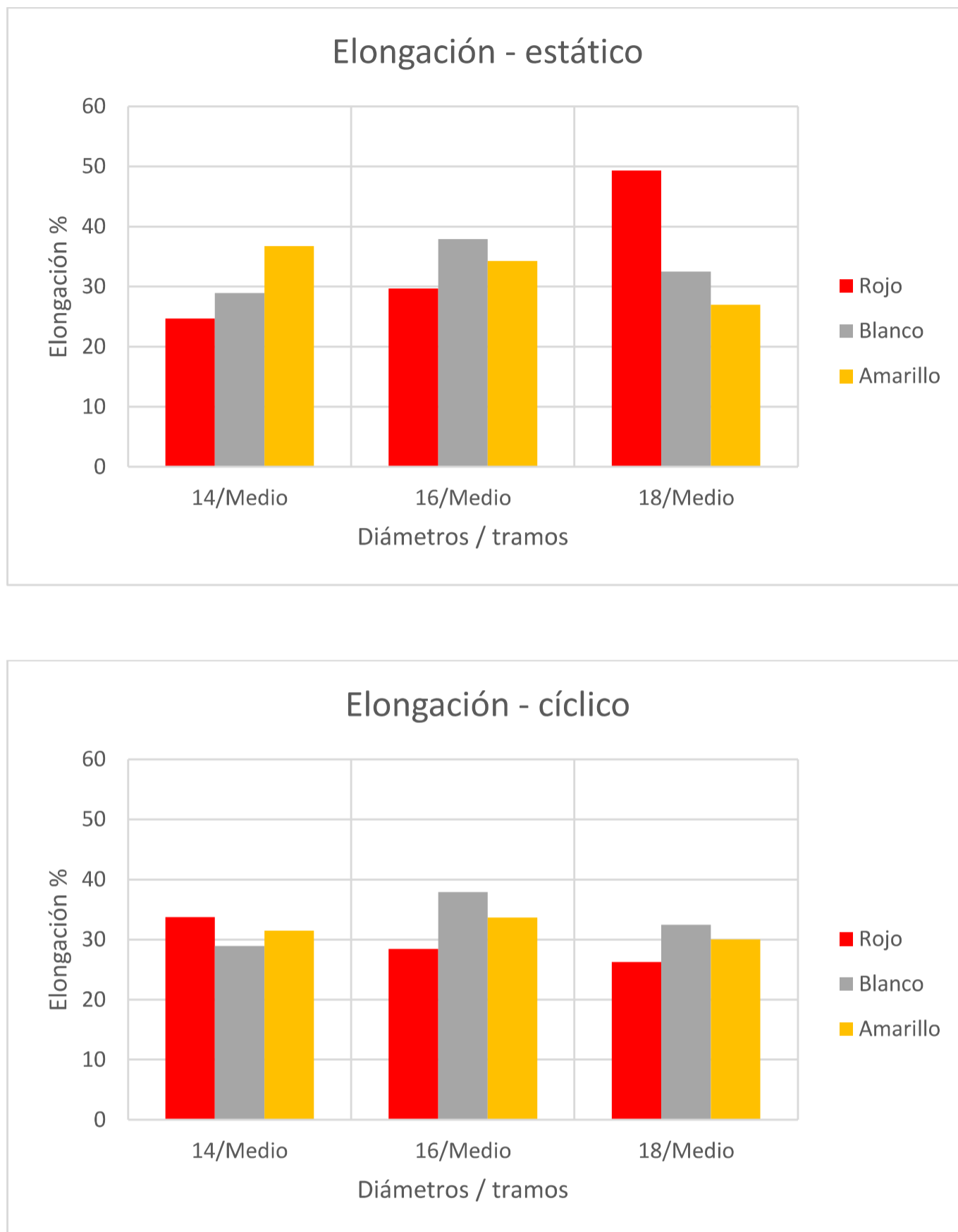
TABLA 5.10: Elongación y contracción – probetas recocidas

<i>Elongación %</i>		<i>Contracción %</i>	
Media	33,549	Media	54,370
Error típico	2,572	Error típico	0,962
Mediana	31,488	Mediana	53,533
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	7,716	Desviación estándar	2,887
Varianza de la muestra	59,533	Varianza de la muestra	8,334
Curtosis	0,971	Curtosis	-0,662
Coefficiente de asimetría	1,082	Coefficiente de asimetría	0,675
Rango	24,637	Rango	8,054
Mínimo	24,686	Mínimo	51,078
Máximo	49,322	Máximo	59,131
Suma	301,939	Suma	489,329
Cuenta	9,000	Cuenta	9,000

<i>Elongación %</i>		<i>Contracción %</i>	
Media	31,435	Media	52,285
Error típico	1,161	Error típico	1,375
Mediana	31,471	Mediana	50,825
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	3,483	Desviación estándar	4,126
Varianza de la muestra	12,133	Varianza de la muestra	17,026
Curtosis	0,249	Curtosis	1,309
Coefficiente de asimetría	0,428	Coefficiente de asimetría	1,067
Rango	11,646	Rango	13,431
Mínimo	26,267	Mínimo	47,438
Máximo	37,913	Máximo	60,868
Suma	282,919	Suma	470,567
Cuenta	9,000	Cuenta	9,000

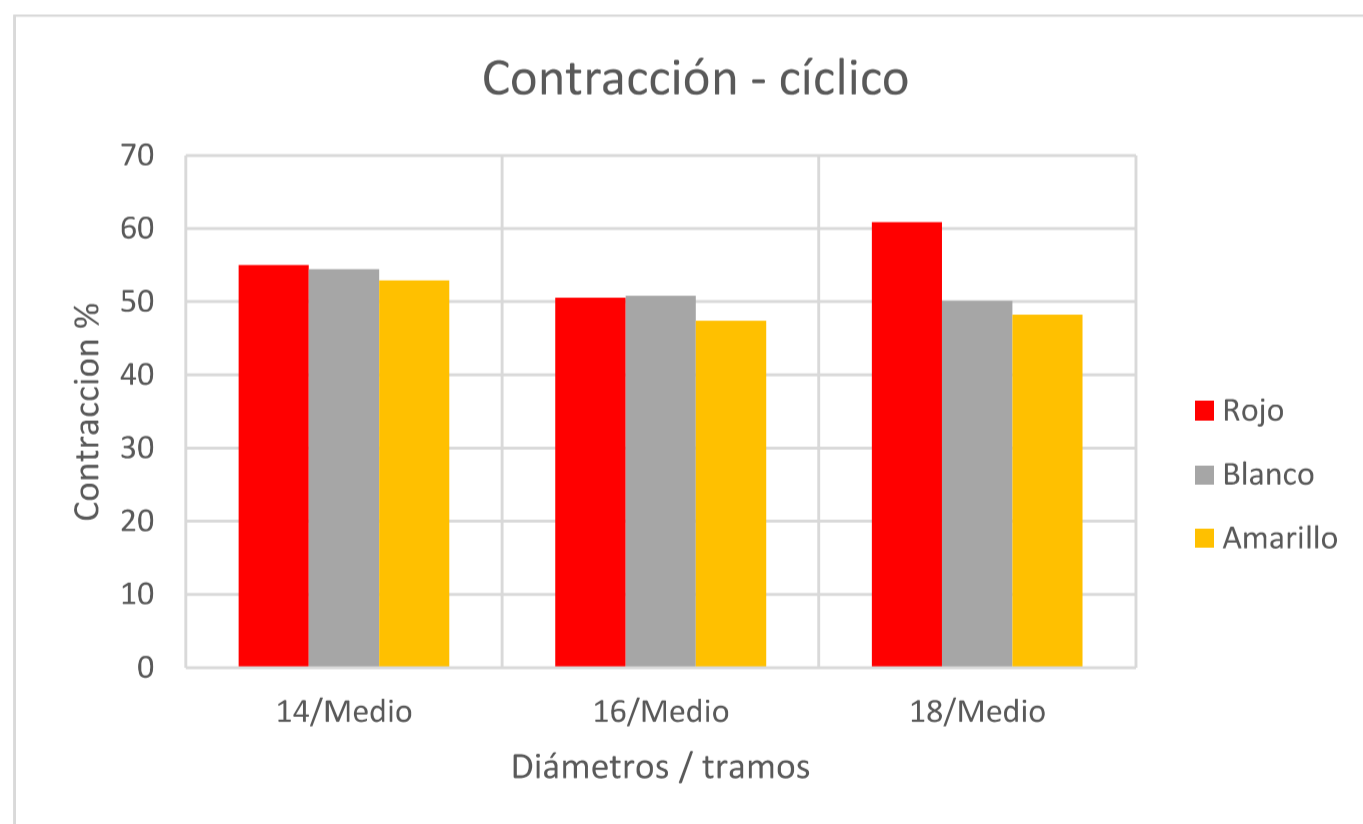
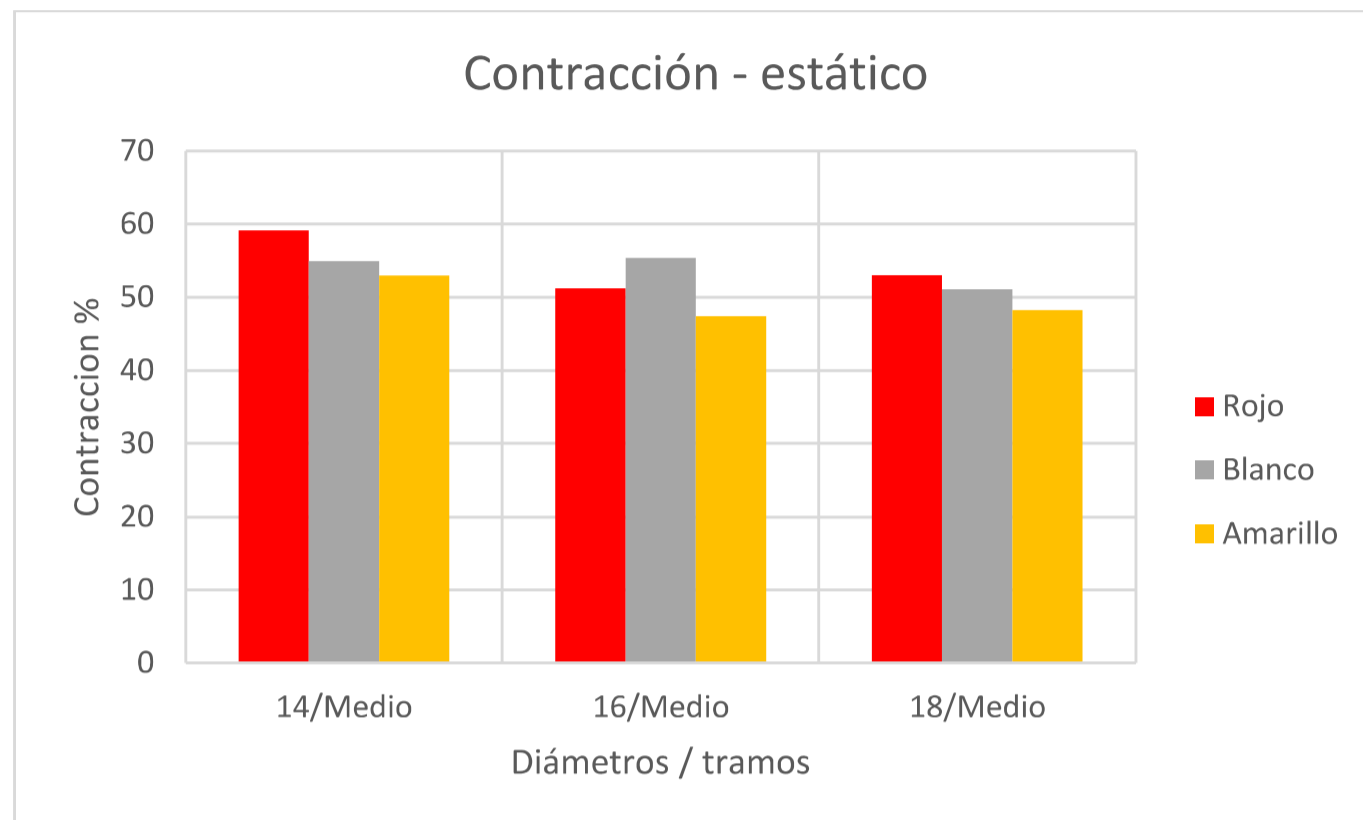
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La elongación con el ensayo estático, tiene resultados dispersos en comparación con el cíclico, Figura 5.63.

FIGURA 5.63: Elongación – probetas recocidas

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La contracción de las probetas estándar como de las recocidas difiere en promedio en un 3%, teniendo resultados dispersos.

FIGURA 5.64: Contracción - probetas recocidas

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.3.3 Energía absorbida

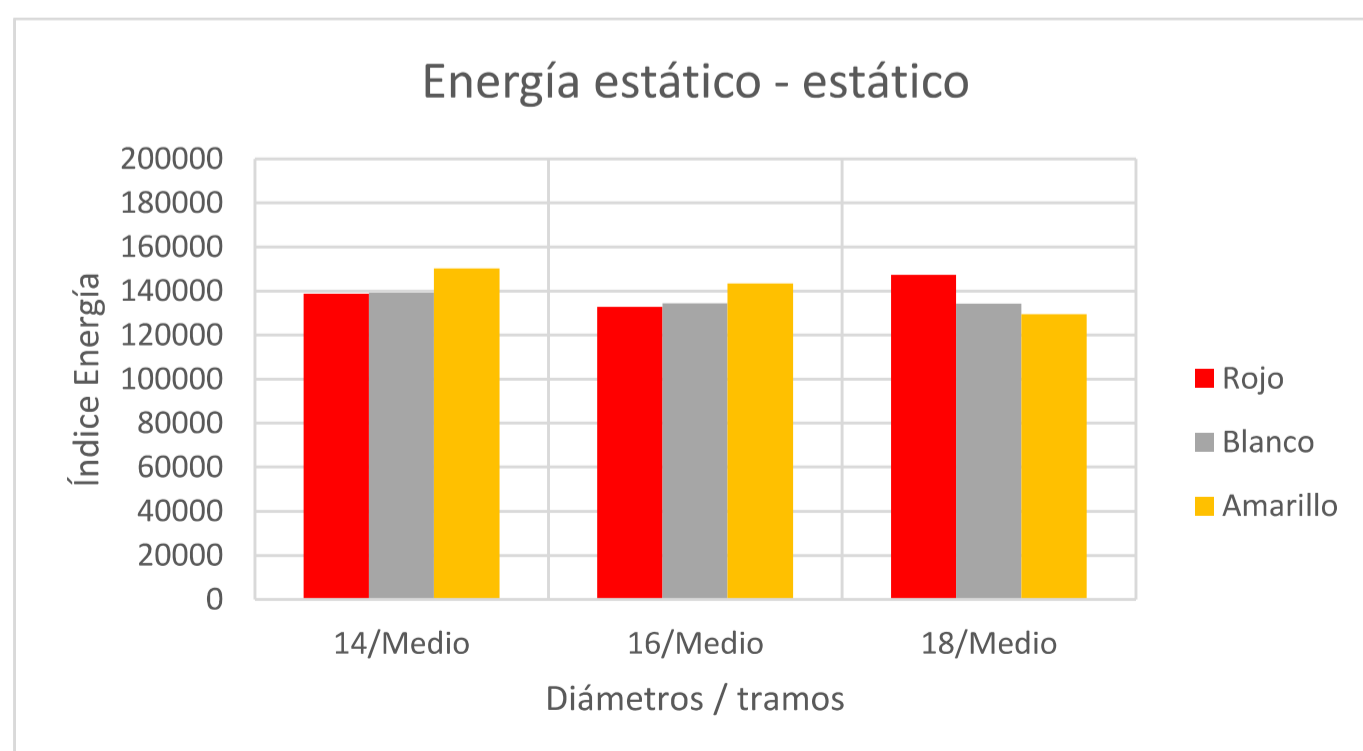
El índice de la cantidad de energía absorbida por las probetas recocidas es menor en un 3%, Tabla 5.11, por lo que se puede establecer que el tratamiento térmico fue realizado correctamente, disminuyendo su capacidad y manteniendo el índice de la cantidad de energía absorbida, Figura 5.65.

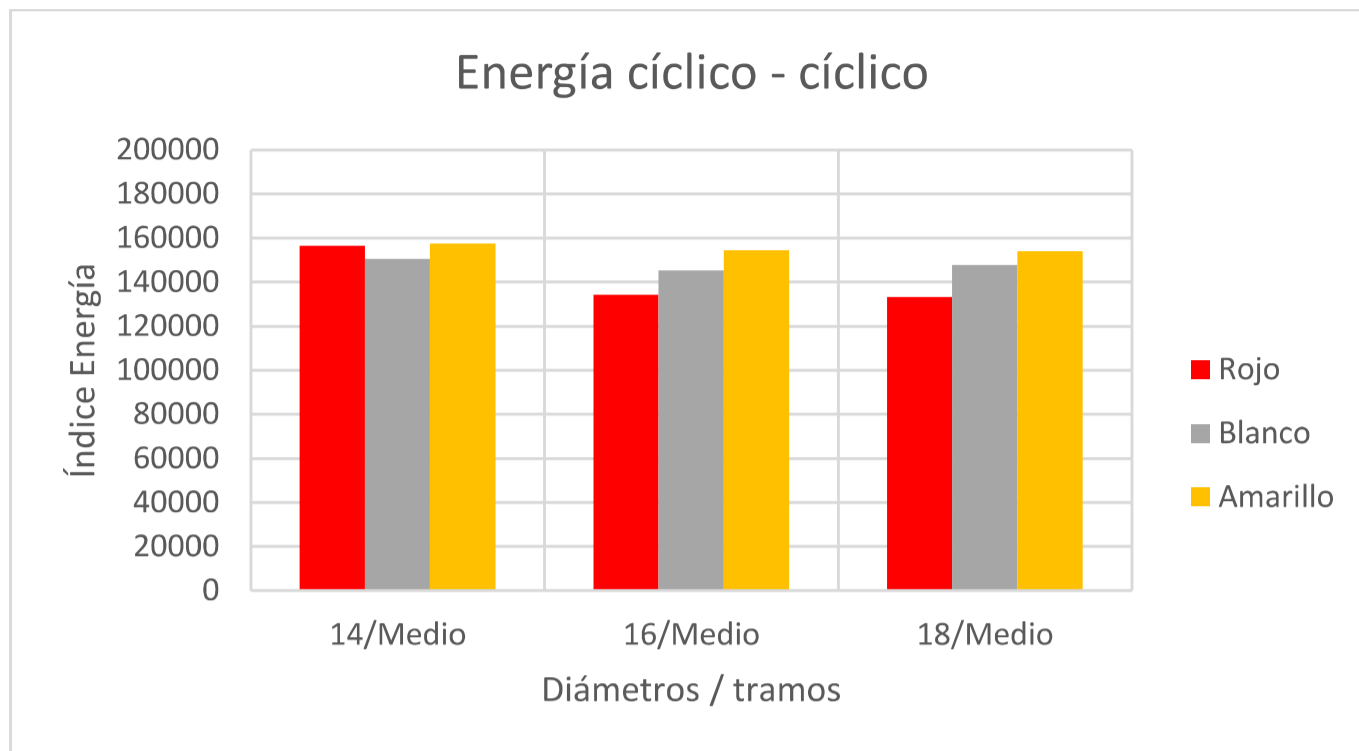
TABLA 5.11: Índice de la cantidad de energía – probetas recocidas

<i>Índice de energía - estático</i>		<i>Índice de energía - cíclico</i>	
Media	138851,941	Media	148209,534
Error típico	2320,692	Error típico	3028,051
Mediana	138778,501	Mediana	150599,356
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	6962,075	Desviación estándar	9084,154
Varianza de la muestra	48470488,808	Varianza de la muestra	82521856,951
Curtosis	-0,910	Curtosis	-0,523
Coefficiente de asimetría	0,430	Coefficiente de asimetría	-0,911
Rango	20751,741	Rango	24328,507
Mínimo	129435,755	Mínimo	133191,520
Máximo	150187,496	Máximo	157520,027
Suma	1249667,467	Suma	1333885,803
Cuenta	9,000	Cuenta	9,000

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.65: Índice de la cantidad de energía – probetas recocidas





Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.3.4 Ciclos de agotamiento

El agotamiento de las probetas recocidas un promedio es de 10 ciclos, Tabla 5.12.,

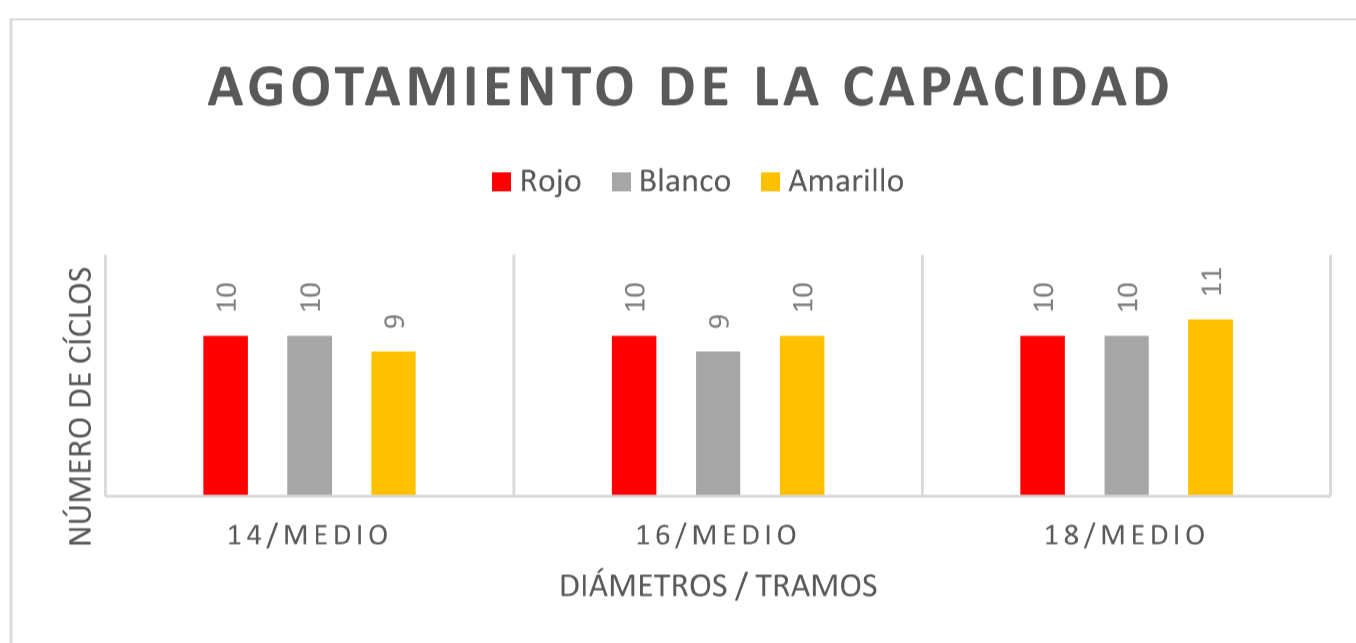
TABLA 5.12 : Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas recocidas

<i>Ciclos - agotamiento</i>	
Media	9,88888889
Error típico	0,2003084
Mediana	10
Moda	10
Desviación estándar	0,60092521
Varianza de la muestra	0,36111111
Curtosis	1,12595097
Coefficiente de asimetría	-
Rango	2
Mínimo	9
Máximo	11
Suma	89
Cuenta	9

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

El agotamiento de la capacidad similar entre marcas Figura 5.66, establece un correcto tratamiento térmico, ya que incluso los lasos de histéresis son de una misma amplitud entre marcas, determinando que las propiedades mecánicas del material base son similares entre las tres productoras de acero. Identificando que la variación de resultados en el agotamiento de capacidad es debido al proceso de obtención de las varillas.

FIGURA 5.66: Ciclos de agotamiento de capacidad – probetas recocidas

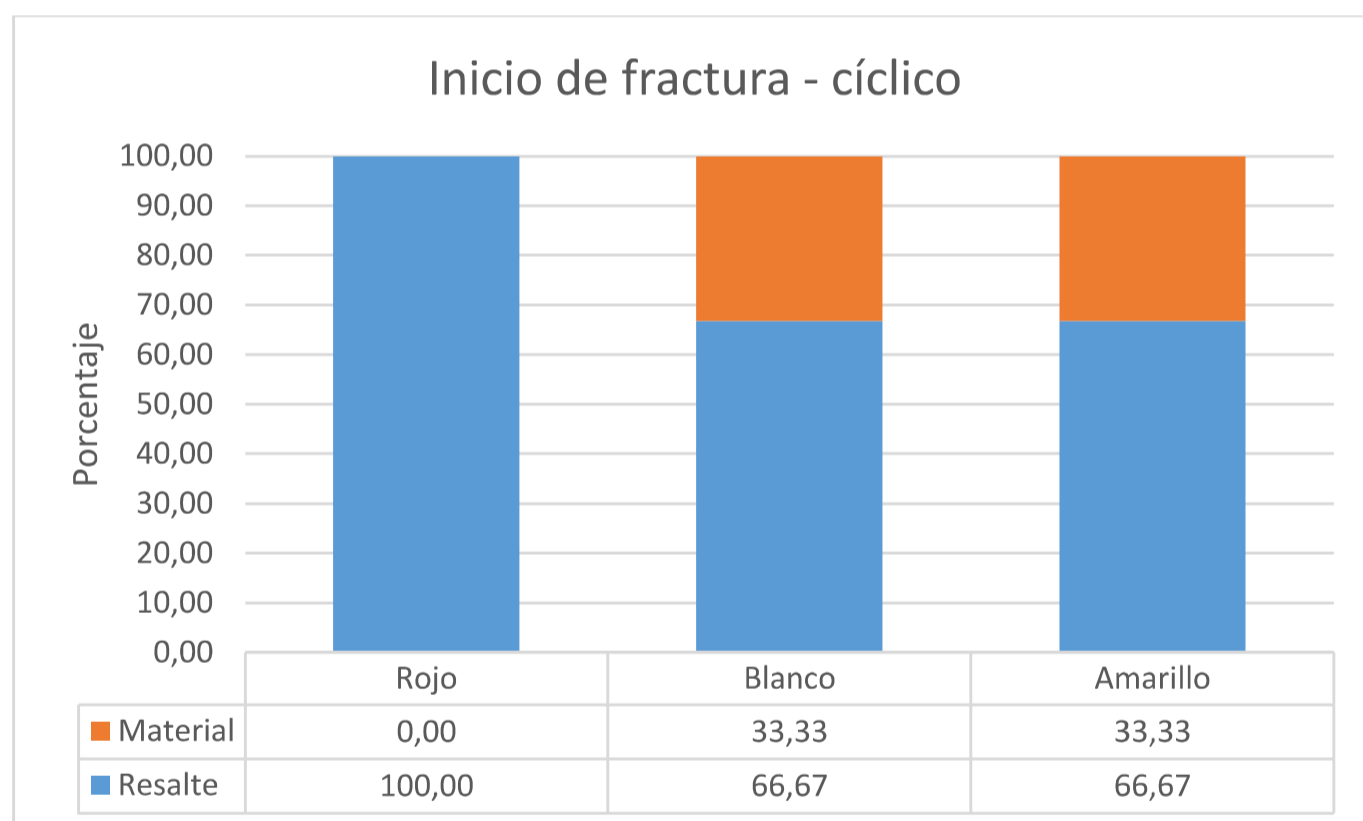
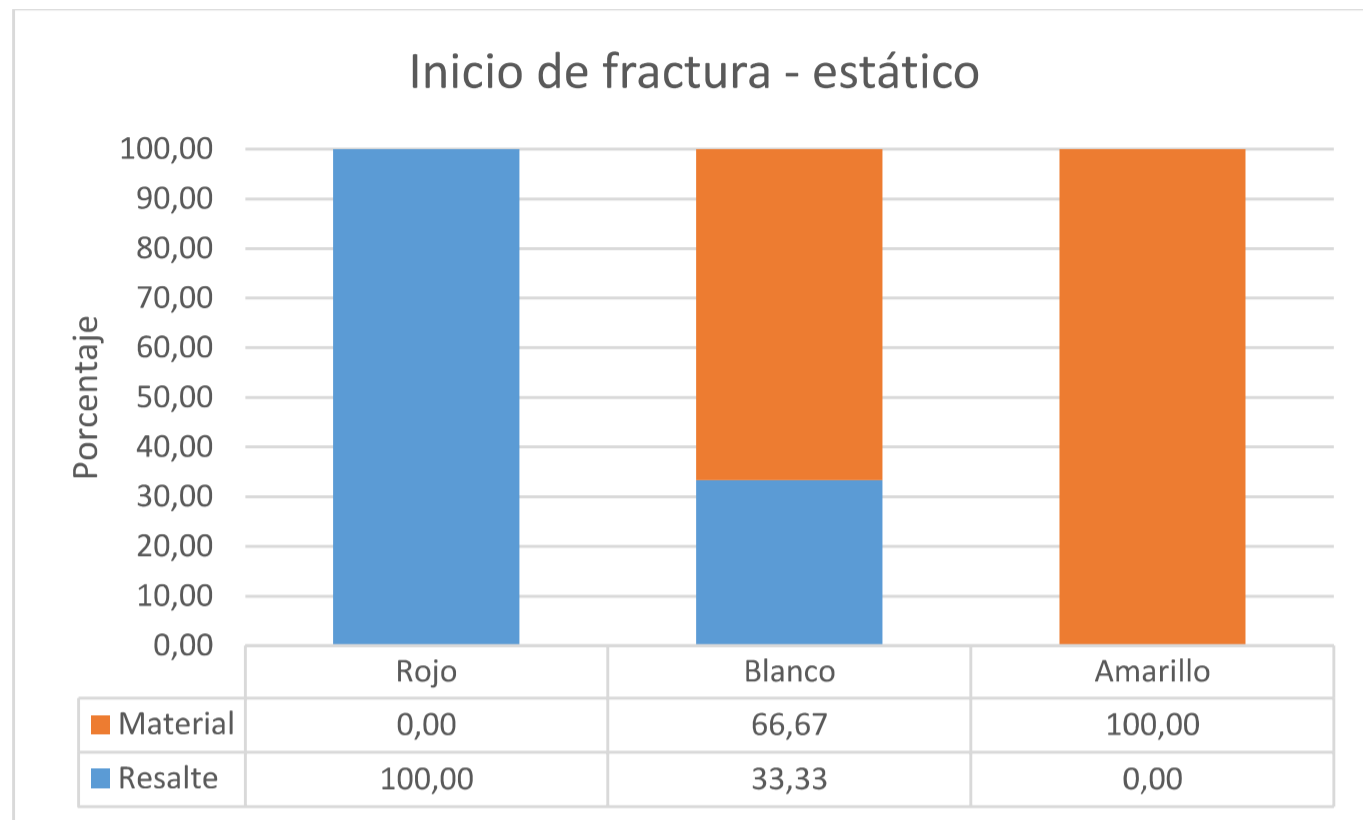


Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.1.3.5 Inicio y propagación de fractura

Las probetas recocidas – estáticas, muestran que el inicio y propagación de fractura en la marca rojo es por la base del resalte, mientras que las probetas de las marcas blanco y amarillo predomina el inicio de fractura por el material. Figura 5.67.

Cuando las probetas son sometidas a cargas cíclicas, las tres marcas inician mayoritariamente su fractura por la base del resalte, identificando concentración de esfuerzos, Figura 5.67.

FIGURA 5.67: Inicio de fractura – probetas recocidas

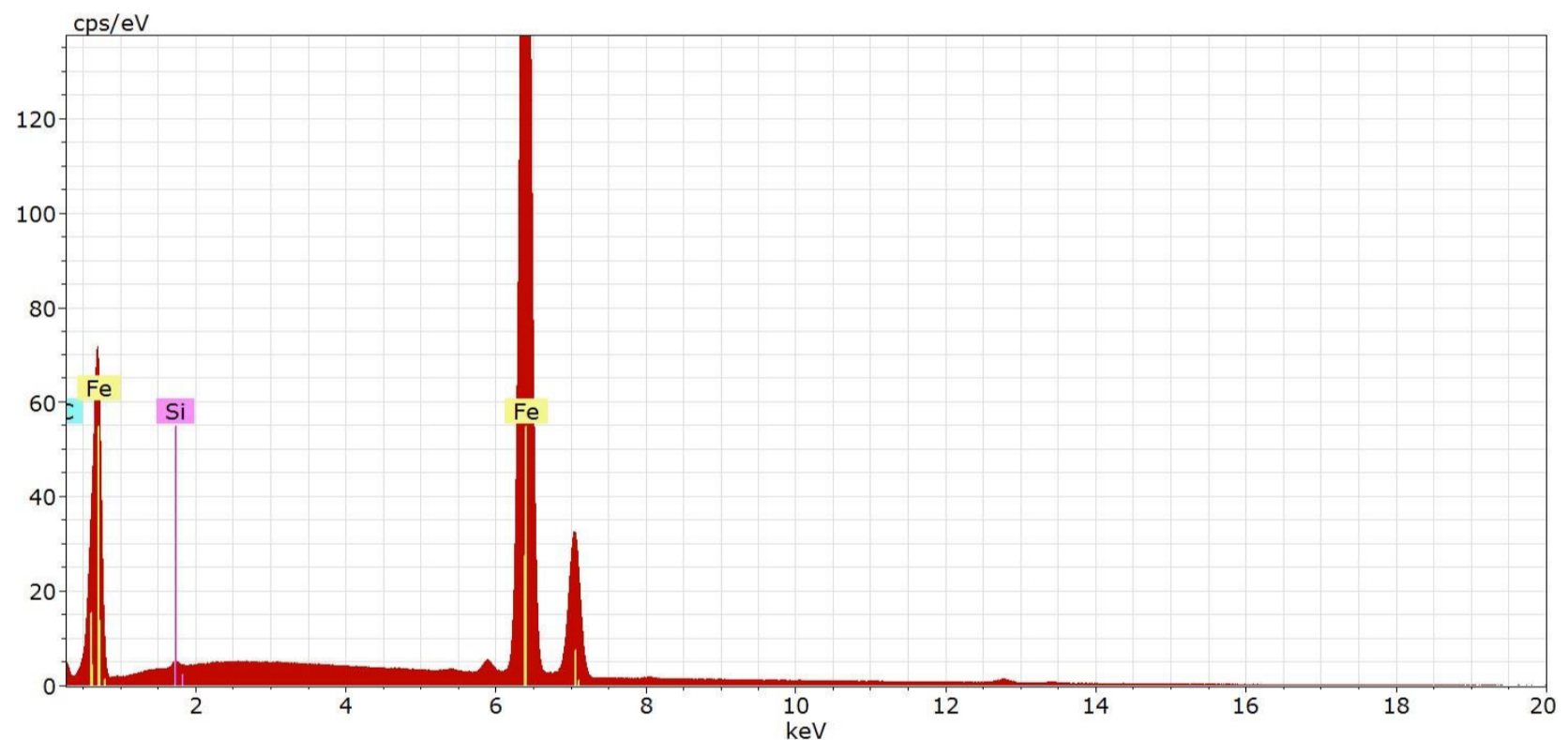
Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.2 ANÁLISIS QUÍMICO METALGRÁFICO CUALITATIVO

Para el análisis químico metalográfico cualitativo se empleó un microscopio electrónico SEM, perteneciente al Laboratorio del Centro de Nanociencia y Nanotecnología de la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE, con el cual se puede visualizar la estructura que conforma la varilla de acero A706.

Se realizó una identificación de los componentes químicos de las muestras de acero A706, encontrando los definidos en la norma (INEN-2167, 2011), Figura 5.68.

FIGURA 5.68: Composición química típica del acero A706

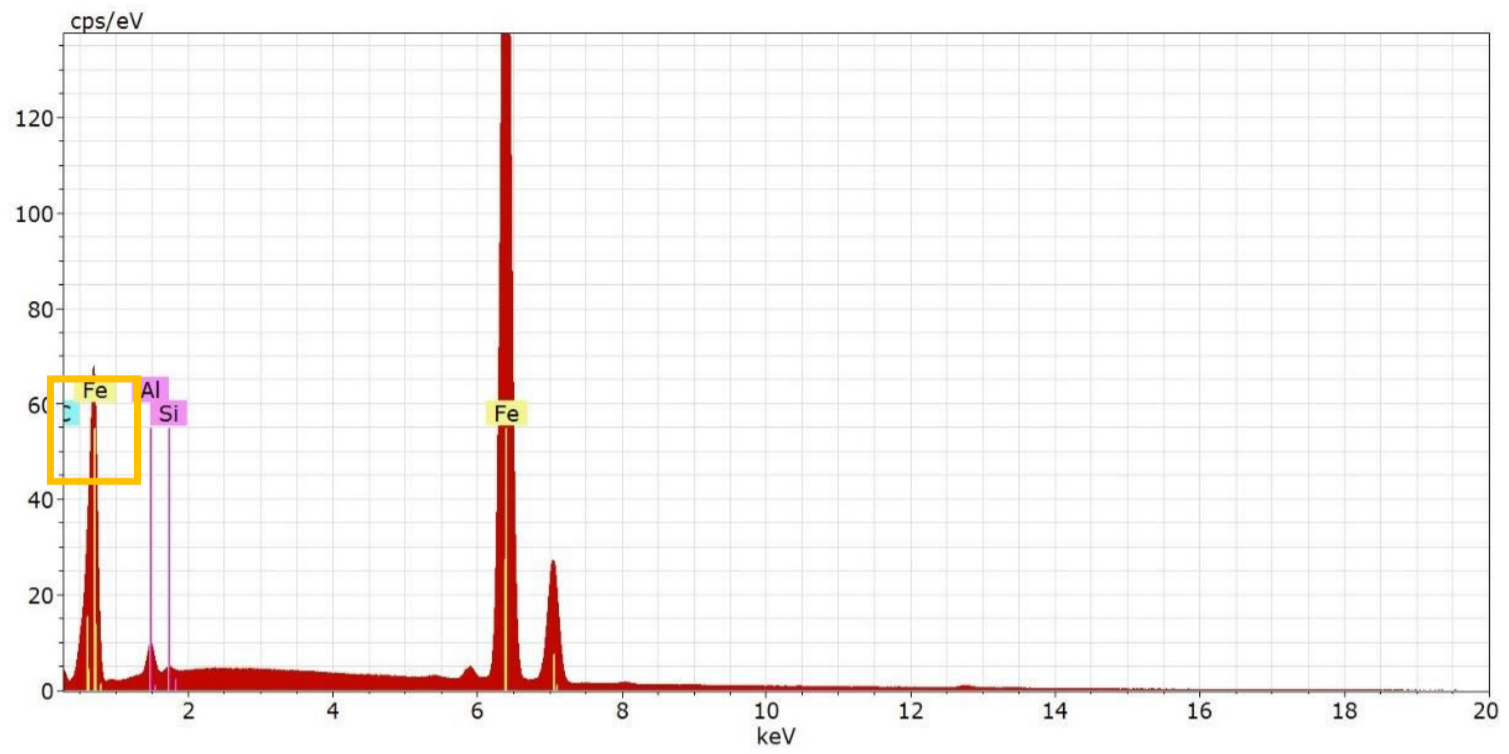


Fuente: Elaborado Laboratorio CECINAT

También se encontraron otros elementos (Al) que pueden interferir en las propiedades mecánicas del acero A706, Figura 5.69.

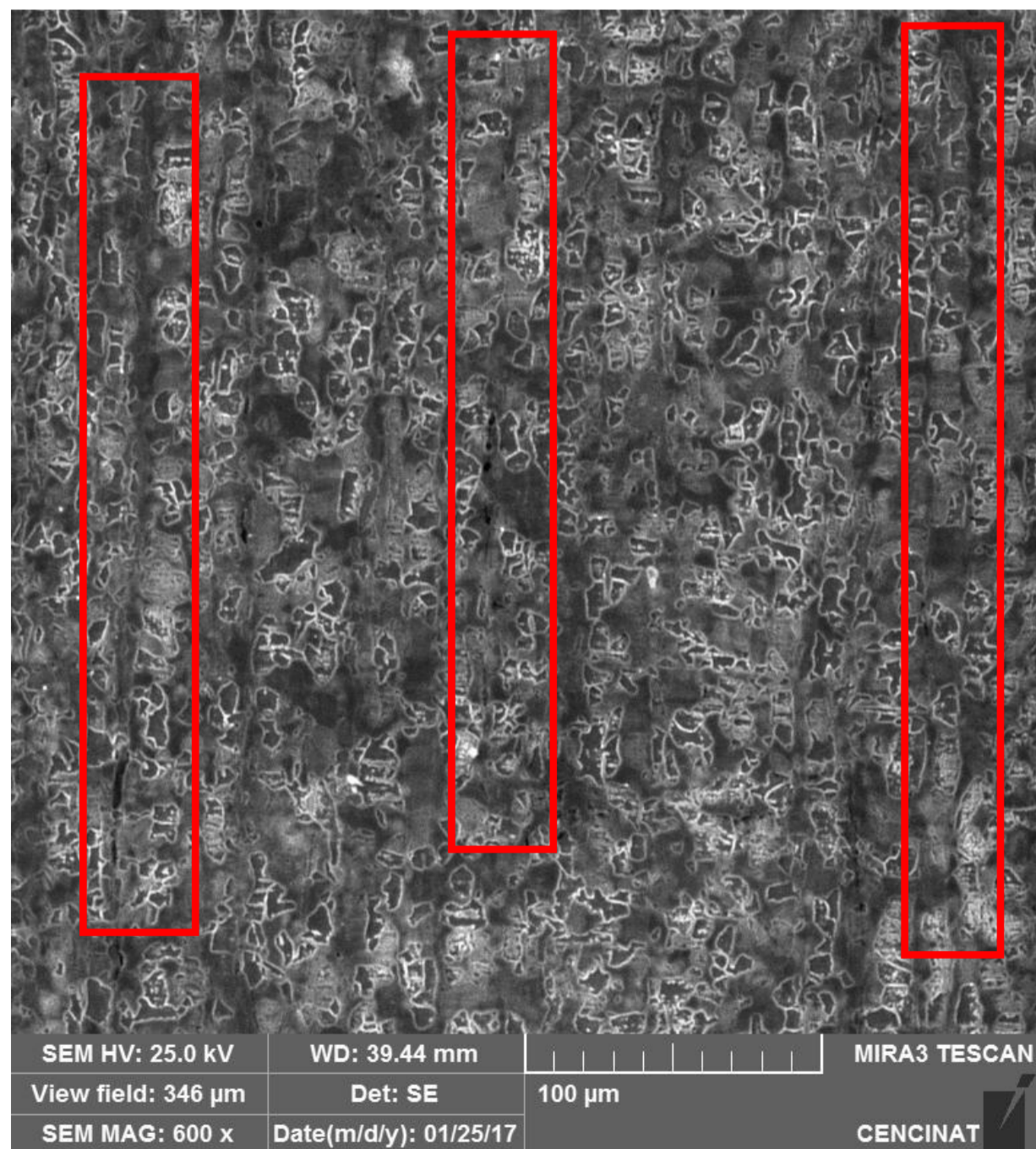
Además por los factores mecánicos del proceso de laminación para la obtención de las varillas de acero de refuerzo, en el análisis de la sección longitudinal de las muestras de 50 milímetros, se detectaron, micro fracturas, Figura 5.70.

FIGURA 5.69: Composición química del acero A706.

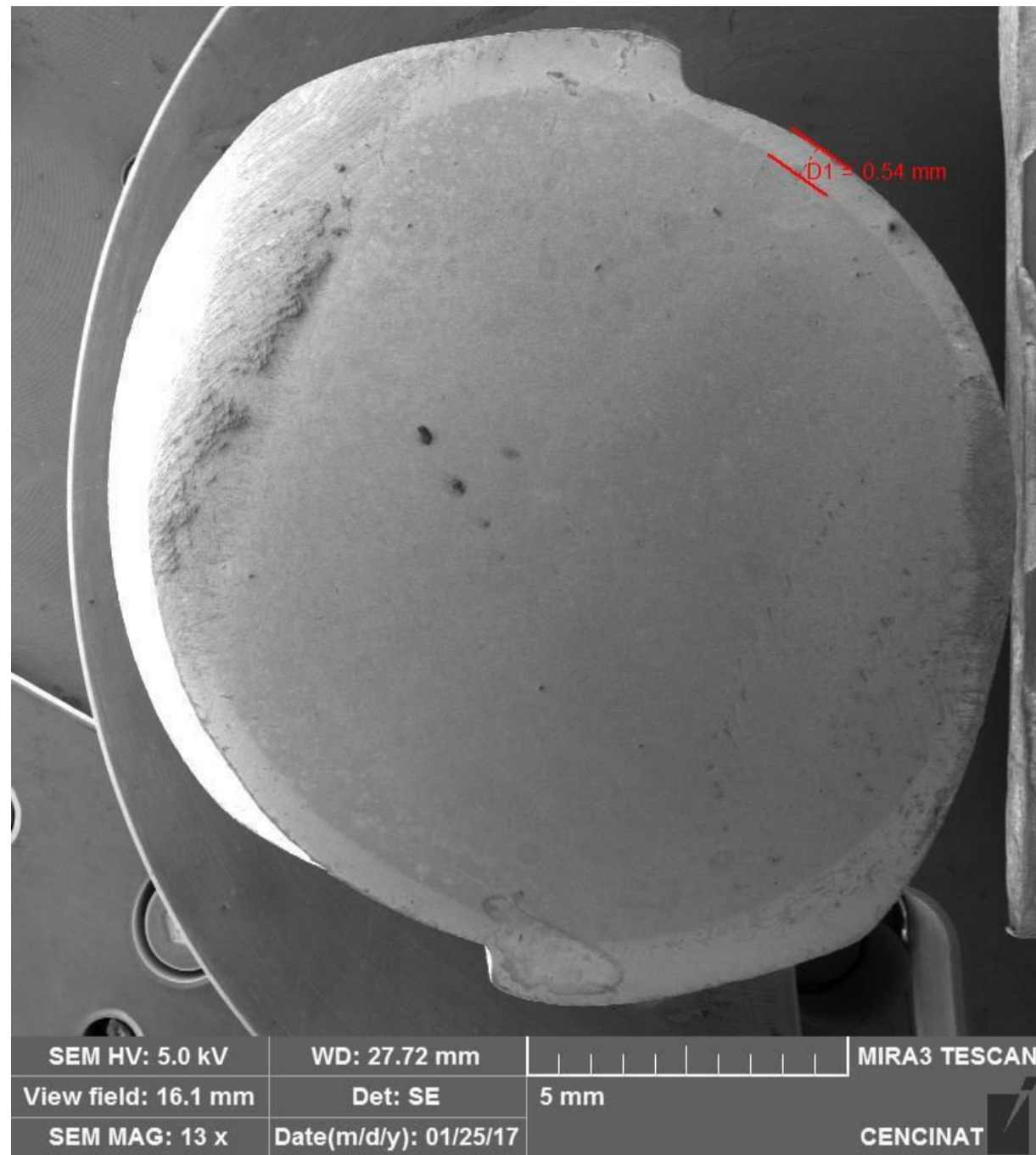


Fuente: Elaborado Laboratorio CECINAT

FIGURA 5.70: Micro fracturas en sentido longitudinal acero A706



Fuente: Elaborado Laboratorio CECINAT

FIGURA 5.71: Anillo de temple acero termotratado

Fuente: Elaborado Laboratorio CECINAT

Adicionalmente se detectó, una variación geométrica en el anillo de temple desde 0.54 hasta 0.99 milímetros de espesor, Figura 5.70.

5.3 ANÁLISIS GLOBAL DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los diferentes tipos de análisis:

- Ensayos mecánicos
 - Resistencia mecánica
 - Elongación y contracción
 - Energía absorbida
 - Ciclos de agotamiento
 - Inicio y propagación de fractura
- Análisis químico metalográfico cualitativo

La variación del comportamiento bajo la acción de cargas cíclicas está relacionado con varios factores entre los que se pueden destacar:

5.3.1 DISPOSICIÓN Y GEOMETRÍA DE LOS RESALTES

Las marcas analizadas tienen una diferente inclinación de los resaltes, Tabla 5.13.

TABLA 5.13: Inclinación de resaltes

Inclinación de resalte
75°
90°
60°

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

La geometría de los resaltes establecida por la (INEN-2167, 2011), excede lo dispuesto hasta en un 60%, siendo estos, concentradores de esfuerzos, Tabla 5.14.

Inclusive en el material base, probetas recocidas, cuando aplican cargas cíclicas, existe predisposición a iniciar su fractura en la base de los resaltes.

TABLA 5.14: Características físicas de las varillas con resaltes para hormigón armado.

Diámetro Nominal (mm)	Dimensiones de los resaltes (mm)			Masa (kg/m)		
	Máximo a	Mínimo b	Máximo c	Nominal d	Máximo e	Mínimo e
8	5,60	0,32	3,10	0,395	0,418	0,371
10	7,00	0,40	3,90	0,617	0,654	0,580
12	8,40	0,48	4,70	0,888	0,941	0,835
14	9,80	0,67	5,50	1,208	1,281	1,136
16	11,20	0,72	6,20	1,578	1,673	1,484
18	12,60	0,88	7,00	1,998	2,117	1,878
20	14,00	1,01	7,80	2,466	2,614	2,318
22	15,40	1,11	8,60	2,984	3,163	2,805
25	17,50	1,26	9,80	3,853	4,085	3,622
28	19,60	1,39	11,00	4,834	5,124	4,544
32	22,40	1,64	12,00	6,313	6,692	5,935
36	25,20	1,84	14,00	7,990	8,470	7,511
40	28,00	1,96	15,70	9,865	10,456	9,273

a) espaciamiento promedio de los resaltes transversales,
b) altura promedio de los resaltes transversales,
c) ancho en la base de los resaltes longitudinales o ancho de la ranura,
d) valor calculado a partir del diámetro nominal, considerando una densidad del acero de 7,85 kg/dm³.
e) límites en la masa por metro para cada una de las unidades de muestreo

Fuente: INEN (INEN-2167, 2011).

TABLA 5.15: Tamaño de los resaltes de las varillas analizadas

Marca	Diámetro [mm]	Altura promedio del resalte [mm]	% de exceso en alto	Ancho promedio del resalte [mm]	% de exceso en ancho	Ensayo estático		Ensayo cíclico	
						% Falla por resalte	% Falla por material	% Falla por resalte	% Falla por material
Rojo	18	1,04	18,18	3,29	-40,18	100,00	0,00	100,00	0,00
	16	1,24	72,22	3,75	-39,52	100,00	0,00	100,00	0,00
	14	0,92	37,31	2,8	-60,00	100,00	0,00	100,00	0,00
Blanco	18	1,33	51,14	4,49	-18,36	66,66	33,33	66,66	33,33
	16	1,06	47,22	4,07	-34,35	66,66	33,33	100,00	0,00
	14	0,73	8,96	3,73	-46,71	100,00	0,00	100,00	0,00
Amarillo	18	1,23	39,77	4,41	-19,82	0,00	100,00	66,66	33,33
	16	1,09	51,39	3,34	-46,13	100,00	0,00	33,33	66,66
	14	1,01	50,75	3,05	-56,43	33,33	66,66	0,00	100,00

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.3.2 FACTORES MECÁNICOS

EL proceso de conformación de las varillas de acero de refuerzo A706, incluye una serie de factores mecánicos que están relacionado directamente con la capacidad de agotamiento del material. Los factores más incidentes son:

- Factor mecánico - laminación, donde al acero se le reduce de sección bruscamente a través de rodillos de laminación, generando imperfecciones o defectos a lo largo de la varilla comercial de 12 metros.
- Factor térmico- tratamiento térmico, no existe uniformidad en el anillo de temple de las varillas termotratadas, produciendo una variación en la cantidad de ciclos de agotamiento.

5.4 MÉTODO DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL PARA EL ACERO A706 BAJO LA ACCIÓN DE CARGAS CÍCLICAS

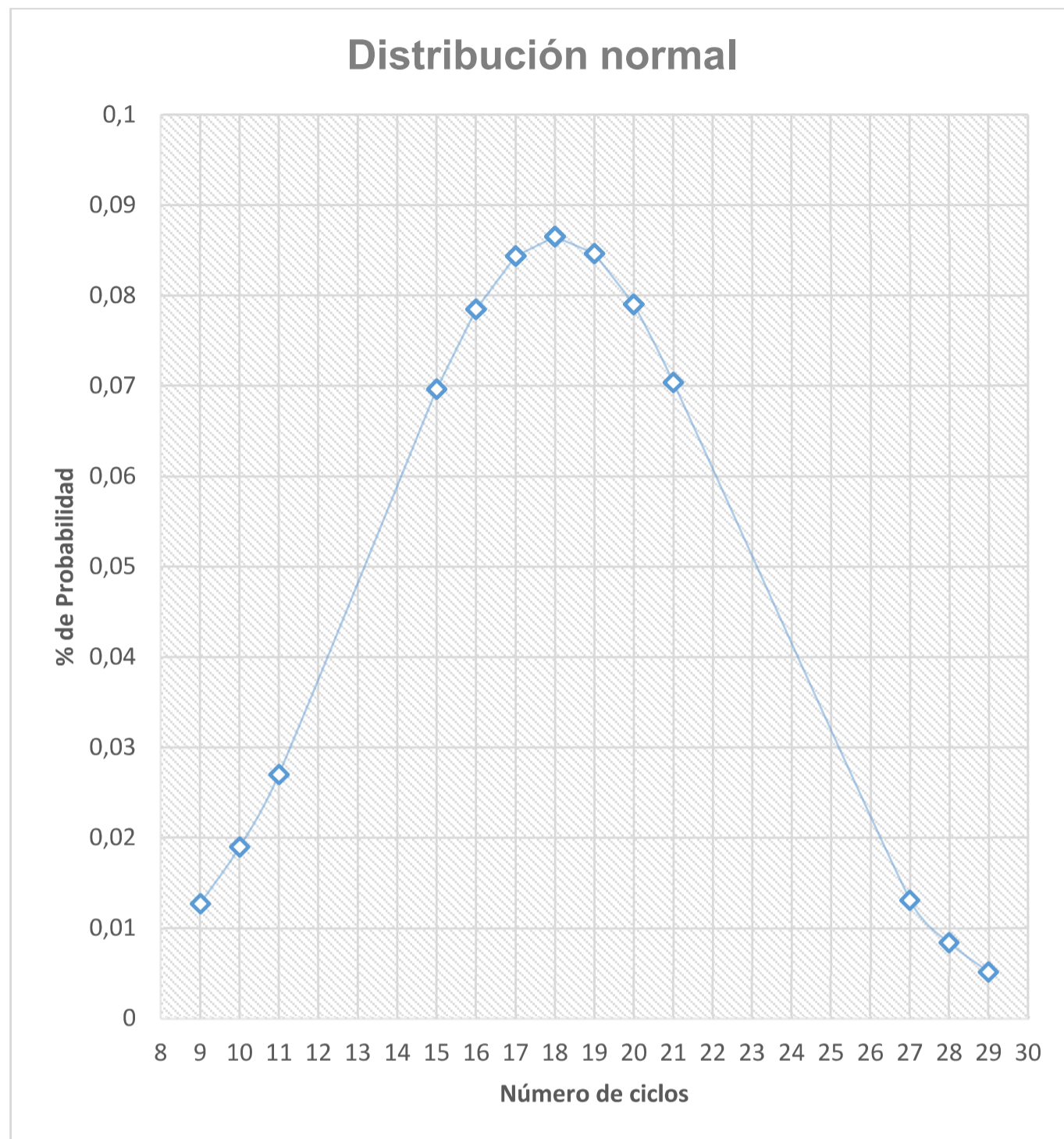
Bajo las mismas condiciones de laboratorio, establecidas por las normas (INEN-0109, 2009) se ha considerado que para establecer un método de evaluación experimental del acero A706 solo se considerarán las probetas estándar, Tabla 5.16, debido a la poca dispersión de resultados en comparación con las soldadas.

Las probetas estándar son las más empleadas en el ámbito estructural. El promedio de agotamiento promedio de las probetas estándar bajo el estado tensional desarrollado en esta investigación es de alrededor de 18 ciclos de carga, considerando deformación plástica por cada ciclo, se ha determinado una distribución normal de probabilidades, Figura 5.74, estableciendo un posible rango de calificación de varillas aptas para elementos estructurales específicos, donde interesa la disipación de energía en un evento sísmico.

TABLA 5.16: Ciclos de agotamiento de la capacidad – probetas estándar

Tipo de probeta	Marca	Diámetro [mm]	Tramo	# ciclos - Cíclico dinámico
Estándar	Rojo	14	Inicial	18
Estándar	Rojo	14	Medio	17
Estándar	Rojo	14	Final	18
Estándar	Blanco	14	Inicial	27
Estándar	Blanco	14	Medio	29
Estándar	Blanco	14	Final	28
Estándar	Amarillo	14	Inicial	17
Estándar	Amarillo	14	Medio	15
Estándar	Amarillo	14	Final	21
Estándar	Rojo	16	Inicial	19
Estándar	Rojo	16	Medio	18
Estándar	Rojo	16	Final	15
Estándar	Blanco	16	Inicial	11
Estándar	Blanco	16	Medio	9
Estándar	Blanco	16	Final	10
Estándar	Amarillo	16	Inicial	20
Estándar	Amarillo	16	Medio	18
Estándar	Amarillo	16	Final	20
Estándar	Rojo	18	Inicial	18
Estándar	Rojo	18	Medio	17
Estándar	Rojo	18	Final	20
Estándar	Blanco	18	Inicial	17
Estándar	Blanco	18	Medio	16
Estándar	Blanco	18	Final	16
Estándar	Amarillo	18	Inicial	18
Estándar	Amarillo	18	Medio	16
Estándar	Amarillo	18	Final	19

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

FIGURA 5.72: Distribución normal de probabilidad de agotamiento de probetas

Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

5.4.1 ENSAYO DE FATIGA DE BAJOS CICLOS EXPERIMENTAL

- El ensayo consiste en someter a las varillas A706 a un esfuerzo axial, cíclico y controlado, entre un valor máximo y otro mínimo, ambos positivos (tracción).
- El ensayo se realizará sobre varillas rectas a las que se aplicará una tensión pulsatoria pero siempre de tracción.
- Las probetas tendrán la sección completa, es decir, no se considera válido el ensayo de probetas mecanizadas.

Las condiciones del ensayo para el acero A706 son los establecidos en la Tabla 5.17.

TABLA 5.17: Método de evaluación de acero A706 bajo la acción de cargas cíclicas

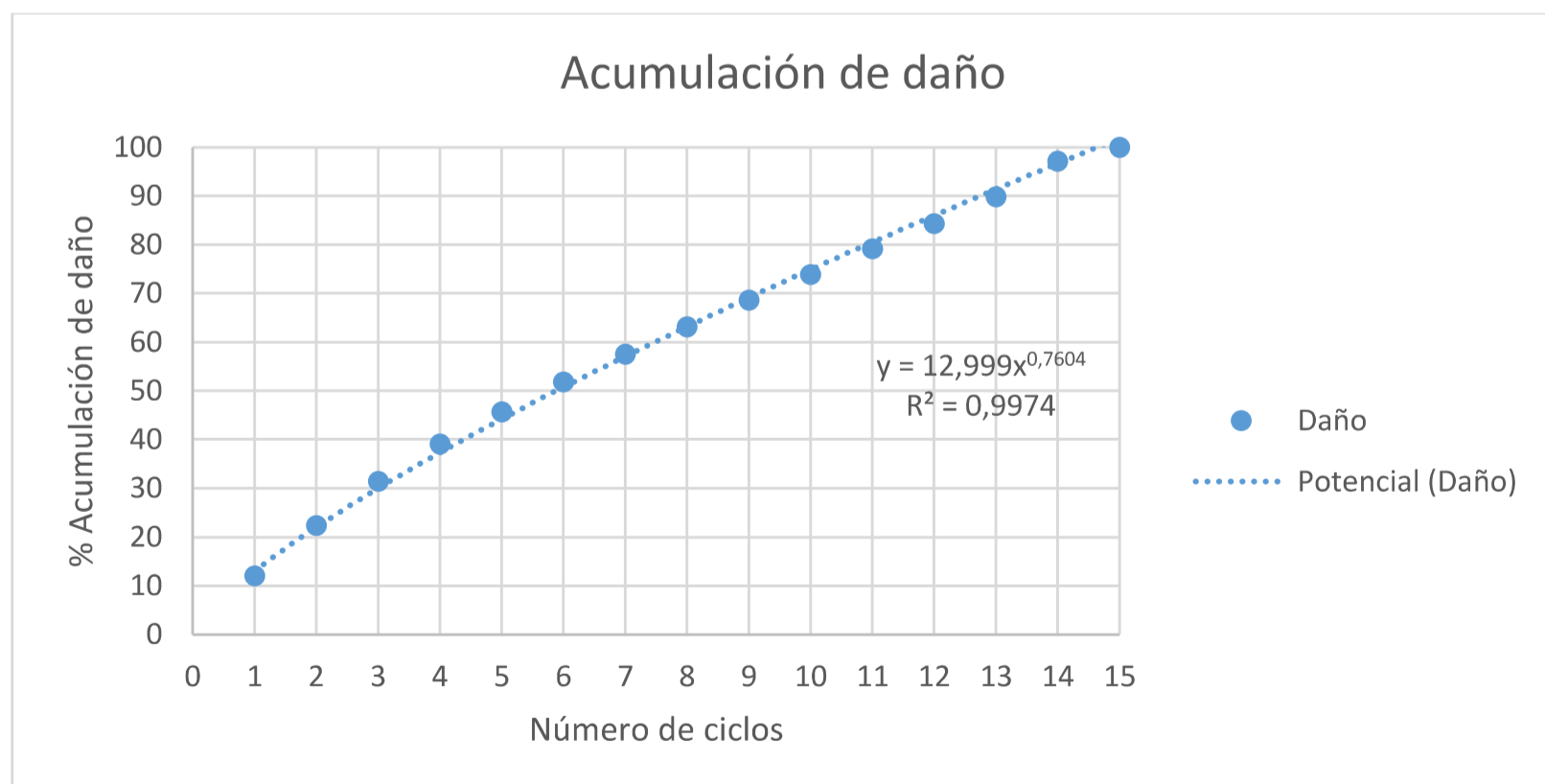
Tensión mínima	1100 kg/cm ²
Amplitud	2900 kg/cm ²
Frecuencia de carga	1Hz
Función de carga	Sinusoidal
Longitud libre entre mordazas	>10 diámetros

Fuente: Lenin Abatta Jácome

5.5 ACUMULACIÓN DE DAÑO

En función de los diagramas histerético por cargas cíclicas, se puede establecer modelos de acumulación de daño en función de los ciclos de carga aplicados, Figura 5.75, en la zona plástica (no lineal) es representado por una función potencial, descrita en el gráfico.

FIGURA 5.73: Acumulación de daño marca rojo



Fuente: Elaborado por Lenin Abatta Jácome

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en esta investigación, muestran la calidad del acero de producción ecuatoriana, determinando una gran dispersión de resultados en el comportamiento mecánico bajo la acción de fatiga de bajos ciclos, por lo que es importante destacar que con este estudio se pretende mejorar la calidad del acero ecuatoriano.
- Se seleccionaron 3 marcas (amarillo, blanco, rojo) para ser analizadas en esta investigación, de las cuales se tomaron 3 diámetros por cada marca, 14, 16 y 18 milímetros, con un total de 9 varillas comerciales de 12 metros que fueron seleccionadas según establece la norma (INEN-2167, 2011).
- De cada varilla se extrajeron 18 probetas de 400 milímetros y 2 de 50 milímetros de longitud, en tres tramos, inicial, medio y final, para los respectivos ensayos prueba-calibración y ensayos oficiales tanto estáticos como cíclicos.
- Los ensayos estáticos fueron realizados en una máquina universal de ensayo, aplicando una carga monotónica en aproximadamente 120 segundos, según lo establecido por la norma (INEN-0109, 2009).
- Las probetas estándar de tres marcas analizadas cumplen satisfactoriamente con los requerimientos establecidos por la norma (INEN-2167, 2011).
- Existe variación de las propiedades mecánicas de las probetas estándar a lo largo de una varilla comercial es de 0.6%, debido a las imperfecciones – defectos en la sección transversal como establece (Rocha, 2014).
- Los ensayos mecánicos cíclicos fueron desarrollados a partir del estado del arte y de la información de las probetas destinadas a prueba y calibración del equipo, agotando la capacidad de las mismas en un promedio de 18 ciclos, con función de carga sinusoidal y frecuencia de aplicación de carga de 1Hz, similar al periodo de vibración de un edificio de 10 pisos de altura.

- Se realizó un análisis de estadística descriptiva donde se determinó que las probetas de las marcas rojo y blanco tienen una tendencia de inicio y propagación de fractura por la base de los resaltes, debido a que estos no cumplen con lo establecido en la (INEN-2167, 2011), excediendo sus dimensiones en función del diámetro.
- El proceso de soldadura se llevó a cabo con soldadores certificados en proceso SMAW, cumpliendo lo establecido en la Norma AWS D1.4 para probetas horizontales.
- El 96% de las probetas soldadas cumplen con los requerimientos de resistencia mecánicas establecidos por la norma (INEN-2167, 2011), pero son en promedio un 25% menos dúctiles que las probetas estándar.
- Las probetas soldadas muestran una elongación de 15, 19 y 23% en los diámetros 14, 16 y 18 milímetros respectivamente, confirmando lo establecido por el soldador certificado que mencionó que hay mayor dificultad en el proceso de soldadura de varillas delgadas, produciéndose más imperfecciones – defectos.
- Las varillas soldadas si bien cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica, no son aptas para ser ubicadas en donde se espera la formación de una rótula plástica, debido a que no tiene la suficiente capacidad de absorber energía, agotando su capacidad en 25% menos que una estándar.
- La variación del comportamiento mecánico de las probetas estándar bajo la acción de cargas cíclicas dinámicas, es debida a los resaltes y al proceso de conformación de las varillas a partir de la materia prima (palanquilla).
- El 70% de las probetas ensayadas por ensayos mecánicos destructivos inician su fractura por la base del resalte, confirmando el estudio realizado por los investigadores (Rocha, 2014) y (Abatta L., 2016).
- Las probetas de la marca amarillo, en los tres diámetros analizados, presentan similares resultados en el ensayo destructivo por acción de cargas cíclicas dinámicas, marcando una tendencia en la separación de los lazos de histéresis.
- La marca amarillo presenta una mayor elongación que las marcas rojo y blanco con un 26%.

- La marca amarillo tiene un mejor comportamiento a fatiga de bajos ciclos que las otras dos marcas.
- Se ha establecido un método experimental para la evaluación de varillas de acero A706 bajo la acción de las cargas cíclicas.

Tensión mínima	1100 kg/cm ²
Amplitud	2900 kg/cm ²
Frecuencia de carga	1Hz
Función de carga	Sinusoidal
Longitud libre entre mordazas	>10 diámetros
Ciclos de agotamiento esperado	18

6.2 RECOMENDACIONES

- Mejorar la calidad del acero de producción ecuatoriana, con el propósito de poseer diseños más confiables que no solo dependen de la habilidad del diseñador sino también de los materiales que utiliza.
- No utilizar varillas soldadas en lugares donde se espera la formación de rótula plástica, si bien las varillas soldadas cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica estas son en promedio 25% menos dúctiles que las varillas sin soldadura.
- Revisar los procesos de obtención del acero de refuerzo A706 con el propósito de disminuir las imperfecciones – defectos en las varillas de producción nacional.
- Las varillas de acero A706 que forman parte de una investigación, no deben tener ninguna deformación plástica, por curvatura u otros, ya que esto afecta directamente a los resultados de la experimentación.
- El corte de las probetas debe ser realizado con discos de abrasión delgados, de tal manera de no afectar la estructura del acero A706.
- Durante el proceso de soldadura se debe limpiar la misma con grata entre pases, con el propósito de eliminar posibles imperfecciones que afectan directamente a las propiedades mecánicas de las varillas de acero A706.

- No soldar las varillas de marca amarillo, ya que mayoritariamente su inicio de fractura es por la ZAC.
- Las varillas destinadas a ser soldadas, no pueden someterse a este proceso por varias ocasiones, ya la ZAC afecta directamente las propiedades de resistencia mecánica del acero de refuerzo A706.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abatta L., A. C. (2016). Analysis of the Fracture of Steel Reinforcing Bars under Low Cycle. *Recent Advances in Biology & Nanotechnology*, 1-3.
- Apostolopoulos. (2008). The effect of ribs on the mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s under low-cycle fatigue. *Materials and Structures*, 991-999.
- Askeland, P. (2006). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: EDAMSA.
- ASTM-A370. (2016). Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero. *American Society for Testing and Materials*, 1-49.
- ASTM-A615. (2016). Especificación estándar para barras de acero al carbono deformadas para refuerzo de hormigón. *American Society for Testing and Materials*, 8.
- ASTM-A706. (2016). Especificación estándar para barras de acero de baja aleación deformadas para refuerzo de hormigón. *American Society for Testing and Materials*, 7.
- ASTM-E606. (2012). Método estándar para pruebas de fatiga con control de deformación. *American Society for Testing and Materials*, 1-16.
- AWS-D1.4. (2005). Structural Welding Code - Reinforcing Steel. *American Welding Society*, 1-84.
- Brown Jeff, K. S. (2000). Low Cycle Fatigue Behavior of Longitudinal Reinforcement in Reinforced Concrete Bridge Columns. *Multidiplinary Center For Earthquake Engineering Research, University of Central Florida*. ISSN 1520-295X, 1-108.
- Hawileth, A. O. (2009). Low-cycle fatigue life behaviour of BS 460B and BS B500B steel reinforcing bars. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 397-407.
- INEN-0109. (2009). Ensayo de tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente. *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN*, 1-43.

- INEN-2167. (2011). VARilla de acero con resaltes, laminadas en caliente, soldables, microaleadas o termotrataadas para hormigón. *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN*, 1-19.
- J.B. Mander, F. P. (1994). LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF REINFORCING STEEL. *ASCE* , 453-468.
- Kashani, B. M. (2015). Influence of inelastic buckling on low-cycle fatigue degradation of reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 664-673.
- Manson S.S., H. G. (2006). *Fatigue and Durability of Structural Materials*. Ohio: ASM International.
- NEC-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*. Ecuador: Norma Ecuatoriana de la Construcción.
- Panthaki. (1991). *Low Cycle Fatigue Behavior og High Strength and Ordinary Reinforcing Steels, Ms-Thesis*. Suny: Buffalo.
- Raman, A. (2006). High Cycle Fatigue (HCF) and Low Cycle Fatigue (LCF). En A. Raman, *MATERIALS SELECTION AND APPLICATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING* (págs. 82-84). Baton Rouge: Industrial Press.
- Rocha, M. (2014). *Fatigue Behaviour of Steel Reinforcement Bars at Very High Number of Cycles*. Lausanne, Suisse: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Romo, D. (28 de Septiembre de 2014). Ecuador demanda 800 mil toneladas de acero . *El telégrafo*, págs. <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/ecuador-demanda-800>
- Schijve, J. (2004). Fatigue Properties of Materials. En J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials* (págs. 115-140). Delft, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Totten, G. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook*. Oregon, USA: Taylor & Francis.
- Triola. (2004). *Estadística*. México: PEARSON.
- UNE-36065EX. (2000). Barras corrugadas de acero soldable con características especiales de ductilidad para armaduras de hormigon armado. *Norma Española Experimental*, 10.
- Zolotorevski. (1976). *Pruebas mecanicas y propiedades de los metales*. Rusia: Mir Moscú.

