



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

AUTORES:

AGUIRRE GUERRERO, CRISTIAN ANTONIO

VELA CASTRO, JAIRO PAÚL

**TEMA: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FATIGA DE BAJOS
CICLOS CON ESFUERZO MEDIO IGUAL A CERO EN VARILLAS
DE ACERO CORRUGADO.**

DIRECTOR: ING. NARANJO, CARLOS

SANGOLQUÍ, 2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, “**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FATIGA DE BAJOS CICLOS CON ESFUERZO MEDIO IGUAL A CERO EN VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**” realizado por los señores **CRISTIAN ANTONIO AGUIRRE GUERRERO** y **JAIRO PAÚL VELA CASTRO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CRISTIAN ANTONIO AGUIRRE GUERRERO** y **JAIRO PAÚL VELA CASTRO** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 21 de abril del 2016

Atentamente,

ING. CARLOS RODRIGO NARANJO GUATEMALA
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CRISTIAN ANTONIO AGUIRRE GUERRERO**, con cédula de identidad N° 1717661647 y **JAIRO PAÚL VELA CASTRO**, con cédula de identidad N° 0401434378 declaramos que este trabajo de titulación "**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FATIGA DE BAJOS CICLOS CON ESFUERZO MEDIO IGUAL A CERO EN VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 21 de abril del 2016

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end, positioned above a solid horizontal line.

CRISTIAN ANTONIO AGUIRRE GUERRERO

CI: 1717661647

A handwritten signature in blue ink, appearing as a series of connected loops and a long horizontal stroke at the end, positioned above a solid horizontal line.

JAIRO PAÚL VELA CASTRO

CI: 0401434378



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CRISTIAN ANTONIO AGUIRRE GUERRERO** y **JAIRO PAÚL VELA CASTRO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FATIGA DE BAJOS CICLOS CON ESFUERZO MEDIO IGUAL A CERO EN VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de abril del 2016

CRISTIAN ANTONIO AGUIRRE GUERRERO

CI: 1717661647

JAIRO PAÚL VELA CASTRO

CI: 0401434378

DEDICATORIA

Este logro conseguido es dedicado principalmente a Dios y a la Virgen Dolorosa que a lo largo de mi vida me han bendecido y cuidado en todo momento.

Se lo dedicado a mis padres Carlos y Cristina, quienes me han educado y guiado correctamente; son la fuerza que me levanta diariamente.

A mi hermana Karla, quien me respalda y cuida incondicionalmente

A mi novia y amiga Mía Vasco, quien me ha apoyado siempre, ella es mi aliento para avanzar y ser mejor persona día a día.

A mi amigo y compañero Paúl Vela, con quien compartimos este logro.

Finalmente se lo dedico a mi querido amigo de 4 patas que ya no está conmigo, Coky quien me acompañó durante 14 años a lo largo de mi formación académica.

Esta meta es también para toda la gente que me quiere, apoya, cree y cada día sigue confiando en mí.

“El límite es el cielo”

Cristian Antonio Aguirre Guerrero.

Dedico este proyecto...

Primeramente a Dios por brindarme la vida, sus bendiciones y jamás desampararme.

A mis padres Polivio y Mireya por ser ejemplo de perseverancia y apoyo en cada momento de mi vida, mis grandes modelos a seguir.

A mis hermanos Andrés, Anita y Salome por el gran apoyo, confianza y compañía a lo largo de mi vida, por sus consejos e inigualable aliento en este proyecto.

A mis dos sobrinitos Emmily y Nicolas por ser la gran inspiración para mí y toda mi familia para seguir adelante siempre.

A mis amigos por tenderme su mano siempre, a Cristian Aguirre por ser el gran amigo a lo largo de mi formación profesional y compañero de proyecto de este gran logro.

A Verónica y Simón por su apoyo incondicional, alentándome siempre a continuar durante toda mi formación.

Con inmenso amor.

Jairo Paúl Vela Castro

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios y a la Virgen Dolorosa por todas sus bendiciones y por darme la oportunidad de alcanzar esta meta.

Agradezco a mis padres Carlos y Cristina, por su tiempo y abnegación a la hora de educarme, por sus consejos, por enseñarme tantas cosas buenas y velar siempre por mi bienestar. Gracias por su amor incondicional.

A mi hermana Karla, por ser mi amiga y apoyo diario, por cuidar de mí siempre.

A mi novia Mía Vasco por ser mi fuerza e inspiración diaria para alcanzar nuevos objetivos y mejorar cada día.

A todos mis amigos con quienes he compartido momentos inolvidables durante toda mi vida. Especialmente agradezco a mi amigo Sebastián Valencia quien me colaboró en la elaboración de los ensayos de este proyecto, esta tesis también es de él.

A mi querido amigo y compañero de tesis Paúl Vela, quien me apoyó durante toda la carrera, gracias por su coraje, comprensión y abnegación para culminar exitosamente este proyecto de titulación.

A toda mi familia, abuelitos, tíos y primos, quienes se preocupan de mí diariamente.

A mi profesor y amigo Lenin quien me ayudó en la elaboración de este proyecto de titulación.

Finalmente a mis amigos de 4 patas, Coky y David Luiz, por el cariño que siempre me brindan.

Cristian Antonio Aguirre Guerrero.

Primeramente quiero agradecer a Dios, por brindarme su protección, sus bendiciones y acompañarme a en todo el camino de mi carrera como estudiante, permitiéndome alcanzar mi formación como profesional de la Ingeniería Mecánica.

A mis Padres Polivio y Mireya, por depositar su entera confianza en mí, en todo momento, y enseñarme que todo obstáculo en esta vida nos deja una lección de la cual aprendemos, siendo todo superable y que nuestros objetivos los podemos alcanzar siempre.

A mis hermanos quienes siempre se preocupan, cuidan y apoyan para alcanzar esta meta y a toda mi familia por ser un pilar muy importante en mi vida.

A mis amigos Andrés y Sebastián con quienes tuve el honor de cursar esta maravillosa carrera y en especial a Renato con quien tuve el honor de conocerlo desde el inicio de mi formación académica, quien ha sido un gran apoyo y amigo hasta el final.

A mi inigualable amigo Cristian Aguirre, quien es y fue un gran apoyo durante nuestra formación profesional, gracias por su amistad y coraje para culminar una etapa de nuestra vida con este proyecto.

Guardo inmensa gratitud a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, por todos los conocimientos brindados a través de mis profesores durante mis estudios universitarios.

Finalmente a mi novia Verónica Bolaños y a mi hijo de 4 patas Simón, por todo el cariño, paciencia y apoyo a lo largo de mi formación

Jairo Paúl Vela Castro

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vii
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT	xxi
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 MARCO INSTITUCIONAL-UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS	1
1.1.1 Quienes Somos	1
1.1.2 Misión	1
1.1.3 Visión.....	1
1.1.4 Principios filosóficos	2
1.1.5 Valores Institucionales.....	3
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	10
1.4 OBJETIVOS	12
1.4.1 Objetivo Táctico.....	12
1.4.2 Objetivo Operacional	12
1.4.3 Objetivo General.....	12
1.4.4 Objetivos Específicos	12
1.5 JUSTIFICACIÓN	13
1.6 ALCANCE DEL PROYECTO	14
CAPÍTULO 2.....	15
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	15
2.1.1 Muestreo.....	15
2.1.2 Condiciones de muestreo.....	15

	x
2.1.3	Muestreo por estratos..... 16
2.1.4	Muestreo aleatorio en estratos..... 17
2.1.5	Afijación de una muestra..... 17
2.1.6	Afijación proporcional 18
2.2	DEFINICIÓN DE FATIGA DE MATERIALES..... 18
2.3	PROCESO DE ROTURA POR FATIGA 20
2.4	DAÑOS DERIVADOS DE LA FATIGA 21
2.5	LEYES Y CURVAS DE WÖHLER..... 23
2.6	FATIGA DE BAJOS CICLOS Y FATIGA DE ALTOS CICLOS 24
2.6.1	Fatiga de Altos Ciclos..... 25
2.6.2	Fatiga de Bajos Ciclos..... 26
2.6.3	Ecuación de Coffin – Manson 28
2.7	MECANIZADO DEL ACERO..... 31
2.7.1	Acero Laminado 31
2.7.2	Acero Forjado 31
2.7.3	Acero Corrugado 32
2.8	PROPIEDADES DE LAS BARRAS DE ACERO A UTILIZAR 33
CAPÍTULO 3..... 36	
DESARROLLO DEL PROYECTO..... 36	
3.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO 36
3.1.1	Número de probetas necesarias en el proyecto..... 36
3.1.2	Definición de la población..... 38
3.1.3	Estratificación de la población 41
3.1.4	Afijación proporcional de la muestra 41
3.1.5	Tamaño de la muestra de cada estrato..... 42
3.1.6	Definición de las muestras 44
3.2	PROCESO DE OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE PROBETAS..... 45
3.3	EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS 55
3.3.1	Calibración de los ensayos en varillas de 12 mm de diámetro. 55
3.3.2	Calibración de los ensayos en varillas de 10 mm de diámetro. 58

3.3.3	Calibración de los ensayos en varillas de 8 mm de diámetro.....	59
3.4	OBTENCIÓN Y TABULACIÓN DE RESULTADOS.....	65
3.4.1	Resultados de los Ensayos para las Varillas marca AMARILLO.....	65
3.4.2	Resultados de los Ensayos para las Varillas marca ROJO.....	67
3.4.3	Resultados de los Ensayos para las Varillas marca BLANCO.....	69
CAPÍTULO 4.....		71
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		71
4.1	VARILLAS MARCA AMARILLO – ESTÁNDAR.....	71
4.1.1	Varillas de 12 milímetros de diámetro.....	71
4.1.2	Varillas de 10 milímetros de diámetro.....	76
4.1.3	Varillas de 8 milímetros de diámetro.....	79
4.2	VARILLAS MARCA AMARILLO – SOLDADAS.....	82
4.2.1	Varillas de 12 milímetros de diámetro.....	82
4.2.2	Varillas de 10 milímetros de diámetro.....	85
4.2.3	Varillas de 8 milímetros de diámetro.....	88
4.3	VARILLAS MARCA ROJO – ESTÁNDAR.....	91
4.3.1	Varillas de 12 milímetros de diámetro.....	91
4.3.2	Varillas de 10 milímetros de diámetro.....	94
4.3.3	Varillas de 8 milímetros de diámetro.....	97
4.4	VARILLAS MARCA ROJO – SOLDADAS.....	100
4.4.1	Varillas de 12 milímetros de diámetro.....	100
4.4.2	Varillas de 10 milímetros de diámetro.....	103
4.4.3	Varillas de 8 milímetros de diámetro.....	106
4.5	VARILLAS MARCA BLANCO – ESTÁNDAR.....	109
4.5.1	Varillas de 12 milímetros de diámetro.....	109
4.5.2	Varillas de 10 milímetros de diámetro.....	112
4.5.3	Varillas de 8 milímetros de diámetro.....	115
4.6	VARILLAS MARCA BLANCO – SOLDADAS.....	118
4.6.1	Varillas de 12 milímetros de diámetro.....	118
4.6.2	Varillas de 10 milímetros de diámetro.....	121

4.6.3	Varillas de 8 milímetros de diámetro.	124
4.7	ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS	127
4.8	TABLAS RESUMEN.....	129
4.8.1	Tablas Resumen de las varillas Estándar.	129
4.8.2	Tablas Resumen de las varillas Soldadas.	132
4.8.3	Gráficas para los diámetros de 12mm de las tres marcas Estándar.	135
4.8.4	Gráficas para los diámetros de 10mm de las tres marcas Estándar.	136
4.8.5	Gráficas para los diámetros de 8mm de las tres marcas Estándar.	137
4.8.6	Gráficas para los diámetros de 12mm de las tres marcas Soldadas.....	138
4.8.7	Gráficas para los diámetros de 10mm de las tres marcas Soldadas.....	139
4.8.8	Gráficas para los diámetros de 8mm de las tres marcas Soldadas.....	140
4.9	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	141
CAPÍTULO 5.....		148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		148
5.1	CONCLUSIONES.....	148
5.2	RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFÍA.....		151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diámetros mínimos y máximos de las varillas de refuerzo	33
Tabla 2: Distribución de varillas y tipos de ensayo a realizar	38
Tabla 3: Volumen de ventas de las principales productoras nacionales de varillas de acero corrugado	39
Tabla 4: Principales distribuidores comerciales de varillas de acero corrugado de producción nacional en la ciudad de Quito.....	40
Tabla 5 Afijación proporcional de la muestra.....	42
Tabla 6: Tamaño de muestras de cada marca	44
Tabla 7: Distribuidores Comerciales seleccionados	45
Tabla 8: Medida de probetas según diámetro de varilla.....	47
Tabla 9: Datos de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Estándar	65
Tabla 10: Datos de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Soldadas.....	66
Tabla 11: Datos de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Estándar .	67
Tabla 12: Datos de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Soldadas	68
Tabla 13: Datos de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Estándar	69
Tabla 14: Datos de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Soldadas.....	70
Tabla 15: Datos Resumen de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Estándar	129
Tabla 16: Datos Resumen de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Estándar	130
Tabla 17: Datos Resumen de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Estándar	131
Tabla 18: Datos Resumen de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Soldada.....	132

Tabla 19: Datos Resumen de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Soldada.....	133
Tabla 20: Datos Resumen de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Soldada.....	134
Tabla 21: Resumen de Resultados obtenidos en el Estudio de Fatiga de bajos ciclos	141
Tabla 22: Promedios de Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por las varillas	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto Bauschinger ante carga cíclica.....	7
Figura 2: Diagrama de Esfuerzo Deformación ante carga cíclica (Stress-Strain)	8
Figura 3: Ciclo histerético y diagrama de endurecimiento por carga cíclica.....	9
Figura 4: Ciclo histerético y diagrama de reblandecimiento por carga cíclica	9
Figura 5: Muestra dividida por estratos	16
Figura 6: Diagrama de esfuerzo en fatiga, Esfuerzo medio no igual a cero	19
Figura 7: Diagrama de esfuerzo en fatiga, Esfuerzo medio igual a cero	20
Figura 8: Proceso de rotura por fatiga	21
Figura 9: Ciclo abierto de histéresis – Tensión vs Deformación.....	22
Figura 10: Curva de Wöhler, diagrama típico de fatiga (S – N)	23
Figura 11: Curva de Wöhler	24
Figura 12: Gráfica de vida útil y fatiga propuesta por Brown, 1998	25
Figura 13: Gráficas de fatiga de bajos ciclos. a) Endurecimiento por deformación cíclica. b) Ablandamiento por deformación cíclica	27
Figura 14: Gráfica que muestra el rango de deformación total, incluidas la deformación plástica y elástica	29
Figura 15: Especificaciones Mecánicas	32
Figura 16: Propiedades de las varillas de acero corrugado marca Blanco	34
Figura 17: Propiedades de las varillas de acero corrugado marca Amarillo	34
Figura 18: Propiedades de las varillas de acero corrugado marca Rojo	35
Figura 19: Distancia entre mordazas necesaria para evitar el pandeo en compresión.....	47
Figura 20: Probetas Estándar finales, marcas Amarillo ($\varnothing 8$ mm), Blanco ($\varnothing 10$ mm) y Rojo ($\varnothing 12$ mm).....	48
Figura 21: Probetas Estándar finales, marcas Amarillo y Blanco ($\varnothing 10$ mm).....	48
Figura 22: Probetas Estándar finales, marcas Rojo ($\varnothing 8$ mm)	49
Figura 23: Especificaciones de Procedimiento de Soldadura (WPS), página 1	50
Figura 24: Especificaciones de Procedimiento de Soldadura (WPS), página 2	51
Figura 25: Probetas Amarillo y Rojas ($\varnothing 12$ mm), previo a ser soldadas.....	52
Figura 26: Proceso de soldadura probeta marca Amarillo ($\varnothing 12$ mm)	53

Figura 27: Probeta Soldada marca Amarillo (\varnothing 12 mm).....	53
Figura 28: Probetas Soldadas marcas Amarillo, Rojo y Blanco (\varnothing 8 mm).....	54
Figura 29: Tabla de Requisitos para longitud libre y deformación en ensayos de cargas dinámicas	56
Figura 30: Imagen de los controladores programables de la máquina universal de ensayos MTS.....	56
Figura 31: Medición del desplazamiento del pistón por medio de un reloj comparador	57
Figura 32: Panel de control de la Máquina universal de ensayos MTS.....	60
Figura 33: Imagen de las mordazas empleadas en los Ensayos de Fatiga de bajos ciclos	60
Figura 34: Montaje de varilla previo al ensayo de fatiga de bajos ciclos	61
Figura 35: Obtención de Termografías el momento de los ensayos en las varillas de acero corrugado	61
Figura 36: Graficador de la Máquina MTS, obtención de gráficas de histéresis	62
Figura 37: Rotura de la varilla al finalizar el ensayo	62
Figura 38: Varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro ensayadas en las dos condiciones establecidas: Estándar y Soldadas.....	63
Figura 39: Varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro ensayadas en las dos condiciones establecidas: Estándar y Soldadas.....	63
Figura 40: Varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro ensayadas en las dos condiciones establecidas: Estándar y Soldadas.....	64
Figura 41: Gráfica del ciclo de histéresis, Primer ensayo, varilla de acero corrugado marca AMARILLO, diámetro 12 mm.....	71
Figura 42: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Segundo ensayo Estándar, Marca AMARILLO. (\varnothing 12 mm).....	73
Figura 43: Proceso de obtención del desplazamiento del pistón mediante reloj comparador ..	74
Figura 44: Gráfica del ciclo de histéresis, Segundo ensayo, varilla de acero corrugado marca AMARILLO, diámetro 10 mm.....	76
Figura 45: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Segundo ensayo Estándar, Marca AMARILLO. (\varnothing 10 mm).....	77
Figura 46: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca AMARILLO, diámetro 8 mm.....	79
Figura 47: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Cuarto ensayo Estándar, Marca AMARILLO. (\varnothing 8 mm)	80

Figura 48: Gráfica del ciclo de histéresis, Tercer ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca AMARILLO, diámetro 12 mm	82
Figura 49: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Tercer ensayo - Soldada, Marca AMARILLO. (\varnothing 12 mm).....	83
Figura 50: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca AMARILLO, diámetro 10 mm	85
Figura 51: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Cuarto ensayo Soldada, Marca AMARILLO. (\varnothing 10 mm)	86
Figura 52: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca AMARILLO, diámetro 8 mm	88
Figura 53: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Cuarto ensayo Soldada, Marca AMARILLO. (\varnothing 8 mm)	89
Figura 54: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca ROJO, diámetro 12 mm	90
Figura 55: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Cuarto ensayo Estándar, Marca Rojo. (\varnothing 12 mm)	92
Figura 56: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca ROJO, diámetro 10 mm	94
Figura 57: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Cuarto ensayo Estándar, Marca ROJO. (\varnothing 10 mm).....	95
Figura 58: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado marca ROJO, diámetro 8 mm	97
Figura 59: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Sexto ensayo Estándar, Marca ROJO. (\varnothing 8 mm)	98
Figura 60: Gráfica del ciclo de histéresis, Segundo ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca ROJO, diámetro 12 mm.....	100
Figura 61: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Segundo ensayo - Soldada, Marca ROJO. (\varnothing 12 mm).....	101
Figura 62: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca ROJO, diámetro 10 mm.....	103
Figura 63: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Sexto ensayo - Soldada, Marca ROJO. (\varnothing 10 mm)	104
Figura 64: Gráfica del ciclo de histéresis, Quinto ensayo, varilla de acero corrugado - Soldada marca ROJO, diámetro 8 mm.....	106

Figura 65: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Quinto ensayo – Soldada, Marca ROJO. ($\varnothing 8$ mm)	107
Figura 66: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado marca BLANCO, diámetro 12 mm	109
Figura 67: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Sexto ensayo Estándar, Marca BLANCO. ($\varnothing 12$ mm)	110
Figura 68: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca BLANCO, diámetro 10 mm	112
Figura 69: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Cuarto ensayo Estándar, Marca BLANCO. ($\varnothing 10$ mm).....	113
Figura 70: Gráfica del ciclo de histéresis, Primer ensayo, varilla de acero corrugado marca BLANCO, diámetro 8 mm	115
Figura 71: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Primer ensayo Estándar, Marca BLANCO. ($\varnothing 8$ mm).....	116
Figura 72: Gráfica del ciclo de histéresis, Primer ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca BLANCO, diámetro 12 mm.....	118
Figura 73: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, primer ensayo - Soldada, Marca BLANCO. ($\varnothing 12$ mm)	119
Figura 74: Gráfica del ciclo de histéresis, Tercer ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca BLANCO, diámetro 10 mm.....	121
Figura 75: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Tercer ensayo - Soldada, Marca BLANCO. ($\varnothing 10$ mm)	122
Figura 76: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca BLANCO, diámetro 8 mm.....	124
Figura 77: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo de Tenacidad, Sexto ensayo - Soldada, Marca BLANCO. ($\varnothing 8$ mm)	125
Figura 78: Análisis de los fenómenos ocurridos en una gráfica de histéresis	128
Figura 79: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo	135
Figura 80: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo	135
Figura 81: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo	136
Figura 82: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo	136

Figura 83: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo	137
Figura 84: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo	137
Figura 85: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo	138
Figura 86: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo	138
Figura 87: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo	139
Figura 88: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo	139
Figura 89: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo	140
Figura 90: Gráfica comparativa de la Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo	140
Figura 91: Diagrama de Barras comparativo entre marcas y diámetros ensayados. Número de ciclos soportados a fatiga	142
Figura 92: Diagrama de Barras comparativo entre marcas y diámetros ensayados. Promedio de Fuerza máxima en Tracción	144
Figura 93: Diagrama de Barras comparativo entre marcas y diámetros ensayados. Promedio de Fuerza máxima en Compresión.....	145
Figura 94: Diagrama de Barras comparativo de marcas ensayadas. Promedio de Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por las varillas.....	146

RESUMEN

El Ecuador es un país de alto riesgo sísmico, el cual se ha visto afectado por fenómenos de este tipo en más de una ocasión generando cuantiosas pérdidas de vidas humanas y materiales debido al colapso de edificaciones, producto de la utilización de diseños y materiales inadecuados en las estructuras que soportan una construcción civil. Un fenómeno telúrico genera fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero en las varillas de acero corrugado existentes en las bases de las columnas y vigas de una edificación, quienes tiene como objetivo reforzar longitudinalmente a la estructura de hormigón armado existente y también son el medio de disipación de energía el momento de ocasionarse un sismo, evitando así que la estructura total colapse. Este proyecto analiza el comportamiento en presencia de fatiga de bajos ciclos de las varillas de acero corrugado de producción nacional, en tres diferentes diámetros (12 mm, 10 mm y 8 mm) conociendo así la manera en cómo estas se afectan debido a un sismo y obteniendo finalmente su capacidad de carga.

PALABRAS CLAVE

SISMO

FATIGA

ESTRUCTURA

ESFUERZO

VARILLA

ABSTRACT

Ecuador is a country prone to a high seismic risk, which has been affected by phenomena of this kind on more than one occasion causing heavy loss of human lives and material due to buildings collapsing, consequently from the inadequate use of designs and materials structures that support a civil construction. A telluric or terrestrial phenomenon generates low cycle fatigue with near to average effort that equal to zero on existing roads in the bases of the columns and beams of a building, this aims to strengthen longitudinally to the existing structure of reinforced concrete corrugated steel and are also the medium of energy dissipation when an earthquake arises, thereby preventing the whole structure to collapse. This project analyzes the behavior in the presence of low cycle fatigue rod and corrugated steel of domestic production, in three different diameters (12 mm, 10 mm and 8 mm) and knowing the way how these are affected due to an earthquake and finally getting its load capacity.

KEY WORDS

EARTHQUAKE

FATIGUE

STRUCTURE

ESFUERZO

STRAIN

ROD

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 MARCO INSTITUCIONAL-UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

1.1.1 Quienes Somos

La Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, como parte del Sistema de Educación Superior, es una institución con personería jurídica, autonomía administrativa y patrimonio propio, de derecho público, con domicilio en la ciudad de Quito y sede matriz en la ciudad de Sangolquí; se rige por la Constitución de la República del Ecuador, la Ley Orgánica de Educación Superior y su reglamento; otras leyes conexas; su Estatuto aprobado por el Consejo de Educación Superior - CES y los reglamentos internos expedidos de acuerdo con la ley.

(Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013)

1.1.2 Misión

“Formar académicos y profesionales de excelencia; generar, aplicar y difundir el conocimiento y, proponer e implementar alternativas de solución a problemas de interés público en sus zonas de influencia.” (Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013)

1.1.3 Visión

“Líder en la gestión del conocimiento y de la tecnología en el Sistema de Educación Superior, con reconocimiento Internacional y referente de práctica de valores éticos, cívicos y de servicio a la sociedad.” (Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013)

1.1.4 Principios filosóficos

- 1 La Institución se debe a la nación ecuatoriana; a ella orienta todo su esfuerzo contribuyendo a la solución de sus problemas mediante la formación profesional y técnica, la investigación, el estudio y planteamiento de soluciones para los problemas del país.
- 2 La Institución es abierta a todas las corrientes del pensamiento universal, sin proselitismo político ni religioso.
- 3 La autonomía responsable, cogobierno, igualdad de oportunidades, calidad, pertinencia, integralidad y autodeterminación para la producción del pensamiento y conocimiento en el marco del diálogo de saberes, pensamiento universal y producción científica - tecnológica global.
- 4 La búsqueda permanente de la excelencia a través de la práctica de la cultura de la calidad en todos sus actos.
- 5 La formación consciente, participativa y crítica con libertad académica y rigor científico, que comprenda y respete los derechos fundamentales del ser humano y de la comunidad.
- 6 El cultivo de valores morales, éticos y cívicos, respetando los derechos humanos con profunda conciencia ciudadana, coadyuva a la búsqueda de la verdad y forma hombres y mujeres de honor, libres y disciplinados.
- 7 El mantenimiento de las bases históricas de la identidad nacional para incrementar el orgullo de lo que somos y así proyectamos al futuro.
- 8 La conservación, defensa y cuidado del medio ambiente y el racional aprovechamiento de los recursos naturales;
- 9 La práctica de los valores tradicionales de orden, disciplina, lealtad, justicia, gratitud y respeto, en el contexto de la responsabilidad, la honestidad, el autocontrol, la creatividad, el espíritu democrático, la solidaridad y la solución de los problemas mediante el diálogo y la razón.

(Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013)

1.1.5 Valores Institucionales

La conducta de todos y cada uno de los miembros de la comunidad universitaria, se mantendrá siempre bajo la práctica de los valores institucionales que se puntualizan a continuación:

- a. Honestidad a toda prueba.
- b. Respeto a la libertad de pensamiento.
- c. Orden, puntualidad y disciplina conscientes.
- d. Búsqueda permanente de la calidad y la excelencia.
- e. Igualdad de oportunidades.
- f. Respeto a las personas y los derechos humanos.
- g. Reconocimiento a la voluntad, creatividad y perseverancia.
- h. Práctica de la justicia, solidaridad y lealtad.
- i. Práctica de la verdadera amistad y camaradería.
- j. Cultivo del civismo y respeto al medio ambiente.
- k. Compromiso con la institución y la sociedad.
- l. Identidad institucional.
- m. Liderazgo y emprendimiento.
- n. Pensamiento crítico.
- o. Alta conciencia ciudadana.

(Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013)

1.2 ANTECEDENTES

En la actualidad el reforzamiento de estructuras se ha vuelto muy importante, esto se debe a que desde hace muchos años atrás se han producido sismos cada vez mayores según la escala de Richter, lo que ha generado temblores, terremotos y tsunamis en diversas partes alrededor del mundo.

Hablando de nuestro país específicamente, el Ecuador cuenta con un alto riesgo sísmico debido a que se encuentra ubicado en el denominado Cinturón

de Fuego del Pacífico, zona en la cual interactúan la placa oceánica Nazca y la placa continental Sudamericana.

A lo largo de la historia ecuatoriana se han registrado varias tragedias producto de fenómenos naturales de este tipo, causando así cuantiosas pérdidas humanas y materiales. Por mencionar ejemplos sísmicos acontecidos se tiene en el año 1949 el conocido terremoto de Ambato, en el que se registró un valor de 6000 vidas humanas perdidas. Y en el año 1987 ocurrió un fuerte movimiento telúrico cuyo epicentro se registró en las profundidades del volcán Reventador. Existiendo aún más ejemplos de tragedias nacionales producidas por fenómenos sísmicos, alcanzando magnitudes de hasta 6.9 grados en la escala sismológica de Richter.

Es conveniente aclarar conceptos fundamentales que se desenvuelven en el presente proyecto, partiendo de “sismo” que es el que genera el fenómeno de fatiga a bajos ciclos en los aceros de refuerzo de las bases de las columnas del primer piso y en las vigas, los cuales serán agotados por flexión y compresión simultánea. Un sismo es definido como:

Se denomina sismo o terremoto a las sacudidas o movimientos bruscos del terreno producidos en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra o a la tectónica de placas. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones.

(Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica)

Una vez definido el término sismo, es esencial mencionar una pequeña introducción sobre fatiga de bajo número de ciclos, según (Porras Navarro González, López López, & Rozado Tamariz):

La fatiga de bajos ciclos es controlada por el nivel de deformación más que por el nivel de esfuerzos, la corta vida de las estructuras o componentes tiene como influencia el efecto

de la deformación plástica que frecuentemente acompaña a la fatiga de bajos ciclos. Muchas fallas por fatiga ocurren cuando el número de ciclos de carga es relativamente bajo y el valor del esfuerzo de trabajo es importante. La curva de comportamiento esfuerzo deformación de una prueba monotónica puede ser muy diferente de la obtenida de una prueba bajo carga cíclica.

Debido a estos fenómenos descritos existentes en nuestro ambiente y uno producto del otro, los cuales generan fallos y problemas en las varillas de acero corrugado comúnmente utilizadas en construcciones de hormigón armado, producen cargas dinámicas (momentos reversibles) es decir fatigan en bajos ciclos el acero de las bases de las columnas del primer piso y vigas de las edificación, generando el agotamiento de los miembros estructurales produciendo un posible colapso parcial o total de la construcción.

Acerca de estudios realizados en el ámbito sísmico el cual genera fatiga en los materiales empleados en la construcción de edificaciones, existe el estudio realizado sobre fatiga en varillas de acero corrugado de producción nacional cuyo tema es “Fatiga de bajos ciclos en varillas de acero corrugado ASTM A706”, realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en cuyo estudio se analizó fatiga de bajos ciclos en tensión y se obtuvo los siguientes resultados: un comportamiento diferente en número de ciclos entre las diferentes marcas. Siendo este el punto inicial a estudios de fatiga de bajos ciclos. Cabe recalcar que el estudio mencionado no fue realizado en presencia de esfuerzo medio cero.

Con el paso del tiempo surge la necesidad de emplear mejores materiales en la industria de la construcción. Esto ha llevado a realizar estudios sobre el comportamiento de las varillas de acero corrugado usadas en vigas como refuerzo longitudinal en las construcciones de edificaciones, es importante realizar estos estudios ya que ante un sismo de magnitud fuerte se podría producir fatiga de bajos ciclos.

Se han realizado otros estudios en varillas de acero corrugado sometidas a fatiga de bajos ciclos inducidos por efectos sísmicos. Muchas fallas por fatiga ocurren cuando el número de ciclos de carga es relativamente bajo y el valor del esfuerzo de trabajo es importante.

Cécile Lacaze (Enero 2009), en su tesis “ESTUDIO Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DEL PANDEO EN LA FATIGA DE BAJOS CICLOS EN BARRAS LONGITUDINALES PARA HORMIGÓN ARMADO”, hace referencia a lo que es la fatiga de bajos ciclos, así:

Al someter barras de refuerzo a ciclos tracción - compresión, como ocurre en columnas de hormigón armado, se producen deformaciones que en algunos casos pueden sobrepasar el nivel elástico. En algunos casos estas deformaciones pueden localizarse, formando zonas plásticas, induciendo daños irreversibles en la estructura.

Varios modelos matemáticos han sido desarrollados con estos fines. Estos tienen como objetivo relacionar las deformaciones impuestas y el número de ciclos antes de la ruptura, basados en resultados experimentales: en la amplitud de deformación plástica o total, o en la energía disipada.

Para el estudio de estos fenómenos se debe enfocar los análisis a la curva Esfuerzo-Deformación, Según (David Porras Navarro González, Alberto López López, Erik Rosado Tamariz) en su trabajo titulado “ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CONSIDERANDO FATIGA DE BAJOS CICLOS”. Hablan de esta curva llamadas “curvas de Bauschinger”, en donde se explica lo siguiente:

El comportamiento histerético (curvas de Bauschinger) indica que el esfuerzo de fluencia en tensión o compresión decrece después de aplicar una carga de signo opuesto a la que causó una deformación inelástica (Fig. 1), es decir, que un solo ciclo en el que se alcanzan deformaciones inelásticas se

modifica el comportamiento de la curva esfuerzo -deformación. La deformación total está constituida por dos componentes (Fig. 2), una deformación elástica y una deformación plástica lo cual se puede expresar como:

$$\Delta_{\varepsilon} = \Delta_{\varepsilon_e} + \Delta_{\varepsilon_p} \quad (1)$$

Donde:

Δ_{ε} = Rango de deformación total

Δ_{ε_e} = Rango de deformación elástica

Δ_{ε_p} = Rango de deformación plástica

Los efectos de Bauschinger citados en el texto para esfuerzos de fatiga a bajos ciclos son:

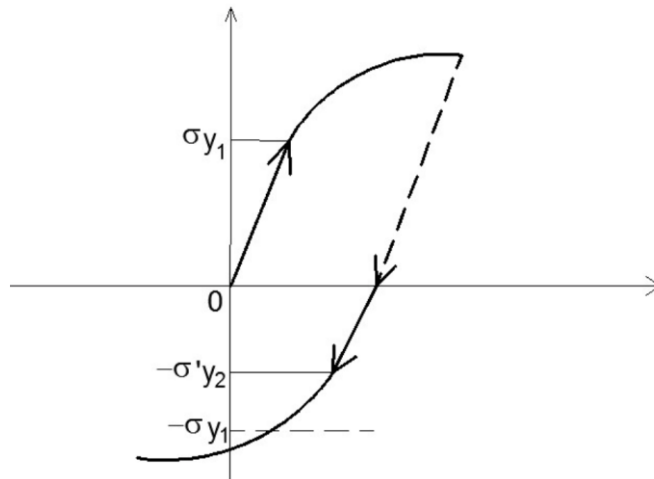


Figura 1: Efecto Bauschinger ante carga cíclica
(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

De la cual se puede obtener la curva esfuerzo-deformación para fatiga de bajos ciclos,

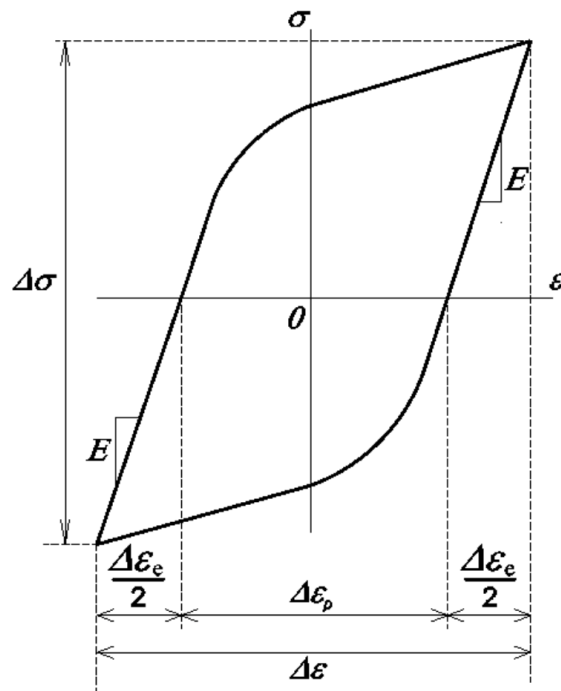


Figura 2: Diagrama de Esfuerzo Deformación ante carga cíclica (Stress-Strain).

(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

En la *Figura 2* observa para un solo ciclo; en el caso de fatiga de bajos ciclos se considera a 40 ciclos o menos. La curva mantendrá una forma semejante pero variará los valores del esfuerzo aplicado, como se indica a continuación para los casos de endurecimiento y reblandecimiento.

En la *Figura 3* se muestra un caso de fatiga por endurecimiento teniendo así el diagrama esfuerzo-deformación, como también el diagrama esfuerzo-tiempo.

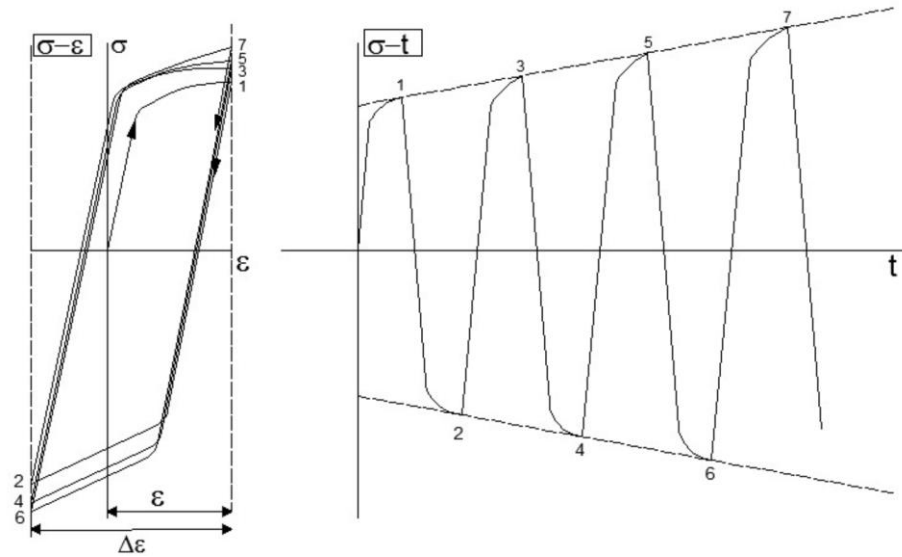


Figura 3: Ciclo histerético y diagrama de endurecimiento por carga cíclica.

(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

En tanto que en la *Figura 4* se tiene un caso de fatiga por reblandecimiento teniendo así el diagrama esfuerzo-deformación, como también el diagrama esfuerzo-tiempo.

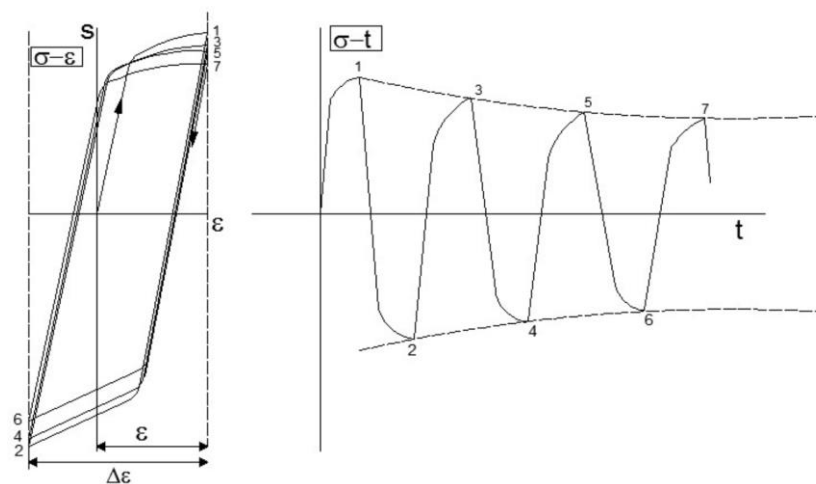


Figura 4: Ciclo histerético y diagrama de reblandecimiento por carga cíclica.

(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

Se han realizado pocos ensayos experimentales de fatiga de bajo número de ciclos para varillas de acero usadas como refuerzo: Mander et al. (1994) y Brown (1999) realizaron ensayos de fatiga de bajo ciclos y estos consideraron barras de acero geoméricamente perfectas.

Cécile Lacaze (Enero 2009), en su tesis “ESTUDIO Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DEL PANDEO EN LA FATIGA DE BAJOS CICLOS EN BARRAS LONGITUDINALES PARA HORMIGÓN ARMADO”, hace referencia a:

Trabajos como el de El-Bahy y Kunnath (1999), el de Chang y Mander (1994) estudiaron la fatiga de bajo ciclo en columnas circulares de hormigón armado bajo ciclos de amplitud de deformación constante, y de amplitud de deformación variable. Estos destacan tres posibles causas de falla:

- *Pandeo de las barras longitudinales,*
- *Ruptura de los estribos y descascaramiento del hormigón,*
- *Fatiga de bajo ciclos.*

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Ecuador es un país de alto riesgo sísmico como se mencionó anteriormente en la sección de antecedentes, y actualmente no se cuenta con la información adecuada de los efectos y daños que un sismo provoca a los materiales que conforman una edificación. Principalmente enfocado a la fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero (tracción y compresión del mismo valor), que se suscita en las bases de las columnas del primer piso y en las vigas de una edificación.

Es importante tomar en cuenta las posibles pérdidas humanas y materiales que provocan los sismos al generar un colapso de una edificación cualquiera, y por ello se cree conveniente analizar el comportamiento de las varillas de acero corrugado que se encuentran en las columnas y vigas de las edificaciones ya que si éstas fallan, la edificación colapsará totalmente.

El punto de partida inicial del presente proyecto es la no existencia de información referente al fenómeno de fatiga de bajo ciclos con esfuerzo medio igual a cero que ocurre en la estructura total de una edificación producto de un

sismo. Al ocurrir un sismo, el fenómeno de fatiga de bajos ciclos generado es aplicado en las varillas de acero corrugado que cumplen la función de refuerzo longitudinal en las columnas base y en las vigas que son el medio de disipación de energía de una edificación. Por tanto se busca obtener características e información de las varillas de acero corrugado ante el fenómeno mencionado y conocer cómo reaccionan, cuáles son sus capacidades y obtener sus propiedades mecánicas dinámicas.

Por ello, es conveniente la caracterización del comportamiento ante cargas dinámicas de las varillas de acero corrugado de producción nacional existentes en el mercado local para conocer su posible comportamiento en eventos sísmicos.

Es por esto que el punto focal del problema es la inexistencia de información acerca de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero que se genera en las varillas de acero corrugado empleadas en refuerzo longitudinal en construcciones de hormigón armado, por efectos sísmicos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Táctico

Contribuir con la investigación relacionada a la fatiga de bajos ciclos que se presenta en las varillas de acero corrugado empleadas como refuerzo longitudinal en las columnas y vigas presentes en construcciones de hormigón armado, que se ven afectadas ante eventos sísmicos fuertes.

1.4.2 Objetivo Operacional

Caracterizar el comportamiento de las varillas de acero corrugado de producción nacional a fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero (presencia de compresión y tracción del mismo valor).

1.4.3 Objetivo General

Realizar un estudio experimental de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio cero en varillas de acero corrugado empleadas como refuerzo longitudinal en vigas y columnas en construcciones de hormigón armado.

1.4.4 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis estadístico para determinar la muestra de las marcas de varillas de acero corrugado de producción nacional comúnmente utilizadas en el sector de la construcción local.
- Adecuar la máquina universal de ensayos MTS presente en el laboratorio de Mecánica de Materiales para obtener resultados confiables el momento de realizar los ensayos.
- Determinar el comportamiento de las varillas de acero corrugado de producción nacional en presencia de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero.

- Determinar en cuántos ciclos de carga y descarga (fatiga de bajo ciclos con esfuerzo medio igual a cero), se agota la capacidad de resistencia mecánica en las varillas de acero corrugado de producción nacional.
- Obtener experimentalmente un Índice de Energía - disipada en las varillas de acero corrugado por acción de cargas dinámicas en la zona plástica.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Ecuador es un país que se encuentra ubicado en una zona de alto riesgo sísmico, por ello es necesario contar con información detallada del comportamiento de los materiales que conforman una edificación, en este caso, específicamente de las varillas de acero corrugado empleadas como refuerzo longitudinal de las columnas y vigas, quienes absorben y disipan la energía provocada por un sismo, de tal manera que evitan el colapso y derrumbamiento de la edificación.

Por tanto, es necesario conocer el comportamiento a fatiga de bajos ciclos de las varillas de acero corrugado empleadas en las construcciones de hormigón armado ya que este es el principal medio de disipación de energía ante un sismo fuerte, como se mencionó anteriormente.

Cabe recalcar que no existe información en nuestro país acerca de cómo reaccionan las varillas empleadas a manera de refuerzo longitudinal en las columnas en presencia de un fenómeno sísmico. Buscando como resultado final obtener características y comportamientos de las varillas que permitan realizar diseños de las edificaciones más confiables en beneficio de la seguridad de las personas.

La caracterización de las varillas de acero corrugado no solo consiste en ensayos que definan su comportamiento estático (ensayo a tensión) sino también es importante identificar su comportamiento a fatiga, más explícitamente

a fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero (tracción y compresión del mismo valor) ya que al suceder un evento sísmico fuerte, existen reversión de momentos provocando el agotamiento del miembro estructural y el posible colapso por la ruptura del acero corrugado que funciona como refuerzo longitudinal.

1.6 ALCANCE DEL PROYECTO

Una vez definido el problema completamente se inicia con la realización del proyecto de titulación planteado y la obtención de información a profundidad de los conceptos que abarcan la fatiga a bajos ciclos y la forma en como ellos actúan, conocer las gráficas de los ciclos histeréticos producto de la carga de tensión y compresión aplicada y toda la información posible que permita caracterizar por completo las varillas de acero corrugado de producción nacional a ser analizadas.

El presente proyecto definirá el comportamiento a fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero en las 3 marcas de varillas de acero corrugado de producción nacional seleccionadas, tomando en cuenta los diámetros que serán analizados, siendo estos diámetros de 8 mm, 10 mm y 12 mm. De esta forma se obtendrá información que hasta la presente fecha es escasa y que permita realizar futuros diseños de edificaciones enfocándolos en las capacidades de las varillas de acero corrugado en cuanto a resistencia de fenómenos sísmicos.

Por tanto, al finalizar el proyecto se obtendrá la capacidad de los ciclos de carga que soportan las varillas de acero corrugado de producción nacional seleccionadas, sometidas a un esfuerzo de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio igual a cero producidos por un fenómeno sísmico, el cual lo llevará hasta la deformación plástica.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.1.1 Muestreo

En estadística un muestreo es la técnica para la selección de una muestra a partir de una población. Si el tamaño de la muestra es más pequeño que el tamaño de la población, se puede extraer dos o más muestras de la misma población. El muestreo es una herramienta de la investigación científica.

2.1.2 Condiciones de muestreo

Universo: en estadística es el nombre específico que recibe particularmente en la investigación social la operación dentro de la delimitación del campo de investigación que tienen por objeto la determinación del conjunto de unidades de observaciones que van a ser investigadas.

Población: Es todo conjunto de elementos, finito o infinito, definido por una o más características, de las que gozan todos los elementos que lo componen, y sólo ellos. En muestreo, se entiende por población a la totalidad del universo que interesa conocer, y que es necesario que esté bien definido.

Muestra: en ocasiones en que no es posible realizar un censo, lo que se realiza es trabajar con una muestra, la cual es una parte representativa y adecuada de la población. Para que una muestra sea representativa, y por lo tanto útil, debe reflejar las semejanzas.

2.1.3 Muestreo por estratos

Existen ciertas variables que tienen más peso que otras o que interesan más para determinado estudio, si esta variable asume distintos valores promedios en diferentes subpoblaciones se podría obtener estimaciones más precisas de las cantidades de la población al tomar una muestra aleatoria estratificada. La palabra estratificar proviene de la palabra latina que se significa “formar capas”, dividimos la población en H subpoblaciones llamadas estratos.

$$\sum_{h=1}^E N_h \quad (2)$$

Los estratos no se traslapan y conforman la población completa, de modo que cada unidad de muestreo pertenece exactamente un estrato. (Después que la población se ha dividido en estratos, puede seleccionarse una muestra proporcional o no proporcional un procedimiento de muestreo proporcional requiere que el número de elementos en cada estrato tenga la misma proporción que se encuentra en la población.).

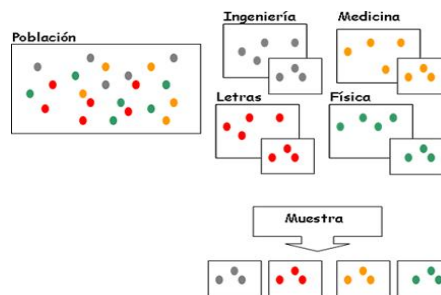


Figura 5: Muestra dividida por estratos.

2.1.4 Muestreo aleatorio en estratos

En un muestreo estratificado, una población con N unidades $\{U_{hi}\}$ se subdivide en L subpoblaciones, que sean lo más homogéneas posible denominadas estratos donde $h = 1, 2, \dots, L$ y $i = 1, 2, \dots, N_k$ de tamaños $N_1, +N_2, \dots, N_L$. La muestra estratificada de tamaño n se obtiene seleccionando n_h elementos ($h = 1, 2, \dots, L$) de cada uno de los L estratos en que se subdivide la población o universo.

$$N = \sum_{h=1}^L N_h = N_1 + N_2 + N_3 + \dots \quad (3)$$

Una muestra aleatoria simple estratificada de forma independiente toma el nombre de muestreo aleatorio estratificado.

$$\{U_1 U_2 \dots U_N\} \text{ Se divide en } L \text{ estratos } \left\{ \begin{array}{l} U_{11} U_{12} \dots U_{1N_1} \\ U_{21} U_{22} \dots U_{2N_2} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ U_{L1} U_{L2} \dots U_{LN_L} \end{array} \right\} N = \sum_{h=1}^L N_h \quad (4)$$

Para la muestra estratificada

$$\{U_1 U_2 \dots U_n\} \text{ Se extrae en cada estrato } \left\{ \begin{array}{l} U_{11} U_{12} \dots U_{1n_1} \\ U_{21} U_{22} \dots U_{2n_2} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ U_{L1} U_{L2} \dots U_{Ln_L} \end{array} \right\} n = \sum_{h=1}^L n_h \quad (5)$$

2.1.5 Afijación de una muestra

Se designa como afijación de una muestra al reparto, adjudicación o distribución del tamaño muestral n entre los diferentes estratos. Es así que a la determinación de los valores de n_h que verifiquen $n_1 + n_2 + \dots + n_L = n$. Se puede establecer varias afijaciones de repartir la muestra entre los estratos, pero las más utilizadas son: la afijación uniforme, la afijación proporcional, y la afijación de varianza mínima.

2.1.6 Afijación proporcional

Este tipo de subdivisión consiste en asignar a cada estrato un número de unidades de muestras proporcional a su tamaño. Las n unidades de la muestra se distribuyen proporcionalmente a los tamaños de los estratos los cuales se expresan en número de unidades y para lo cual tenemos:

$$= N_h k \Rightarrow \sum_{h=1}^L n_h = \sum_{h=1}^L N_h k = k \sum_{h=1}^L N_h \Rightarrow n = kN \Rightarrow k = \frac{n}{N} = f \quad (6)$$

Con la afijación proporcional las fracciones de muestreo en cada estrato son iguales y coinciden con la fracción total, siendo su valor la constante de proporcionalidad. Como todas las unidades de la población tienen la misma probabilidad de figurar en la muestra de n unidades, se establece el caso de muestras autoponderadas.

2.2 DEFINICIÓN DE FATIGA DE MATERIALES

Según (Hibbeler, 2011) establece que “*Cuando un metal se somete a ciclos repetidos de esfuerzo o deformación, éstos hacen que su estructura se deforme, llevándolo en última instancia a la fractura. Este comportamiento se denomina fatiga...*” (p.108).

Recalca también que en “*...En todos estos casos, la fractura se producirá con un esfuerzo que es menor al esfuerzo de cadencia del material.*” (Hibbeler, 2011).

Analizando los conceptos existentes acerca de fatiga, se puede decir que en la superficie de los materiales (de cualquier geometría) existen imperfecciones de orden microscópico, en donde se concentrará el esfuerzo principalmente. Es por esto que, a medida que el esfuerzo aplicado se repite cíclicamente, se formarán pequeñísimas grietas, y al aparecer las mismas ocasiona un incremento del esfuerzo en dicha área. En tanto que al mantener el ciclo de

esfuerzo, estas grietas continuarán creciendo hasta llegar al punto de superar el área de la sección transversal y por tanto ya no podrá mantener la carga aplicada, como consecuencia se obtiene una fractura súbita producto de la fatiga al material.

(Hibbeler, 2011), menciona lo siguiente:

La fatiga en los metales ocurre cuando el esfuerzo o la deformación son cíclicos. Este fenómeno ocasiona una fractura frágil del material. Los elementos se diseñan para resistir la fatiga al garantizar que el esfuerzo en el elemento no exceda su límite de resistencia a la fatiga. Este valor se determina a partir de un diagrama S-N como el esfuerzo máximo que el material puede resistir cuando se somete a un determinado número de ciclos de carga.

Por tanto, se puede concluir que la fatiga supone un modo de fallo bajo sollicitaciones cíclicas. En lo que se puede recalcar que las tensiones como también las deformaciones varían con respecto al tiempo. A continuación se definen dos parámetros claves que se presentan en fatiga:

- Semiамplitud (σ_a): es aquella que produce la variabilidad en el tiempo, es un esfuerzo típicamente dinámico producto de fatiga.
- Esfuerzo Medio (σ_m): es aquel que se encuentra aplicado en todo el proceso y es de naturaleza estática.

(Universidad de Valladolid, 2011)

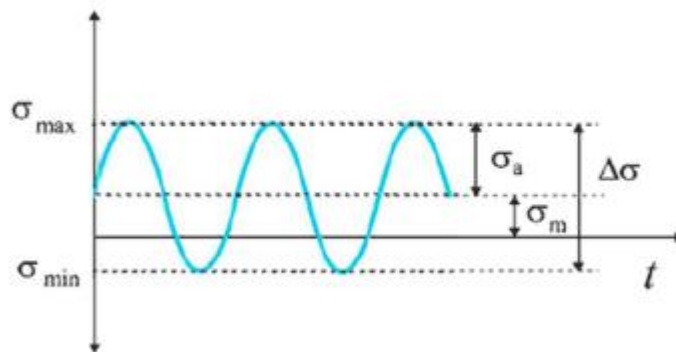


Figura 6: Diagrama de esfuerzo en fatiga, Esfuerzo medio no igual a cero.

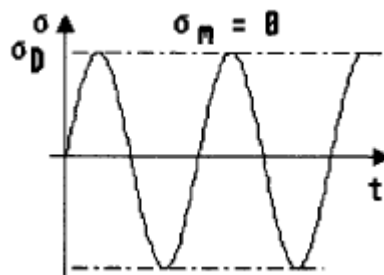


Figura 7: Diagrama de esfuerzo en fatiga, Esfuerzo medio igual a cero.

(Lalanne, 2002)

2.3 PROCESO DE ROTURA POR FATIGA

La rotura por fatiga se produce en tres etapas, inicialmente en la Generación de grietas, una vez generada procede a la Propagación de grietas y finalmente llega a la Rotura final por colapso.

Generación de grietas: las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre nuclean sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión. Las cargas dinámicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de escalones producidos por deslizamiento de dislocaciones, los cuales actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como lugares de nucleación de grietas.

Propagación de grietas: Se puede hablar de la propagación de grietas en dos etapas diferentes:

- La primera etapa, una vez nucleada una grieta, se propaga muy lentamente y en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.
- La segunda etapa, la velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera vertiginosa y en este punto la grieta deja de crecer en el eje de esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta crece por un proceso de

enromamiento (fatiga de material por cargas dinámicas cíclicas) y agudizamiento de la punta a causa de los ciclos de tensión.

Rotura final por colapso: Al mismo tiempo que la grieta aumenta en anchura, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura hasta que alcanza una configuración enromada. Se alcanza una dimensión crítica de la grieta y se produce la rotura.

(Universidad de Valladolid, 2011)

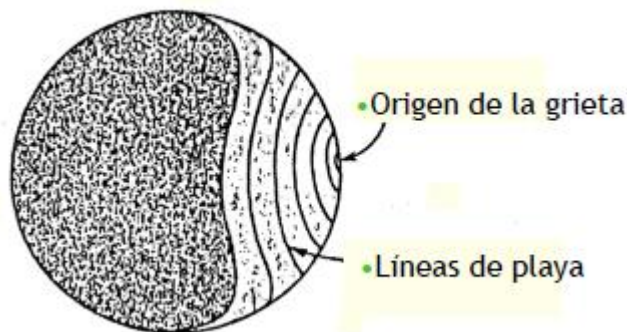


Figura 8: Proceso de rotura por fatiga.

(Universidad de Valladolid, 2011)

2.4 DAÑOS DERIVADOS DE LA FATIGA

“Se define como daño por fatiga a la modificación de características de un material, debido principalmente a la formación de grietas y que resulta de la repetida aplicación de ciclos de estrés. Este cambio puede conducir a un fracaso.” (Lalanne, 2002)

Para hablar acerca de los daños derivados de la fatiga no se tomará en cuenta los mecanismos que provocan la nucleación o el crecimiento de la grieta, sino que se dirá simplemente que la fatiga se inicia con una deformación plástica aplicada en ciertos defectos macroscópicos existentes en el material, con su

geometría respectiva, por efecto de tensiones totales que pueden llegar a ser menores que el límite elástico del material mencionado.

El efecto es extremadamente débil y despreciable para un solo ciclo, pero si el estrés se repite cíclicamente se crea una nueva plasticidad localizada, de esta manera, dependiendo de la tensión aplicada, las grietas microscópicas que existían en un inicio pasan a ser grietas visibles quienes conducirán al fracaso de la pieza. Por tanto se dice que los daños por fatiga es un fenómeno acumulativo.

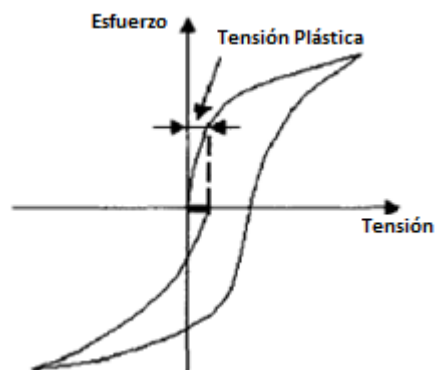


Figura 9: Ciclo abierto de histéresis – Esfuerzo vs Tensión.

(Lalanne, 2002)

Como se observa en la Figura 9, en donde se encuentra representado gráficamente el ciclo de tensión vs deformación, el lazo de histéresis que se obtiene es una curva abierta la cual evoluciona en función del número de ciclos aplicados. Cabe destacar que cada ciclo de tensión produce un cierto daño los cuales son acumulativos.

El daño va de la mano de las modificaciones de las propiedades mecánicas del material, más específicamente de la resistencia a la tracción máxima y de la fuerza límite de fatiga. El daño se localiza en un lugar donde exista una discontinuidad geométrica o un defecto metalúrgico. Por tanto, el daño por fatiga está relacionado con los fenómenos metalúrgicos y mecánicos.

El daño por fatiga puede ser caracterizado por:

- Evolución de una grieta y absorción de energía de deformación plástica.
- Pérdida de fuerza en tensión estática.
- La reducción de la tensión límite de fatiga hasta un valor crítico correspondiente al colapso.
- Variación de la deformación plástica que aumenta con el número de ciclos hasta un valor crítico.

2.5 LEYES Y CURVAS DE WÖHLER

Wöhler estableció en 1852, tras ensayos sobre aceros y fundiciones, las siguientes leyes:

- Las piezas metálicas pueden romperse bajo esfuerzos unitarios inferiores a su carga de rotura, e incluso a su límite elástico, si el esfuerzo se repite un número suficiente de veces.
- La rotura no tiene lugar, cualquiera que sea el número de sollicitaciones, si la diferencia entre el esfuerzo máximo y mínimo es inferior a cierto valor límite, función del esfuerzo medio.

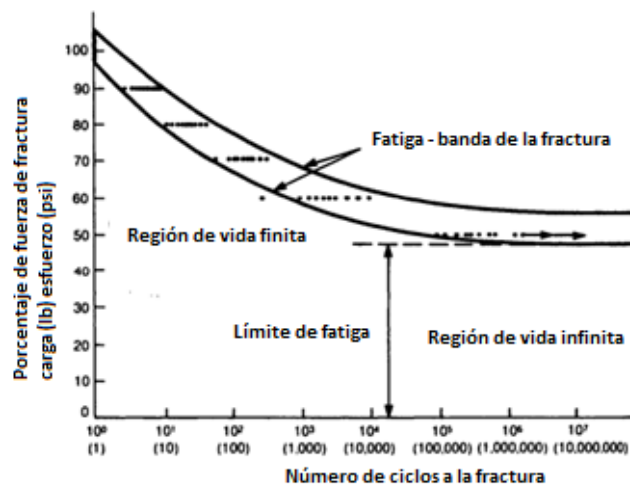


Figura 10: Curva de Wöhler, diagrama típico de fatiga (S – N).

(Universidad de Valladolid, 2011)

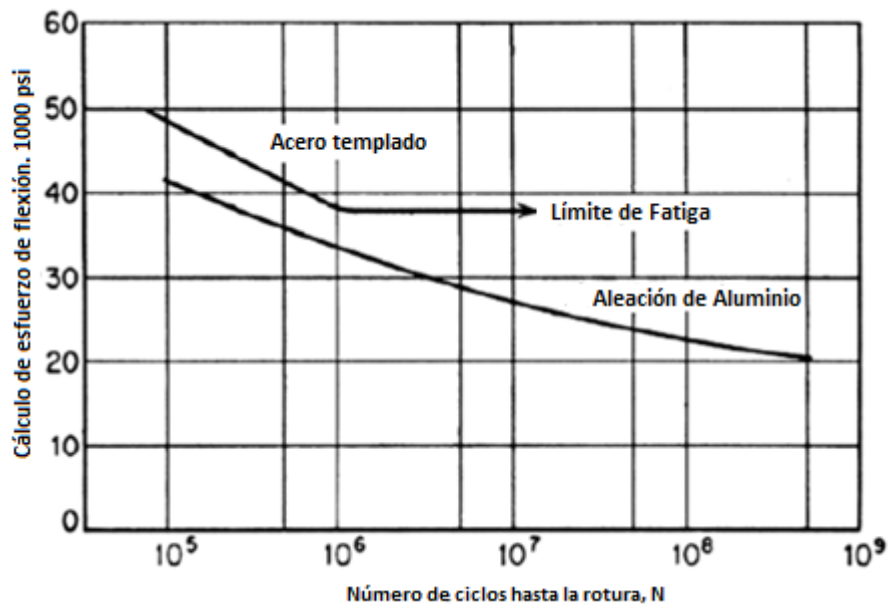


Figura 11: Curva de Wöhler.
(Universidad de Valladolid, 2011)

2.6 FATIGA DE BAJOS CICLOS Y FATIGA DE ALTOS CICLOS

(Lacaze, 2009) Menciona lo siguiente:

La fatiga de materiales corresponde a un deterioro progresivo de los elementos, sometidos a cargas cíclicas, que resulta en su rotura. En general, las fallas se producen bajo esfuerzos cíclicos a amplitudes de deformaciones o tensiones menores a la deformación o tensión requerida para que falle el elemento al aplicar cargas estáticas. La fatiga se caracteriza por el número de ciclos a una amplitud de deformaciones (o tensiones) que produce la ruptura del elemento: a mayor amplitud de deformación, menor es el número de ciclos antes de la falla.

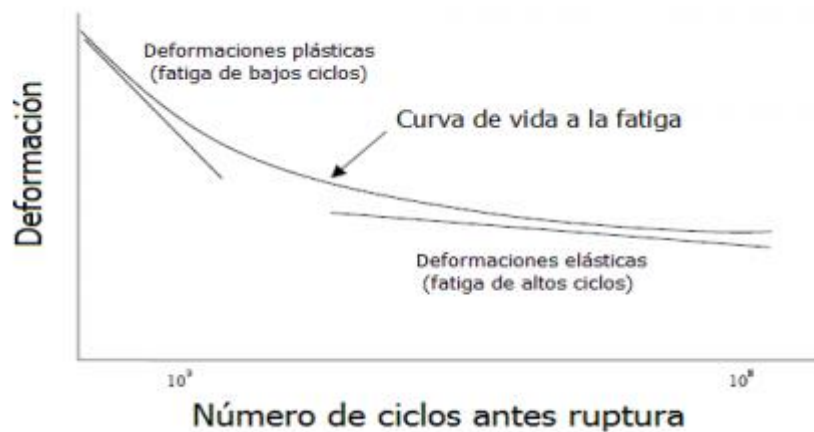


Figura 12: Gráfica de vida útil y fatiga propuesta por Brown, 1998.

(Lacaze, 2009)

En la Figura 12, se encuentra representada la vida a fatiga de un acero típico, en donde se grafica la deformación respecto al número de ciclos antes de la ruptura o colapso. La curva presentada se puede dividir en dos partes que son:

- Fatiga de Bajos Ciclos: está controlada por deformaciones plásticas y corresponde a un número de ciclos a la ruptura menor a 1000.
- Fatiga de Altos Ciclos: está controlada por deformaciones elásticas, el número de ciclos a la ruptura involucrado es mayor a 1000.

2.6.1 Fatiga de Altos Ciclos

Esta fatiga está controlada por las tensiones o deformaciones elásticas. En general ocurre bajo condiciones normales de cargas y solamente actúa en el rango elástico. Si se requiere evitar este fenómeno, se debe aumentar la resistencia a la fatiga, modificando las características de los elementos sometidos a estas cargas, como por ejemplo, geometrías del elemento, tensiones admisibles, etc.

Este fenómeno aparece más comúnmente en elementos de maquinarias rotantes, sometidas a tensiones alternantes como por ejemplo, el cigüeñal de un motor a combustión.

2.6.2 Fatiga de Bajos Ciclos

Cuando se someten varillas de acero corrugado empleadas como refuerzo longitudinal en vigas y columnas en construcciones de hormigón armado a ciclos de tracción – compresión (fatiga), se producen deformaciones que exceden el nivel elástico del material. Muchas veces estas deformaciones se localizan, formando zonas plásticas que provocan daños irreversibles en la estructura.

Se han desarrollado varios modelos matemáticos con la finalidad de evitar el fenómeno de fatiga de bajos ciclos, su objetivo es relacionar las deformaciones impuestas y el número de ciclos antes de llegar al colapso o ruptura, basándose en resultados experimentales como la amplitud de deformación plástica o deformación total, o también en la energía disipada.

(Schijve, 2004) Menciona lo siguiente:

En fatiga de bajo ciclo, la fractura puede ocurrir en un pequeño número de ciclos, por ejemplo 1000 ciclos o menos. Pequeñas grietas son generalmente localizadas inmediatamente. Teniendo en cuenta el esfuerzo existente, la fractura final se producirá cuando las grietas son aún pequeñas.

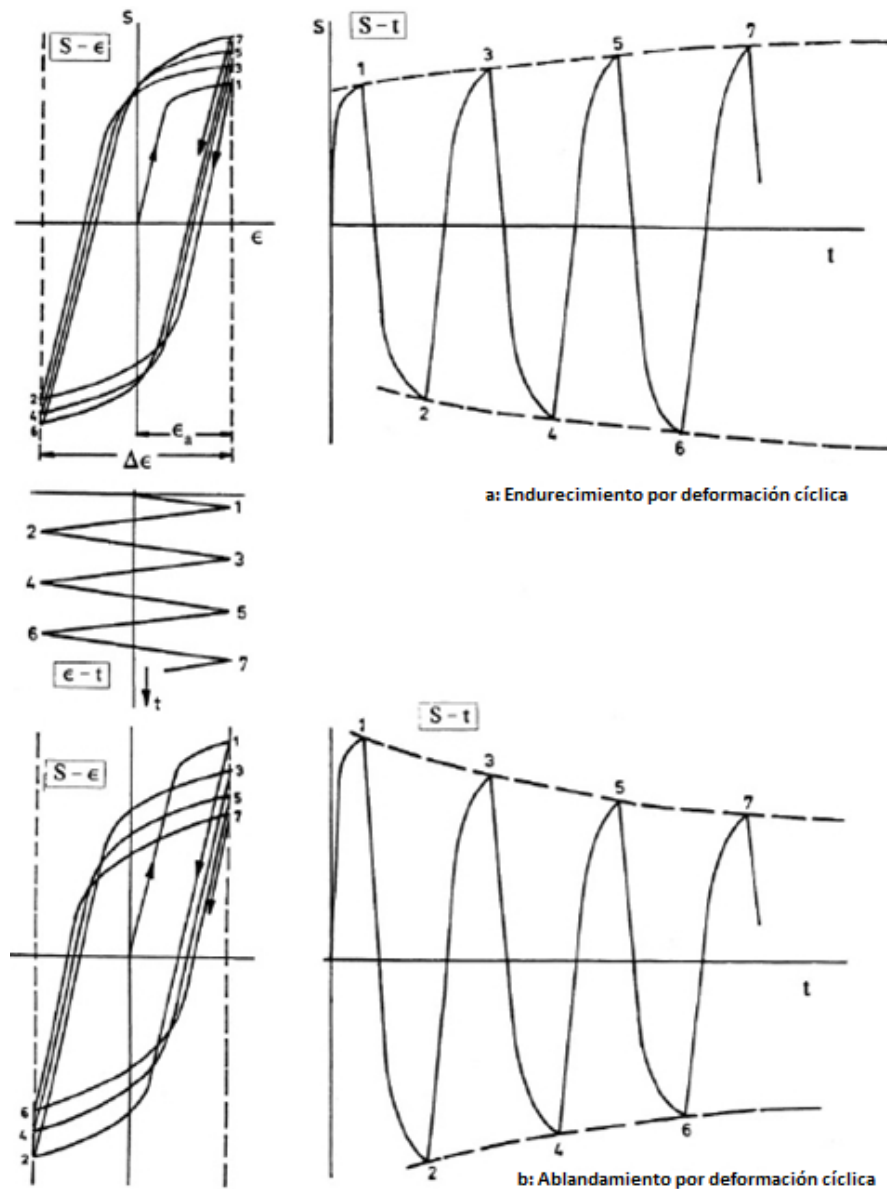


Figura 13: Gráficas de fatiga de bajos ciclos. a) Endurecimiento por deformación cíclica. b) Ablandamiento por deformación cíclica.

(Schijve, 2004)

En la Figura 13, se muestra cómo la amplitud de estrés de bajos ciclos de deformación constante varía en ciclos sucesivos. En la Figura 13 a), los ciclos de deformación requieren el aumento de amplitud de tensión. El endurecimiento por deformación cíclica ocurre más comúnmente en los materiales inicialmente suaves. En tanto que en la Figura 13 b), ocurre lo contrario, el ciclo de deformación se puede mantener con disminución en la amplitud de tensión que

se denomina ablandamiento por deformación cíclica. Esto se produce principalmente en los materiales que ya están endurecidos a un nivel significativo, ya sea por medio de un tratamiento térmico o procesos de deformación varios.

2.6.3 Ecuación de Coffin – Manson

“Coffin y Manson, observaron que el trazado de la vida a fatiga en condiciones de bajo ciclo como una función de la amplitud de la deformación, ε_a indica una relación lineal si es trazada en una escala logarítmica doble” (Schijve, 2004)

La relación descrita por Coffin y Manson se puede escribir así:

$$\varepsilon_a N^\beta = \text{constante} = C \quad (7)$$

$$\text{O, } \varepsilon_a = C N^{-\beta}$$

Esta ecuación se conoce como la relación de Coffin – Manson. Donde N es el número de ciclos al cual ocurre el fallo y el exponente β muy a menudo es del orden de -0,5.

La relación de Coffin – Manson únicamente es válida para aplicarse en fatiga de bajos ciclos. El límite de fatiga no está cubierto por la Ec. (7) descrita anteriormente. Sin embargo, Manson considera también la amplitud de la deformación elástica por una relación exponencial similar a la vida de fatiga que conduce a:

$$\varepsilon_{a,\text{total}} = \varepsilon_{a,\text{plastica}} + \varepsilon_{a,\text{elastica}} = C_1 N^{-\beta_1} + C_2 N^{-\beta_2} \quad (8)$$

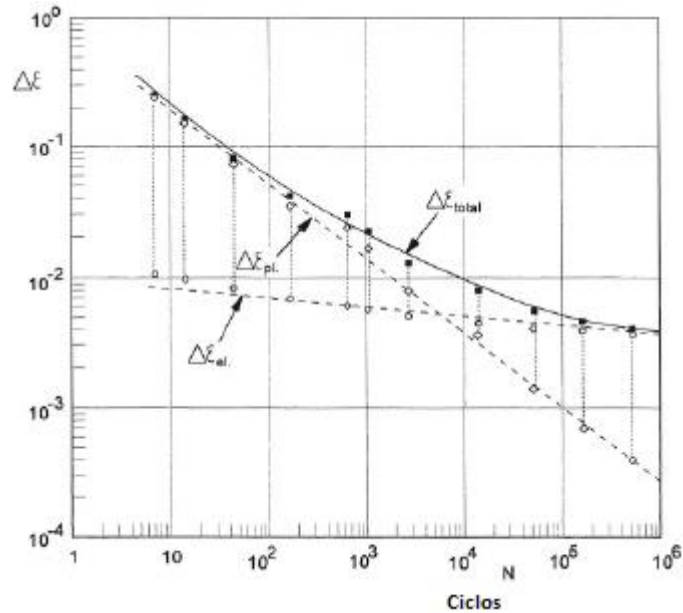


Figura 14: Gráfica que muestra el rango de deformación total, incluidas la deformación plástica y elástica. Material AISI 4340. Rango $\Delta\varepsilon = 2 * \varepsilon_a$
(Schijve, 2004)

La Figura 14 muestra el resultado para un acero de alta resistencia. La curva para $\Delta\varepsilon_{total} (= 2 * \varepsilon_{a,total})$ se convierte en no lineal con una tendencia a doblarse hacia una dirección más horizontal a alta firmeza, donde la amplitud de la deformación elástica predomina.

La siguiente ecuación empleada para el cálculo de fatiga por el criterio de Deformación – Vida, también conocida en su parte plástica como ecuación de Coffin – Manson, se basa en la amplitud de la deformación plástica, la cual se expresa así:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^C \quad (9)$$

Donde:

ε'_f : Coeficiente de ductilidad a fatiga.

C: Exponente de ductilidad de fatiga.

N_f : Número de ciclos a la falla.

(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

La deformación elástica puede definirse como:

$$\Delta\varepsilon_e = \frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{2\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (10)$$

Donde:

$\Delta\sigma$: Rango de esfuerzo.

E: Módulo de elasticidad.

b: Exponente de resistencia a la fatiga.

σ'_f : Coeficiente de resistencia a la fatiga.

N_f : Número de ciclos a la falla.

(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

Por tanto la deformación total está constituida por sus componentes de deformación elástica y plástica, de la siguiente manera:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \quad (11)$$

Donde:

$\Delta\varepsilon$ = Rango de deformación total

$\Delta\varepsilon_e$ = Rango de deformación elástica

$\Delta\varepsilon_p$ = Rango de deformación plástica

(Navarro González, López López, & Rosado Tamariz)

La deformación plástica puede ser despejada de la Ec. (11) de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta\varepsilon}{2} - \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} \quad (12)$$

Finalmente se reemplaza las Ec. (9) y (10) en la Ec. (12) y se despeja la deformación total, quedando una combinación de la ecuación de Coffin – Manson con la ecuación de Alargamiento – Vida:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (13)$$

2.7 MECANIZADO DEL ACERO

2.7.1 Acero Laminado

Este acero se utiliza para la construcción de estructuras metálicas, en las que se incluyen las obras públicas, se obtienen a través de la laminación de acero en una serie de perfiles normalizados.

Este proceso consiste en calentar previamente los lingotes de acero fundido a una temperatura que permita la deformación del lingote por un proceso de estiramiento y desbaste que se produce en una cadena de cilindros a presión llamado tren de laminación. Estos cilindros van formando el perfil deseado hasta conseguir las medidas requeridas, pero no se consiguen con una tolerancia muy ajustada y es por eso que muchas veces estos productos laminados son sometidos a fases de mecanizado para ajustar sus tolerancias.

2.7.2 Acero Forjado

El forjado es el proceso que modifica la forma de los aceros por deformación en la zona plástica de los materiales, cuando se los somete a una presión o a una serie continua de impactos. Este proceso se lo realiza a altas temperaturas para así mejorar la calidad metalúrgica y las propiedades mecánicas del acero.

2.7.3 Acero Corrugado

Este tipo de acero es una clase de acero laminado usado especialmente en la construcción, para preparar hormigón armado y cimentaciones de obra civil, se trata de barras de acero que presentan corrugas que mejoran la adherencia con el hormigón, está dotado de gran ductilidad, la cual permite que a la hora de cortar y doblar no sufra daños. Tiene una gran soldabilidad para que estas operaciones resulten más seguras y con un menor gasto energético.

Estas barras de acero siempre están normalizadas, ya sea por una nacional o internacional, como por ejemplo las normas NEC (Normas Ecuatorianas de la Construcción), en el capítulo NEC-SE-HM, en la parte de estructura de Hormigón Armado.

(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), en norma NTE INEN 2167, brinda factores mínimos que deben cumplir los productores nacionales de este acero, como, por ejemplo: *“Las varillas con resaltes consideradas dentro de esta norma tienen un límite de fluencia mínimo nominal de 412 MPa (42 Kgf/mm²), designado como grado 42 de tracción controlada.”*

Incluyendo también, las propiedades de tracción controladas, indicadas en la *Figura 15*.

Límite de fluencia mínimo (MPa)	411,6
Límite de fluencia máximo (MPa)	539
Resistencia a la tracción mínima (MPa)	548,8
Alargamiento (%) mínimo con probeta Lo= 200 mm	
Díámetro 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	

Figura 15: Especificaciones mecánicas

(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Los diámetros permisibles en esta norma son los siguientes:

Tabla 1:
Diámetros mínimos y máximos de las varillas de refuerzo

Tipo	Diámetro mínimo de barra, d_b	Diámetro máximo de barra, d_b
Barras corrugadas	8 mm	36 mm
Alambre para mallas	4 mm	10mm
Estribos	10 mm	16mm

(NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, 2014)

2.8 PROPIEDADES DE LAS BARRAS DE ACERO A UTILIZAR

Las barras o varillas que se utilizarán en el proyecto son de producción nacional, es decir que estas deben cumplir todos los datos técnicos mencionados en las Norma NEC. Adicional a esto las propiedades de estos materiales pueden variar según su proceso de producción.

A continuación se presenta las propiedades de las varillas de acero corrugado de las tres marcas estudiadas en el presente proyecto:

- Propiedades de la varilla de acero corrugado, marca BLANCO:

FORMAS DE ENTREGA Y EMBALAJE			
Diámetro (mm)	Largo (m)	Peso (t)	Tipo
Aug-32	6, 9 y 12	pqt. 2,5	corrugado

CARACTERÍSTICAS	VARILLAS CON RESALTE DE ACERO TRADICIONAL	VARILLAS CON RESALTE DE ACERO SOLDABLE
Se producen bajo norma	INEN-102 ASTM A-615	INEN-2167 ASTM A-706
Tolerancia masa	(+ / -) 6%	(+ / -) 6%
Fluencia MPa (Kg/cm ²)	Min. 420 (4200) Max. 545 (5450)	Min. 420 (4200) Max. 540 (5400)
Resistencia a la rotura MPa (Kg/cm ²)	Min. 620 (6200)	Min. 550 (5500)
Alargamiento (%) Min. L ₀ =200 mm	d ≤ 20 mm. 9% 22 ≤ d ≤ 25 8% d > 25 mm. 7%	8 - 20 mm = 14% 22 - 36 mm = 12% (L ₀ = 200 mm)
Soldabilidad	No se garantiza soldabilidad	Se garantiza Soldabilidad

CARACTERÍSTICAS	VARILLAS CON RESALTES DE ACERO TRADICIONAL	VARILLAS CON RESALTES DE ACERO SOLDABLE
Ductilidad	Material Dúctil	Excelente Ductilidad Admiten mayor dobléz con menor esfuerzo
Flexibilidad	Poco flexible	Mayor flexibilidad
Propiedades mecánicas	Buenas propiedades mecánicas	Excelentes, por ser la fluencia controlada y mantenida durante más tiempo en un esfuerzo de tracción. Permite mayor resistencia a los movimientos sísmicos
Tipos de electrodos		E - 6011 E - 7018

Figura 16: Propiedades de las varillas de acero corrugado marca Blanco.

- Propiedades de la varilla de acero corrugado, marca AMARILLO:

TABLA DE VARILLAS								
Diámetro (mm)	Kg/m	12 m		9 m		6 m		TOLERANCIA
		Kg	Var x Qq	Kg	Var x Qq	Kg	Var x Qq	
8	0.395	4.74	9.568	3.555	12.757	2.37	19.136	± 50 mm
10	0.617	7.404	6.125	5.553	8.167	3.702	12.251	
12	0.888	10.656	4.256	7.992	5.675	5.328	8.512	
14	1.208	14.496	3.129	10.872	4.171	7.248	6.257	
16	1.578	18.936	2.395	14.202	3.193	9.468	4.79	
18	1.998	23.976	1.892	17.982	2.522	11.988	3.783	
20	2.466	29.592	1.533	22.194	2.043	14.796	3.065	
22	2.984	35.808	1.267	26.856	1.689	17.904	2.533	
25	3.853	46.236	0.981	34.677	1.308	23.118	1.962	
28	4.834	58.008	0.782	43.506	1.042	29.004	1.564	
32	6.313	75.756	0.599	56.817	0.798	37.878	1.197	
36	7.99	95.88	0.473	71.91	0.631	47.94	0.946	

PROPIEDADES MECÁNICAS	MPa	Kgf/mm ²
Límite de Fluencia mínimo	420	42
Límite de Fluencia máximo	540	55
Resistencia a la tracción mínima	550	56

ALARGAMIENTO (%) MÍNIMO CON PROBETA Lo = 200 mm	
Diámetro nominal (mm)	%
8 a 20	14
22 a 32	12

DOBLADO A 180°	
Diámetro nominal (d) mm	Diámetro de mandril
8 a 18	3d
20 a 25	4d
28 a 32	6d

Figura 17: Propiedades de las varillas de acero corrugado marca Amarillo.

- Propiedades de la varilla de acero corrugado, marca ROJO:

ÁREAS Y PESO				NORMA DE PRODUCTO			NORMA NTE INEN 2167 / ASTM 706		A -
Diám.	Área por varilla	Pesos Nominales		PROPIEDADES MECÁNICAS		VALORES	UNIDADES		
mm	cm ²	Kg/m	Kg/12m	GRADO DEL ACERO		60 (42)	Klb/plg ² (Kgf/mm ²)		
8	0.5	0.395	4.74	Límite de fluencia (Fy)	Min	420 (4200)	MPa (Kgf/cm ²)		
10	0.79	0.617	7.4		Max	540 (5400)	MPa (Kgf/cm ²)		
12	1.13	0.888	10.66	Resistencia a la Tracción (Fu)	Min	550 (5500)	MPa (Kgf/cm ²)		
14	1.54	1.208	14.5		Alargamiento mínimo en Lo= 200 mm	Según diámetro	d ≤ 20	14	%
16	2.01	1.578	18.94	22 ≤ d ≤ 36			12		
18	2.55	1.998	23.98	d > 40			10		
20	3.14	2.466	29.59	SOLDABILIDAD					No requiere precalentamiento según AWS D1.4
22	3.8	2.984	35.81						
25	4.91	3.853	46.24						
28	6.16	4.834	58.01						
32	8.04	6.313	75.76						

Figura 18: Propiedades de las varillas de acero corrugado marca Rojo.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realiza un análisis estadístico debido a que no es posible estudiar el Universo total existente en el país, por tanto, se obtiene una muestra representativa con la que sea viable acceder a resultados adecuados.

3.1.1 Número de probetas necesarias en el proyecto

La base del proyecto consiste en la comparación de 3 marcas de varillas de acero corrugado de producción nacional en presencia de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio cero.

Las 3 marcas nacionales seleccionadas son aquellas que mayor impacto tiene en el mercado local, y son escogidas de acuerdo a un estudio de su volumen de ventas, de acuerdo a los datos proporcionados por la Superintendencia de Compañías.

Una vez seleccionadas las 3 marcas productoras de varillas de acero corrugado del medio local, se procede a establecer el número de ensayos a realizar, es decir, la muestra o número de probetas necesarias por ensayo a realizar para obtener valores confiables el momento de analizar los resultados finales.

Cabe destacar que no existe una normativa o fórmula que establezca el número de ensayos a realizar para obtener resultados confiables, esto queda a criterio de la persona que está llevando a cabo el estudio. Por tanto, se conoce que para obtener un resultado es necesario tener como mínimo 3 datos, en este caso 3 ensayos por cada probeta de un determinado diámetro y marca. El

inconveniente es que al realizar 3 ensayos se tendrán sesgos bastante grandes que no permitirán obtener resultados confiables.

Como recomendación de expertos estadistas, mencionan que lo más conveniente es realizar de 7 a 10 repeticiones cuando se ensaya un determinado fenómeno, de esta manera se podría descartar los 2 valores más extremos y con los valores restantes buscar una linealización de la curva de datos obtenida para alcanzar resultados confiables.

Ya que este proyecto se basa en ensayos destructivos y tomando en cuenta los gastos económicos que esto conlleva, se decide realizar 7 ensayos por cada probeta de un diámetro y marca determinada. De esta manera se obtendrá una repetitividad adecuada el momento de la obtención de los resultados individuales lo que llevará a conclusiones confiables cuando se haya finalizado el presente proyecto.

A continuación, se detalla claramente los ensayos que se realizarán, en sus diferentes diámetros, marcas y condiciones de ensayos:

- Se estudiará 3 tipos de varillas de acero corrugado de diferentes marcas de producción nacional existentes en el mercado local, a estas marcas se las llamará de la siguiente manera: Amarillo, Blanco y Rojo.
- De cada marca establecida se analizarán 3 medidas de diámetros distintos, siendo estas las más frecuentemente usadas, estas medidas son de 8, 10 y 12 milímetros de diámetro.
- Las varillas se analizarán en 2 ámbitos diferentes siendo estos: “Estándar” (solamente la varilla) y “Soldadas” (SMAW con junta a tope) siguiendo un WPS debidamente calificado.
- Quedando la distribución de ensayos de la siguiente manera:

Tabla 2:**Distribución de varillas y tipos de ensayo a realizar.**

MARCAS DE VARILLAS: Amarillo, Blanco, Rojo.			
DIÁMETRO	ESTÁNDAR	SOLDADAS	
8	7	7	
10	7	7	
12	7	7	
Total	21	21	42

Nota. Se realizarán 42 ensayos para cada marca de varillas de acero corrugado, siendo un total de 126 ensayos para las marcas establecidas y en las condiciones mencionadas anteriormente.

Quedando de la siguiente manera las varillas necesarias:

Marca color Amarillo, Rojo y Blanco:

- 14 probetas de 8 mm de diámetro.
- 14 probetas de 10 mm de diámetro.
- 14 probetas de 12 mm de diámetro.

3.1.2 Definición de la población

Para la adquisición de las varillas de acero corrugado de las marcas planteadas es necesario establecer la población total de los locales comerciales que expenden a las mismas y por consiguiente, una muestra final de los distribuidores en donde se comprará las varillas, buscando así, eliminar en lo posible los sesgos que puedan aparecer en la experimentación por una compra aleatoria sin guiarse en un procedimiento adecuado. A continuación, se describe el procedimiento estadístico que se llevó a cabo.

Para definir la población a ser analizada, se considera las 3 principales marcas productoras de varillas de acero corrugado del Ecuador, las mismas que fueron seleccionadas debido al volumen de sus ventas, siendo las más importantes en su campo de acción según el informe que presenta la

Superintendencia de Compañías para el año 2012, apareciendo así las marcas AMARILLO, BLANCO Y ROJO en las posiciones 25, 33 y 37 respectivamente del ranking global presentado por la SC por medio de su portal web en la sección Estudios Societarios – Ranking de Compañías analizado para el año 2012 (más reciente mostrado). A continuación, se muestra la Tabla 3, en donde se detalla el valor del volumen de sus ventas:

Tabla 3:

Volumen de ventas de las principales productoras nacionales de varillas de acero corrugado.

Marca	Ciudad	Volumen de Ventas (\$)	Porcentaje (%)
AMARILLO	Quito	278 000 000	38.6
BLANCO	Guayaquil	225 000 000	31.3
ROJO	Latacunga	217 000 000	30.1
Total		720 000 000	100

(SUPERINTENDENCIAS DE COMPAÑÍAS, 2012)

En este caso la Población está constituida por los distribuidores comerciales más relevantes ubicados únicamente en la ciudad de Quito, en base a sus ventas. Quienes deben disponer de las 3 marcas mencionadas de varillas de acero corrugado en diámetros de 12 mm, 10 mm y 8 mm. A continuación, se detalla los distribuidores mencionados junto con su posición de ventas según la Superintendencia de Compañías:

Tabla 4:

Principales distribuidores comerciales de varillas de acero corrugado de producción nacional en la ciudad de Quito.

Número	Distribuidor	Posición de ventas según SIC	Ventas según SIC (%)	Proveedor
1	ACEROSCENTER	652	25949453	AMARILLO
2	UNIFER	1130	13952798	ROJO
3	DISTRIBUIDORA FALCONI TRAVEZ	1486	10056725	ROJO
4	DISTRIBUIDORA GUILLERMO PASQUEL	1529	9675114	ROJO
5	ACEROFLEX	1912	7405495	BLANCO
6	VALERO CIA LTDA	2087	7756398	AMARILLO
7	MAHESA	2213	5420315	AMARILLO
8	DISTRIBUIDORA SAN LUIS	2256	5940700	AMARILLO
9	FERRETERIA DEL VALLE	2918	3147935	ROJO
10	UNIACERO	4093	3024748	AMARILLO
11	FERRASA	4180	2960335	ROJO
12	ACERO COMERCIAL S.A	4411	1809773	BLANCO
13	SUPPLY	4535	1798230	BANCO

(Saquina, 2015)

3.1.3 Estratificación de la población

Una vez definida la población, se ha identificado los 3 estratos o subgrupos compuestos por las marcas con mayor presencia en producción nacional, quedando de la siguiente manera:

$$N = \sum_{h=1}^3 N_h \quad (14)$$

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$$

$$N_1 = \text{Estrato 1} = \text{Marca AMARILLO} = 5$$

$$N_2 = \text{Estrato 2} = \text{Marca BLANCO} = 3$$

$$N_3 = \text{Estrato 3} = \text{Marca ROJO} = 5$$

$$N = \sum_{h=1}^3 N_h = N_1 + N_2 + N_3 = 13 \quad (14)$$

3.1.4 Afijación proporcional de la muestra

Para obtener el tamaño de muestra n entre los estratos ya definidos se lo realiza por medio de la afijación proporcional al tamaño de la población, en donde $N=13$ unidades obtenidas en la población total se distribuyen proporcionalmente a los tamaños de los 3 estratos identificados, como se muestra a continuación:

$$n_h = N_h k \Rightarrow \sum_{h=1}^L n_h = \sum_{h=1}^L N_h k = k \sum_{h=1}^L N_h \Rightarrow n = kN \Rightarrow k = \frac{n}{N} = f \quad (15)$$

$$k = \frac{n}{N} = \frac{5}{13} = 0.4 \quad (15)$$

$$n = 5, \quad N = 13$$

Para cada estrato mencionado se adoptará un valor de 0.4, distribuyendo proporcionalmente a cada una de las marcas analizadas su porcentaje respectivo y tomando como referencia de universo o población total el volumen de ventas de los 13 distribuidores comerciales mencionados en la Tabla 4. Cuyo valor es de 98 898 019, de esta forma se obtiene los pesos de cada marca como se muestra a continuación:

Tabla 5:
Afijación proporcional de la muestra.

Marca	Volumen de ventas total (\$)	Porcentaje /peso (%)	Nh
AMARILLO	48 091 614	48.6	5
BLANCO	11 013 498	11.2	3
ROJO	39 792 907	40.2	5
Total	98 898 019	100	13

3.1.5 Tamaño de la muestra de cada estrato

A continuación, se obtiene el tamaño de la muestra de cada uno de los 3 estratos identificados, para lo cual es necesario que exista una afijación proporcional de acuerdo a los pesos de cada una de las 3 marcas en la población analizada.

$$\{U_1 U_2 \dots U_n\} \text{ Se extrae en cada estrato } \left\{ \begin{array}{l} U_{11} U_{12} \dots U_{1n_1} \\ U_{21} U_{22} \dots U_{2n_2} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ U_{L1} U_{L2} \dots U_{Ln_L} \end{array} \right\} n = \sum_{h=1}^L n_h$$

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k \quad (16)$$

Donde:

$$n = 5$$

$$N = 13$$

$$N_1 = 5$$

$$N_2 = 3$$

$$N_3 = 5$$

A continuación, se calculan los tamaños de las muestras:

$$n_h = n * \frac{N_i}{N} \quad (17)$$

$$n_1 = 4 * \frac{5}{13} = 2, \text{AMARILLO}$$

$$n_2 = 4 * \frac{3}{13} = 1, \text{BLANCO}$$

$$n_3 = 4 * \frac{5}{13} = 2, \text{ROJO}$$

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$$

$$n = 2 + 2 + 1 = 5$$

Por tanto, se obtiene el tamaño de muestra respectivo para cada una de las marcas analizadas.

Cabe recalcar que en el caso del estrato al que pertenece la marca BLANCO, existe únicamente una muestra de 1 por lo cual se propone establecer una muestra con valor igual a 2 de forma que todas las marcas analizadas cuenten

con el mismo tamaño de muestra y así concluir con valores más precisos el momento de analizar los resultados finales.

Tabla 6:
Tamaño de muestras de cada marca

Marca	Volumen de ventas total (\$)	Nh	Tamaño muestra (ni)
AMARILLO	48 091 614	5	2
BLANCO	11 013 498	3	2
ROJO	39 792 907	5	2
Total	98 898 019	13	6

3.1.6 Definición de las muestras

Una vez obtenido los tamaños de las muestras de cada estrato, es decir, identificados en cuantos de los locales comerciales de cada marca se procederá a comprar las varillas de acero corrugado, finalmente se determina los distribuidores comerciales que serán seleccionados del grupo total mostrado en la Tabla 4, en donde se procederá a adquirir las varillas de acero corrugado de diámetros de 8, 10 y 12 milímetros, para ello se emplea un método de muestreo aleatorio simple en base a la herramienta proporcionada por una hoja de cálculo empleada en esta fase del presente proyecto, de tal manera que la selección final de los distribuidores comerciales de varillas de acero corrugado requerida queda de la siguiente manera:

Tabla 7:
Distribuidores Comerciales seleccionados

Número	Distribuidor	Marca	Tamaño de muestra
1	A	AMARILLO	2
2	B	AMARILLO	
3	C	BLANCO	2
4	D	BLANCO	
5	E	ROJO	2
6	F	ROJO	

De los locales comerciales seleccionados finalmente en la Tabla 7, se procede a adquirir 1 varilla de acero corrugado de 6 metros de longitud de cada uno de los diámetros establecidos (8, 10 y 12 mm), esto para las 3 marcas escogidas anteriormente.

Por tanto, se comprarán finalmente 18 varillas de acero corrugado cada una de 6 metros de longitud, de la siguiente manera:

Marca Amarillo, Blanco y Rojo:

Distribuidor A, B, C, D, E y F:

- 1 varilla de 6 metros de longitud y 12 mm de diámetro.
- 1 varilla de 6 metros de longitud y 10 mm de diámetro.
- 1 varilla de 6 metros de longitud y 8 mm de diámetro.

3.2 PROCESO DE OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

El proceso de obtención de las distintas probetas necesarias será el mismo para cada una de las diferentes marcas y diámetros. Se obtendrán iguales medidas en las probetas de las tres marcas con diámetro 12mm, iguales medidas en las probetas de las tres marcas con diámetro 10mm, e iguales medidas en las probetas de las tres marcas con diámetro 8mm. Tanto para probetas normales como para soldadas.

El proceso de obtención se lo detallará a continuación, presentando al final de este subcapítulo la Tabla 8 con las medidas finales de las probetas a ensayar.

- Selección de los distribuidores de las diferentes marcas para la adquisición de las varillas de acero corrugado. La venta de estas varillas la realizan en longitudes de 6 y 12 metros. El análisis de este punto se lo realizó en la sección 3.1.
- Se clasificarán cada una de las probetas dependiendo su diámetro, tomando en cuenta la marca a la que pertenece cada varilla (AMARILLO, BLANCO Y ROJO), para evitar confusiones posteriores.
- La medida para el corte de cada una de las varillas dependerá del diámetro de éstas. Como referencia a esta medida se tomarán 2 veces el diámetro que es la distancia a la cual estarán separadas cada una de las mordazas de la máquina universal de ensayos, sumado la longitud de cada muela que agarra la probeta.

(Grupo Celsa) menciona lo siguiente, para los ensayos de histéresis:

El comportamiento de los aceros frente a este tipo de solicitaciones está lógicamente relacionado con su ductilidad. Por ello, una de las exigencias expuestas en algunos Códigos, en particular en el Eurocódigo 8, es la de disponer de relaciones f_s/f_y muy altas, del orden de 1.20 y de unos alargamientos bajo carga máxima, $\epsilon_{máx}$, también muy elevados, del orden del 9%.

- La distancia de separación de las mordazas se la toma como 2 veces el diámetro para cada varilla, como se mencionó en el punto anterior; esto con el fin de evitar el pandeo en las mismas el momento de ejercer compresión.

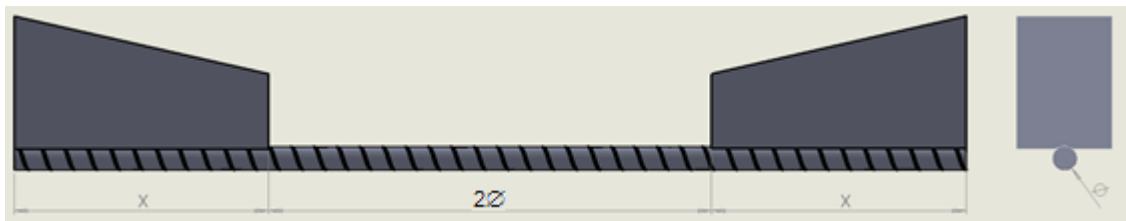


Figura 19: Distancia entre mordazas necesaria para evitar el pandeo en compresión.

- A la medida obtenida a partir de la separación de mordazas (2 diámetros), *Figura 19*, se sumará 89 mm; esta medida corresponde a la sección de las muelas de las mordazas en donde se apoyará y sujetará la varilla; tanto en la mordaza inferior como en la superior.
- La medida final para el corte de cada una de las varillas de las diferentes marcas se la obtendrá con la ecuación indicada a continuación:

$$Longitud_{varilla} = 2 \cdot (x + \phi) \quad (18)$$

Donde:

$x = 89$ mm: Longitud de la varilla sujeta por las mordazas.

ϕ = Diámetro nominal de cada varilla.

Tabla 8:

Medida de probetas según diámetro de varilla

	Ø8 mm	Ø10 mm	Ø12 mm
MARCA Amarillo	194mm	198mm	202mm
MARCA Blanco	194mm	198mm	202mm
MARCA Rojo	194mm	198mm	202mm

En las *Figuras 20, 21 y 22*, se puede observar el resultado final de las probetas a ensayar, para el caso del análisis “Estándar”, el cual consiste en experimentar con varillas sin ningún tipo de refuerzo o soldadura.



Figura 20: Probetas Estándar finales, marcas Amarillo (Ø8 mm), Blanco (Ø10 mm) y Rojo (Ø12 mm).



Figura 21: Probetas Estándar finales, marcas Amarillo y Blanco (Ø10 mm).



Figura 22: Probetas Estándar finales, marcas Rojo ($\varnothing 8$ mm).

Una vez concluido el proceso de obtención de las probetas “Estándar”, se prepara el segundo tipo de varillas de prueba, “Soldadas”.

El proceso es similar al descrito anteriormente (longitud regida por la ecuación 18), la diferencia es que estas probetas serán cortadas por la mitad y biseladas 30° de manera que serán soldadas (SMAW) por medio de una junta a tope en V con ángulo de 60° .

A continuación, se adjunta el WPS acatado en todo el proceso de soldadura de las varillas:

	ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)	CRNG <i>Ingeniería Mecánica</i> <i>Ingeniería Industrial</i> <small>No. CRNG-11-W00</small> <small>Página: 1 de 2</small>
--	---	--

Compañía: _____ Por: ING. CARLOS NARANJO G. _
 Procedimiento de Soldadura No. _____ Revisión: 1era Fecha: 26/02/2011_
 Registro de Calificación de Procedimiento (PQR) No. _____

ALCANCE

Este WPS es válido únicamente cuando se utiliza las variables dentro de los rangos establecidos. Se debe utilizar personal calificado y equipo apropiado para implementar el presente WPS y será utilizado solamente cuando se requiera soldar varilla para concreto reforzado de acuerdo con el Código AWS D1.4M/D1.4, 2005 Structural Welding Code— Reinforcing Steel

SEGURIDAD

Precauciones de seguridad deben ser de acuerdo a la última edición de ANSI Z49.1 Safety in welding, cutting and allied processes

ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

PROCESOS DE SOLDADURA

Proceso de Soldadura.....	SMAW
Método de Aplicación.....	MANUAL

MATERIAL BASE

Especificación 1.....	Varilla para concreto reforzado ASTM A 615 M gr. 420
Especificación 2.....	Varilla para concreto reforzado ASTM A 615 M gr. 420
Carbono equivalente max.	0,60
Diámetro varilla.....	Máximo 22 mm. para soldaduras de ranura
Espesor placa.....	N.A.
Recubrimiento.....	Sin recubrimiento

MATERIAL DE APORTE

Especificación.....	ANSI/AWS A5.5
Clasificación.....	E 9018 G

GAS DE PROTECCIÓN

Tipo.....	N.A.
Flujo.....	N.A.

DISEÑO DE LA JUNTA

Tipo de cordón.....	Ranura
Tipo de Junta.....	A tope directa
Posiciones Permitidas.....	Plana
Geometría junta.....	Ver figura 1
Respaldo.....	Si
Material de Respaldo.....	Material de aporte

PRECALENTAMIENTO Y TEMPERATURA ENTRE PASES

Temperatura de Pre calentamiento.....	Mínimo: 120°C Maximo. 320 °C
Temperatura entre pasadas.....	Según se suelde
Mantenimiento de pre calentamiento ...	Mínimo 120°C

POSCALENTAMIENTO (PWHT)

Post calentamiento	No se califica para aplicaciones con post calentamiento
--------------------------	---

TÉCNICA

Cordón oscilado o rectilíneo.....	Ambos
Martilleo.....	No se permite
Limpieza Inicial.....	Mecánica; la junta debe estar libre de humedad antes de soldar
Limpieza entre pasadas.....	Mecánica, solamente con grata
Repelado de la raíz (backgouging).....	Mecánica

Figura 23: Especificaciones de Procedimiento de Soldadura (WPS), página 1.

	ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)	CRNG <i>Ingeniería Mecánica</i> <i>Ingeniería Industrial</i> No. CRNG-11-W00 Página: 1 de 2
--	---	--

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Cordon	ELECTRODO		CORRIENTE			VELOCIDAD
	Clasificación	Diámetro	Voltaje	Amperios	Polaridad	
Raíz 1	E 9018	3,1 mm.	27 - 33	100 - 110	DCEP	20 - 30 cm/min
Relleno 2	E 9018	3,1 mm.	27 - 33	100 - 130	DCEP	20 - 30 cm/min
Capa	E 9018	3,1 mm.	27 - 33	100 - 120	DCEP	20 - 30 cm/min

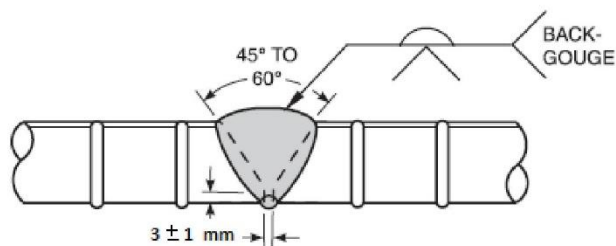


Fig 1. Esquema de la junta

Este WPS puede variar debido a la secuencia de fabricación, elementos de fijación, tamaño de la pasada, etc. dentro de las limitaciones de las variables dadas en la cláusula 6.2.1 de D1.4M/D1.4, 2005 Structural Welding Code— Reinforcing Steel

Desarrollado por : Ing. Carlos Naranjo Msc. CIMEPI 04-17-0542	Aprobado Cliente: Fecha:
---	---

Figura 24: Especificaciones de Procedimiento de Soldadura (WPS), página 2.

El proceso de soldadura de las probetas a ser ensayadas en el ámbito “Soldadas” regido al WPS anterior en las *Figuras 23 y 24*, contó con las variantes que se mencionan a continuación, debido a que el código AWS D1.4 permite el cambio en estas variables:

- Se utilizó el mismo electrodo E 9018 pero con 3/32 de diámetro.
- El rango de Amperaje en el proceso de soldadura osciló de 70 A – 110 A.
- Las varillas de acero corrugado son de Acero ASTM A706, acero de aleación cuyo carbono equivalente se encuentra limitado a menos de 0,55%. Cuenta con un contenido de carbono de 0,3% (acero de bajo carbono), el cual no necesita precalentamiento antes de ser soldado ya que su espesor no supera los 25 mm en ningún caso estipulado en el presente proyecto, el tipo de acero no es una variable esencial, por lo que es permitido el uso del WPS anterior para soldar este tipo de material.

A continuación, se presentan las *Figuras 25, 26, 27 y 28*, en las que se observa el proceso de soldadura y el resultado final de las probetas soldadas:



Figura 25: Probetas Amarillo y Rojas ($\varnothing 12$ mm), previo a ser soldadas.



Figura 26: Proceso de soldadura probeta marca Amarillo (\varnothing 12 mm).



Figura 27: Probeta Soldada marca Amarillo (\varnothing 12 mm).



Figura 28: Probetas Soldadas marcas Amarillo, Rojo y Blanco ($\varnothing 8$ mm).

3.3 EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Una vez adecuado completamente el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se llevó a cabo los ensayos de caracterización de las varillas de acero corrugado a fatiga de bajos ciclos.

Antes de realizar un conjunto de ensayos para los diámetros establecidos de: 12 mm, 10 mm y 8 mm. Es necesario calibrar la máquina con la que se va a trabajar. La calibración se realizó en base al valor de fluencia F_y máximo.

Los ensayos estuvieron regidos en base al control de desplazamiento del pistón de la máquina MTS para llegar al F_y máximo de la varilla. Definiendo los parámetros de calibración para la máquina universal de ensayos en la simulación de carga para tensión y carga para compresión, para N lazos de histéresis completos, que asemejan un evento sísmico; la experimentación fue realizada con una frecuencia de 0.033 Hz (es decir, la velocidad con la que la máquina realiza un ciclo de histéresis completo), la cual otorga una velocidad de experimentación adecuada, permitiendo la activación manual del sistema en las mordazas que ejerce la compresión en la varilla.

3.3.1 Calibración de los ensayos en varillas de 12 mm de diámetro.

Para las varillas de acero corrugadas de 12 mm de diámetro de las distintas marcas establecidas y en las condiciones planteadas (Estándar y Soldadas), se calibró la máquina universal de ensayos en función del control de desplazamiento del pistón.

Inicialmente se analizó la distancia libre entre mordazas con la que contará cada probeta de la experimentación. Según la norma propuesta por el GRUPO CELSA, Barcelona – España, cuya denominación es “*Ductilidad Especial*”, establece un valor de 5 veces el diámetro para evitar la aparición de pandeo el momento en que actúa la compresión, como se muestra en la *Figura 29*. Pero en este caso experimental se plantea reducir aún más la distancia entre

mordazas (Longitud Libre) buscando evitar el pandeo más efectivamente, por tanto se define una Longitud Libre entre mordazas igual a 2 veces el diámetro.

DIAMETRO NOMINAL	LONGITUD LIBRE	DEFORMACIÓN (%)
$\varnothing < 16 \text{ mm}$	$5 \varnothing$	± 4
$16 \text{ mm} < \varnothing < 25 \text{ mm}$	$10 \varnothing$	$\pm 2,5$
$25 \text{ mm} < \varnothing$	$15 \varnothing$	$\pm 1,5$

Figura 29: Tabla de Requisitos para longitud libre y deformación en ensayos de cargas dinámicas.

(CELSA, 2010).

El valor del desplazamiento del pistón en las varillas de 12 mm de diámetro se estableció en 5,2 mm, ya que se programó la máquina universal de ensayos hasta alcanzar una fuerza de carga y descarga que supere el límite de fluencia en las mencionadas varillas, debido a que la fatiga de bajos ciclos trabaja en la zona plástica (1,3 veces F_y).

La programación de la fuerza de carga y descarga aplicada a las probetas se la realizó por medio del controlador **SPAN 1** mostrado en la *Figura 30*. Y una vez obtenido el valor de fluencia F_y máximo se midió el desplazamiento del pistón con la ayuda de un reloj comparador (*Figura 31*), obteniendo así el valor mencionado de 5,2 mm de desplazamiento del pistón.



Figura 30: Imagen de los controladores programables de la máquina universal de ensayos MTS.



Figura 31: Medición del desplazamiento del pistón por medio de un reloj comparador.

Una vez programado el desplazamiento del pistón con el controlador **SPAN1**, quedando éste en la posición de 0,7 unidades, se obtiene un rango de voltajes entre 2,00 - 2,18 V para la tensión (esto debido a que la máquina solo necesita el valor en tracción o compresión, y esta procederá a realizar el ensayo de fatiga), que traducido a fuerza corresponde a 49 kN – 53.44 kN (5000 – 5450 Kgf).

3.3.2 Calibración de los ensayos en varillas de 10 mm de diámetro.

Para las varillas de acero corrugadas de 10 mm de diámetro de las distintas marcas establecidas y en las condiciones planteadas (Estándar y Soldadas), se calibró la máquina universal de ensayos partiendo de la siguiente fórmula:

$$F = \varnothing^2 * \frac{\pi}{4} * f \quad (19)$$

Donde:

F: Fuerza que deberá programarse en la máquina para las varillas de 10 mm de diámetro.

\varnothing : Diámetro de la varilla en cm = 1 cm.

f: Fuerza programada para los ensayos de las varillas de 12 mm de diámetro. Equivalente a 2,18 V = 53.44 kN (5450 Kgf). Valor obtenido en los ensayos de varillas de 12 mm de diámetro.

$$\begin{aligned} 10 V & \longrightarrow 25000 Kgf \\ 2,18 V & \longrightarrow X \\ X & = \frac{2,18 V * 25000 Kgf}{10 V} = 5450 Kgf \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} F & = 1^2 * \frac{\pi}{4} * 5450 Kgf \\ F & = 4280,42 kgf \end{aligned}$$

Realizando la conversión de Kgf a V para poder programar la máquina MTS mediante el controlador **SPAN 1**, se obtiene el siguiente valor:

$$\begin{aligned} 25000 Kgf & \longrightarrow 10 V \\ 4280,42 Kgf & \longrightarrow X \\ X & = \frac{4280,42 Kgf * 10V}{25000 Kgf} = 1,71 V \end{aligned}$$

El valor calculado anteriormente de 1,71 V se lo obtuvo con el controlador **SPAN 1** ubicado en 0,7 unidades, igualmente que en el caso de las varillas de 12 mm de diámetro.

3.3.3 Calibración de los ensayos en varillas de 8 mm de diámetro.

Para las varillas de acero corrugadas de 8 mm de diámetro de las distintas marcas establecidas y en las condiciones planteadas (Estándar y Soldadas), se realizó el mismo procedimiento descrito en la sección anterior 3.3.2 Calibración de los ensayos en varillas de 10 mm de diámetro. A continuación se muestran sus resultados de cálculo:

Entonces:

$$F = 0,8^2 * \frac{\pi}{4} * 5450 \text{ Kgf}$$

$$F = 2739,47 \text{ kgf}$$

Realizando la conversión de Kgf a V para poder programar la máquina MTS mediante el controlador **SPAN 1**, se obtiene el siguiente valor:

$$25000 \text{ Kgf} \rightarrow 10 \text{ V}$$

$$2739,47 \text{ Kgf} \rightarrow X$$

$$X = \frac{2739,47 \text{ Kgf} * 10 \text{ V}}{25000 \text{ Kgf}} = 1,10 \text{ V}$$

El valor calculado anteriormente de 1,10 V se lo obtuvo con el controlador **SPAN 1** ubicado en 0,7 unidades, igualmente que en el caso de las varillas de 12 y 10 mm de diámetro.

Ensayos que no se pudieron ejecutar debido a limitaciones técnicas:

Ensayar las probetas con refuerzo de concreto como se planteó en el plan de trabajo inicial, no fue posible ya que la distancia libre entre mordazas era muy pequeña en comparación al refuerzo de concreto.



Figura 32: Panel de control de la Máquina universal de ensayos MTS.

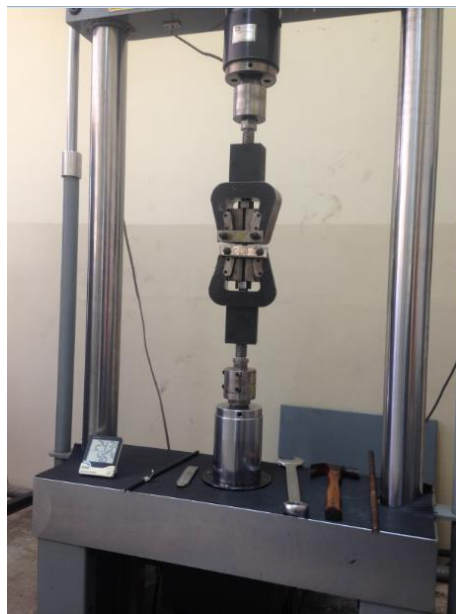


Figura 33: Imagen de las mordazas empleadas en los Ensayos de Fatiga de bajos ciclos. Laboratorio de Mecánica de Materiales. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 34: Montaje de varilla previo al ensayo de fatiga de bajos ciclos.



Figura 35: Obtención de Termografías el momento de los ensayos en las varillas de acero corrugado.



Figura 36: Graficador de la Máquina MTS, obtención de gráficas de histéresis.



Figura 37: Rotura de la varilla al finalizar el ensayo.



Figura 38: Varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro ensayadas en las dos condiciones establecidas: Estándar y Soldadas.



Figura 39: Varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro ensayadas en las dos condiciones establecidas: Estándar y Soldadas.



Figura 40: Varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro ensayadas en las dos condiciones establecidas: Estándar y Soldadas.

3.4 OBTENCIÓN Y TABULACIÓN DE RESULTADOS

3.4.1 Resultados de los Ensayos para las Varillas marca AMARILLO

Tabla 9:

Datos de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Estándar.

ESTÁNDAR									
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Voltaje (V)		Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo	
			Máximo	Mínimo	Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)
AMARILLAS	12	1	1.88	-2.75	4700	6875	20	22.5	50
		2	1.92	-2.16	4800	5400	24	22.9	50
		3	2.70	-2.17	6750	5425	18	23.0	49
		4	2.47	-1.91	6175	4775	34	23.2	49
		5	2.27	-2.50	5675	6250	22	23.5	48
		6	2.52	-2.47	6300	6175	19	23.7	50
		7	2.08	-2.66	5200	6650	19	24.0	50
	10	1	1.27	-1.69	3175	4225	23	24.3	42
		2	1.52	-1.60	3800	4000	21	24.4	42
		3	1.33	-1.95	3325	4875	25	24.5	39
		4	1.47	-1.63	3675	4075	23	24.8	38
		5	1.37	-1.67	3425	4175	24	25.2	36
		6	1.58	-1.71	3950	4275	24	25.2	37
		7	1.53	-1.72	3825	4300	21	25.3	36
	8	1	1.04	-1.06	2600	2650	17	22.8	54
		2	1.07	-1.07	2675	2675	22	23.1	53
		3	1.07	-1.26	2675	3150	15	23.3	53
		4	1.01	-1.03	2525	2575	18	23.6	53
		5	1.07	-1.12	2675	2800	15	23.8	52
		6	1.03	-1.08	2575	2700	19	23.9	51
		7	0.97	-1.00	2425	2500	17	24.0	50

Tabla 10:

Datos de los ensayos para la marca **AMARILLO**, varillas en condición Soldadas.

SOLDADAS									
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Voltaje (V)		Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo	
			Máximo	Mínimo	Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)
AMARILLO	12	1	2.01	-2.11	5025	5275	10	23.3	48
		2	1.95	-2.41	4875	6025	12	23.5	48
		3	1.93	-2.40	4825	6000	14	23.5	47
		4	1.66	-2.03	4150	5075	26	23.7	46
		5	1.89	-2.01	4725	5025	8	23.8	44
		6	1.71	-1.98	4275	4950	27	24.0	43
		7	2.16	-2.08	5400	5200	15	24.2	42
	10	1	1.34	-1.54	3350	3850	22	26.3	44
		2	1.45	-1.58	3625	3950	12	21.6	54
		3	1.32	-1.52	3300	3800	11	22.0	55
		4	1.39	-1.45	3475	3625	14	22.0	56
		5	1.40	-1.39	3500	3475	21	22.2	56
		6	1.28	-1.51	3200	3775	11	22.4	55
		7	1.29	-1.39	3225	3475	21	22.8	55
	8	1	0.58	-0.84	1450	2100	2	23.8	51
		2	0.58	-0.86	1450	2150	2	23.8	51
		3	0.98	-0.92	2450	2300	9	25.1	50
		4	0.98	-1.32	2450	3300	6	25.2	50
		5	1.03	-1.46	2575	3650	12	25.3	49
		6	0.99	-1.20	2475	3000	12	21.5	57
		7	0.53	-0.82	1325	2050	2	25.2	56

3.4.2 Resultados de los Ensayos para las Varillas marca ROJO

Tabla 11:

Datos de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Estándar.

Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Voltaje (V)		Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo	
			Máximo	Mínimo	Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)
ROJAS	12	1	2.18	-2.46	5450	6150	16	23.9	50
		2	2.09	-2.48	5225	6200	16	24.2	47
		3	1.75	-2.05	4375	5125	18	24.2	46
		4	1.98	-2.52	4950	6300	18	24.5	46
		5	2.00	-2.35	5000	5875	16	25.1	45
		6	1.73	-2.18	4325	5450	26	25.1	45
		7	1.98	-2.45	4950	6125	22	25.2	44
	10	1	1.49	-1.54	3725	3850	29	25.4	36
		2	1.40	-1.62	3500	4050	21	24.9	49
		3	1.53	-1.69	3825	4225	29	23.3	53
		4	1.39	-1.64	3475	4100	28	23.8	52
		5	1.43	-1.50	3575	3750	28	24.0	52
		6	1.42	-1.68	3550	4200	31	24.3	50
		7	1.44	-1.73	3600	4325	36	24.9	49
	8	1	1.05	-1.13	2625	2825	20	24.1	50
		2	0.92	-0.92	2300	2300	13	24.3	50
		3	0.96	-0.94	2400	2350	14	24.5	50
		4	0.93	-0.91	2325	2275	14	24.6	49
		5	0.89	-0.90	2225	2250	13	24.7	49
		6	0.91	-1.00	2275	2500	15	23.2	52
		7	1.04	-1.07	2600	2675	18	23.0	53

Tabla 12:

Datos de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Soldadas.

SOLDADAS									
Marca	Diámetro	Número de Ensayos	Voltaje (V)		Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo	
			Máximo	Mínimo	Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)
ROJAS	12	1	1.83	-2.23	4575	5575	24	24.3	42
		2	1.57	-1.93	3925	4825	22	24.5	42
		3	1.92	-2.04	4800	5100	23	24.8	41
		4	1.49	-1.73	3725	4325	23	22.0	50
		5	2.00	-2.22	5000	5550	14	23.2	48
		6	1.45	-2.19	3625	5475	25	23.3	48
		7	2.00	-2.50	5000	6250	12	23.7	48
	10	1	1.47	-1.78	3675	4450	15	23.0	53
		2	1.23	-1.22	3075	3050	27	23.2	53
		3	1.23	-1.30	3075	3250	14	23.6	52
		4	1.30	-1.49	3250	3725	27	23.8	51
		5	1.29	-1.55	3225	3875	19	24.1	49
		6	1.47	-1.77	3675	4425	19	24.4	49
		7	1.36	-1.67	3400	4175	24	24.5	49
	8	1	0.80	-0.71	2000	1775	2	23.8	52
		2	0.87	-0.93	2175	2325	7	24.7	52
		3	0.86	-0.87	2150	2175	4	24.8	52
		4	0.83	-0.89	2075	2225	2	24.8	52
		5	0.77	-0.75	1925	1875	6	24.8	51
		6	0.76	-0.73	1900	1825	6	24.9	51
		7	0.92	-0.92	2300	2300	13	25.0	50

3.4.3 Resultados de los Ensayos para las Varillas marca BLANCO

Tabla 13:

Datos de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Estándar.

ESTÁNDAR									
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Voltaje (V)		Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo	
			Máximo	Mínimo	Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)
BLANCAS	12	1	1.95	-2.37	4875	5925	18	22.1	50
		2	2.03	-2.48	5075	6200	21	22.5	50
		3	1.84	-2.30	4600	5750	21	22.9	50
		4	2.15	-2.55	5375	6375	16	22.9	49
		5	1.93	-2.24	4825	5600	21	22.1	50
		6	1.93	-2.54	4825	6350	17	22.4	50
		7	2.08	-2.66	5200	6650	10	23.1	49
	10	1	1.43	-1.55	3575	3875	18	25.3	47
		2	1.34	-1.48	3350	3700	13	25.4	45
		3	1.32	-1.49	3300	3725	24	25.6	45
		4	1.44	-1.71	3600	4275	15	25.8	43
		5	1.41	-1.62	3525	4050	14	25.9	43
		6	1.39	-1.54	3475	3850	14	26.1	43
		7	1.40	-1.52	3500	3800	15	26.2	44
	8	1	0.99	-0.95	2475	2375	14	23.0	53
		2	0.99	-1.07	2475	2675	17	23.1	53
		3	1.02	-1.07	2550	2675	11	23.4	53
		4	0.98	-0.98	2450	2450	13	23.6	54
		5	0.99	-0.99	2475	2475	15	23.7	53
		6	0.98	-0.96	2450	2400	11	23.7	52
		7	0.96	-0.95	2400	2375	14	23.7	52

Tabla 14:

Datos de los ensayos para la marca **BLANCO**, varillas en condición Soldadas.

SOLDADAS									
Marca	Diámetro	Número de Ensayos	Voltaje (V)		Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo	
			Máximo	Mínimo	Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)
BLANCAS	12	1	2.00	-2.80	5000	7000	19	23.8	47
		2	2.01	-2.51	5025	6275	20	24.1	46
		3	2.25	-2.70	5625	6750	25	24.2	46
		4	1.87	-2.70	4675	6750	20	24.5	45
		5	1.99	-2.98	4975	7450	20	24.7	46
		6	2.09	-3.01	5225	7525	15	25.1	47
		7	2.59	-3.07	6475	7675	17	23.7	44
	10	1	1.22	-1.23	3050	3075	12	24.9	49
		2	1.32	-1.43	3300	3575	14	25.0	48
		3	1.33	-1.41	3325	3525	13	25.1	48
		4	1.29	-1.41	3225	3525	17	25.2	47
		5	1.37	-1.38	3425	3450	9	22.4	54
		6	1.29	-1.66	3225	4150	15	22.8	55
		7	1.32	-1.77	3300	4425	9	22.6	55
	8	1	1.00	-1.47	2500	3675	12	23.8	52
		2	0.98	-1.33	2450	3325	12	24.0	51
		3	0.97	-1.11	2425	2775	11	24.1	52
		4	0.91	-1.47	2275	3675	3	24.2	52
		5	1.03	-1.31	2575	3275	7	24.2	52
		6	1.03	-1.46	2575	3650	9	24.4	52
		7	1.01	-1.34	2525	3350	15	24.5	52

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 VARILLAS MARCA AMARILLO – ESTÁNDAR

4.1.1 Varillas de 12 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Amarillo “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

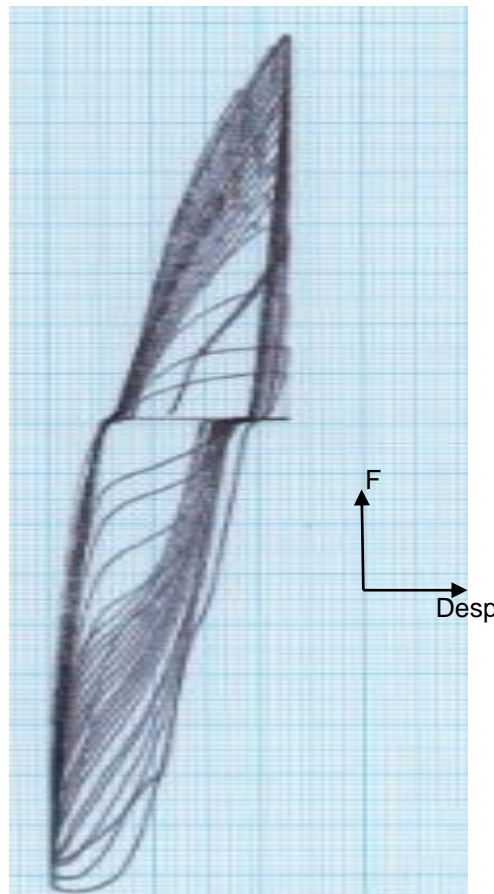


Figura 41: Gráfica del ciclo de histéresis, Segundo ensayo, varilla de acero corrugado marca AMARILLO, diámetro 12 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 5,2 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 4800 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 5400 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 24.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 28,9 °C.
- Temperatura ambiente: 22,9 °C
- % de humedad en el ambiente: 50 %

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

Se presenta el Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla (J/m^3) antes de llegar a su punto de rotura.

Para obtener la energía por unidad de volumen absorbida por la varilla se calcula el área bajo la curva de la gráfica obtenida en esta experimentación:

✓ Fuerza (Kgf) – Desplazamiento (mm).

En este caso, en donde la varilla de acero corrugado se encuentra sometida a fatiga de bajos ciclos, se calculó el área bajo las distintas curvas histeréticas que se generan el momento de la experimentación. Es decir, cada ciclo existente en las gráficas de histéresis obtenidas en los ensayos, genera un área que indica un valor de Índice de Energía.

El cálculo de las distintas áreas existentes bajo las curvas (Índice de Energía) se lo realizó con la ayuda de un software de diseño asistido por computador.

En la *Figura 42*. Obtenida del software de diseño mencionado, se observa los dos siguientes datos importantes:

- **Select objects: Specify opposite corner: 24 found** – El cual hace referencia al Número de ciclos hasta agotar la capacidad a fatiga por la varilla. En este caso, soportó 24 ciclos.
- **Area: 23641 Kgf mm** – Refiere al área calculada bajo todos los ciclos que dicha varilla presentó el momento de ser ensayada. Cabe recalcar que ésta no es la energía real absorbida por la varilla ya que se encuentra con otros parámetros de escala que a continuación serán calculados para obtener un índice de energía por unidad de volumen absorbida que permita comparar las 3 marcas de varillas estudiadas en el presente proyecto.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 24 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                23641.9646
Perimeter:           6259.3214
Bounding box:        X: 113.4722 -- 137.6019
                    Y: 54.3597 -- 226.1838
Centroid:            X: 125.2335
                    Y: 142.4559
Moments of inertia:  X: 504675177.2067
                    Y: 371560137.4487
Product of inertia:  XY: -425375127.7120
Radii of gyration:   X: 146.1047
                    Y: 125.3640
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 25417345.2302 along [0.9895 -0.1444]
                    J: 248266.8585 along [0.1444 0.9895]

```

Figura 42: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Segundo ensayo Estándar, Marca AMARILLO. ($\varnothing 12$ mm).

Para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla es necesario calcular el desplazamiento exacto del pistón que ejerce la carga y descarga de la fuerza aplicada a la varilla de acero corrugado. Para ello se empleó un reloj comparador (palpador), como se muestra en la *Figura 43*, de esta manera se conoce con exactitud cuál es el desplazamiento del pistón mencionado. Una vez conocido éste desplazamiento, se lo compara con la distancia dibujada en el eje de las X de las gráficas histeréticas obtenidas.



Figura 43: Proceso de obtención del desplazamiento del pistón mediante reloj comparador.

Teniendo así los siguientes resultados:

4,66 mm de desplazamiento del pistón

Corresponde a

21,5 mm en el papel milimetrado

Por tanto:

Si: 21,5 mm en papel — — — —→ 4,66 mm se desplaza el pistón

Entonces: 1 mm en papel — — — —→ X se desplaza el pistón

$$X = \frac{1 \text{ mm en papel} * 4,66 \text{ mm se desplaza el pistón}}{21,5 \text{ mm en papel}}$$

X = 0,2167 mm se desplaza el pistón. (desplazamiento real)

En la *Figura 42*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca AMARILLO, segundo ensayo, de 12 mm de diámetro en condición Estándar, en los 24 ciclos soportados es de: **23641** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 23641 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 50,2075 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 6^2 \cdot 24 = 2714,34 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{50,2075 \text{ J}}{2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 18,6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.1.2 Varillas de 10 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Amarillo “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

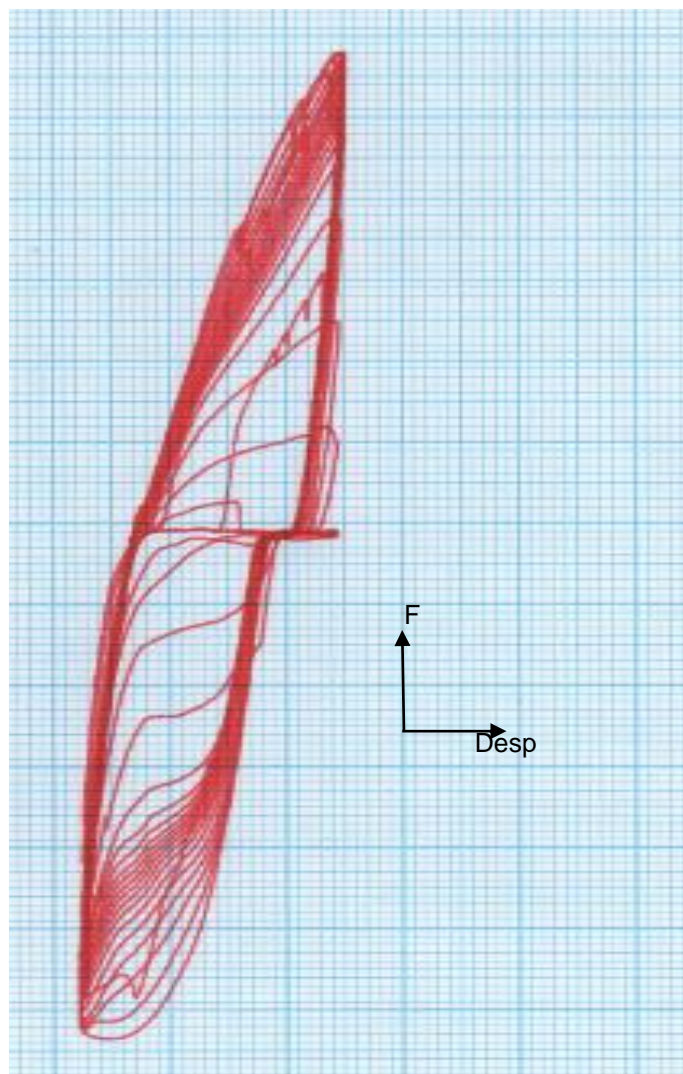


Figura 44: Gráfica del ciclo de histéresis, Segundo ensayo, varilla de acero corrugado marca AMARILLO, diámetro 10 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,96 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3800 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 4000 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 21.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 29,1 °C.
- Temperatura ambiente: 24,4 °C.
- % de humedad en el ambiente: 42 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Write analysis to a file? [Yes/No] <N>: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 21 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                16638.0414
Perimeter:           4554.5059
Bounding box:        X: 126.2230  --  148.9744
                    Y: 84.2757  --  206.0737
Centroid:            X: 137.5483
                    Y: 144.2762
Moments of inertia:  X: 356418981.2326
                    Y: 315302857.5937
Product of inertia:  XY: -332034378.7073
Radii of gyration:   X: 146.3623
                    Y: 137.6616
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 10434315.8530 along [0.9830 -0.1837]
                    J: 172554.5977 along [0.1837 0.9830]

```

Figura 45: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Segundo ensayo Estándar, Marca AMARILLO. ($\varnothing 10$ mm).

En la *Figura 45*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca AMARILLO, segundo ensayo, de 10 mm de diámetro en condición Estándar, en los 21 ciclos soportados es de: **16638** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 16638 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 35.3335 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 5^2 \cdot 20 = 1570,8 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{35,3335 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 22,1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.1.3 Varillas de 8 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Amarillo “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

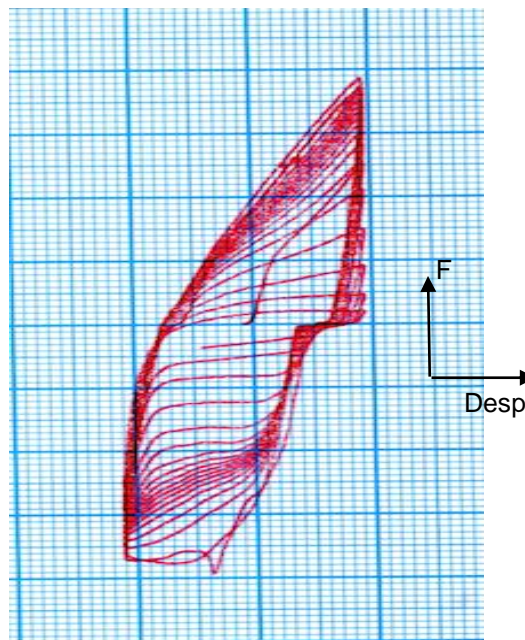


Figura 46: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca AMARILLO, diámetro 8 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,55 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 2525 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 2575 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 18.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 25,3 °C.
- Temperatura ambiente: 23,6 °C.
- % de humedad en el ambiente: 53 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 18 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                7099.1401
Perimeter:           1938.9524
Bounding box:        X: 154.2182 -- 174.1284
                    Y: 106.2275 -- 184.5224
Centroid:            X: 164.1432
                    Y: 143.2180
Moments of inertia:  X: 147047502.3418
                    Y: 191444791.8177
Product of inertia:  XY: -167256823.2901
Radii of gyration:   X: 143.9216
                    Y: 164.2173
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 1533950.8000 along [0.9653 -0.2612]
                    J: 73008.7537 along [0.2612 0.9653]

```

Figura 47: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Cuarto ensayo Estándar, Marca AMARILLO. ($\varnothing 8$ mm).

En la *Figura 47*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca AMARILLO, cuarto ensayo, de 8 mm de diámetro en condición Estándar, en los 18 ciclos soportados es de: **7099** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 7099 \text{ Kgf} \cdot \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 15,0762 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 4^2 \cdot 16 = 804,25 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{15,0762 \text{ J}}{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 18,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.2 VARILLAS MARCA AMARILLO – SOLDADAS.

4.2.1 Varillas de 12 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Amarillo “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

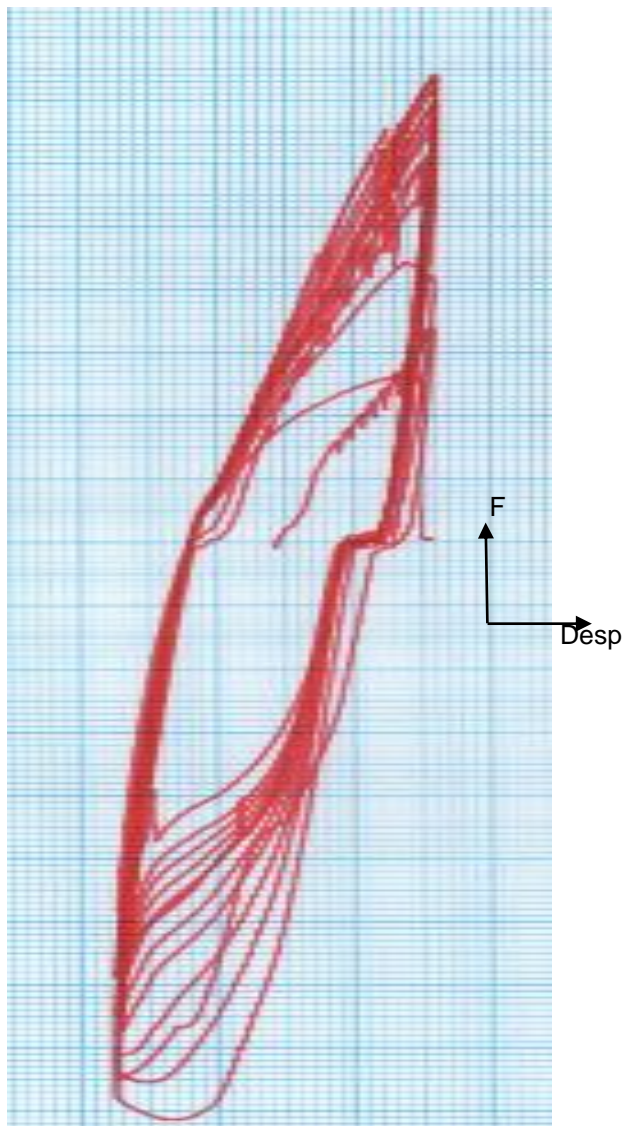


Figura 48: Gráfica del ciclo de histéresis, Tercer ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca AMARILLO, diámetro 12 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 5,2 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 4825 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 6000 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 14.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 27,7 °C.
- Temperatura ambiente: 23,5 °C.
- % de humedad en el ambiente: 47 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 14 found
Select objects:
-----
          REGIONS
-----
Area:                16035.2075
Perimeter:           4385.7013
Bounding box:        X: 46.4349 -- 69.9657
                    Y: 56.0150 -- 221.8336
Centroid:            X: 58.0106
                    Y: 139.6525
Moments of inertia:  X: 329610123.2756
                    Y: 54482434.2176
Product of inertia:  XY: -132331736.4397
Radii of gyration:   X: 143.3715
                    Y: 58.2896
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 17230434.9559 along [0.9896 -0.1436]
                    J: 168307.1421 along [0.1436 0.9896]

```

Figura 49: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Tercer ensayo – Soldada, Marca AMARILLO. ($\varnothing 12$ mm).

En la *Figura 49*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca AMARILLO, tercer ensayo, de 12 mm de diámetro en condición Soldada, en los 14 ciclos soportados es de: **16035** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 16035 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 34,0533 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 6^2 \cdot 24 = 2714,34 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{34,0533 \text{ J}}{2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 12,6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.2.2 Varillas de 10 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Amarillo “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

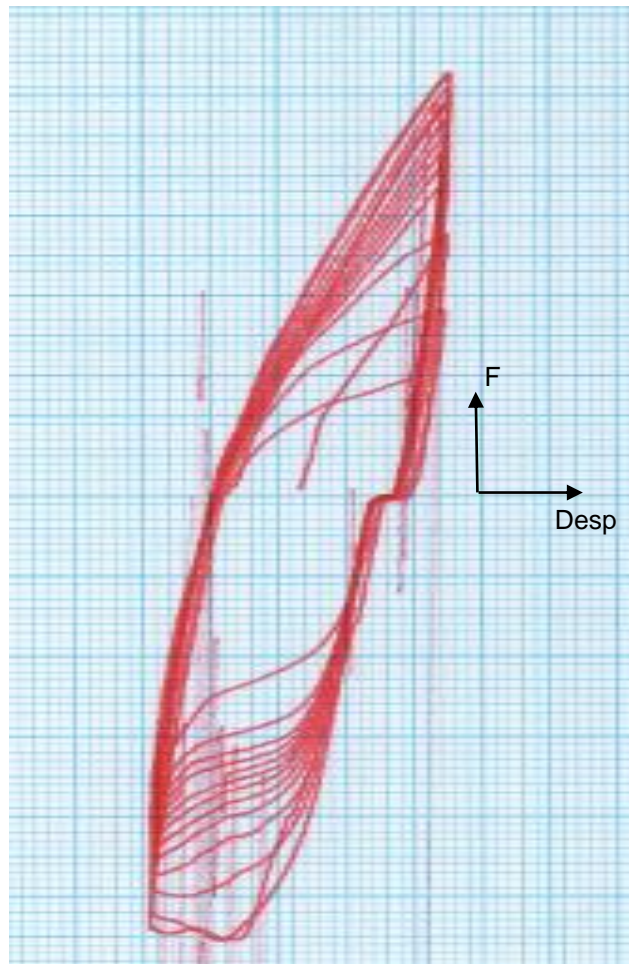


Figura 50: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca AMARILLO, diámetro 10 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,96 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3475 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 3625 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 14.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 27,5 °C.
- Temperatura ambiente: 22 °C.
- % de humedad en el ambiente: 56 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 14 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                11030.3432
Perimeter:           2572.1271
Bounding box:        X: 4056.1325 -- 4078.5167
                    Y: 900.9309 -- 1010.0302
Centroid:            X: 4067.1715
                    Y: 951.7109
Moments of inertia:  X: 9995944968.8244
                    Y: 1.8246E+11
Product of inertia:  XY: -4.2697E+10
Radii of gyration:   X: 951.9572
                    Y: 4067.1748
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 5358085.3675 along [0.9821 -0.1883]
                    J: 115253.7942 along [0.1883 0.9821]

```

Figura 51: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Cuarto ensayo – Soldada, Marca AMARILLO. ($\varnothing 10$ mm).

En la *Figura 51*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca AMARILLO, cuarto ensayo, de 10 mm de diámetro en condición Soldada, en los 14 ciclos soportados es de: **11030** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 11030 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 23,4247 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$
A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 5^2 \cdot 20 = 1570,8 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{23,4247 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 14,6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.2.3 Varillas de 8 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Amarillo “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 52: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca AMARILLO, diámetro 8 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,55 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 2450 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 3300 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 6.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 29 °C.
- Temperatura ambiente: 25,2 °C.
- % de humedad en el ambiente: 50 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 6 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                3156.2391
Perimeter:           926.4770
Bounding box:        X: 154.3103 -- 174.0202
                    Y: 94.4481 -- 182.7436
Centroid:            X: 164.1979
                    Y: 140.5390
Moments of inertia: X: 63325334.1573
                    Y: 85175064.8634
Product of inertia: XY: -73060578.8637
Radii of gyration:  X: 141.6458
                    Y: 164.2749
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 1039292.6280 along [0.9732 -0.2298]
                    J: 26338.0782 along [0.2298 0.9732]

```

Figura 53: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Cuarto ensayo – Soldada, Marca AMARILLO. ($\varnothing 8$ mm).

En la *Figura 53*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca AMARILLO, cuarto ensayo, de 8 mm de diámetro en condición Soldada, en los 6 ciclos soportados es de: **3156** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 3156 \text{ Kgf} \cdot \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 6,7028 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$

A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 4^2 \cdot 16 = 804,25 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{6,7028 \text{ J}}{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 8,4 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.3 VARILLAS MARCA ROJO – ESTÁNDAR

4.3.1 Varillas de 12 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Rojo “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

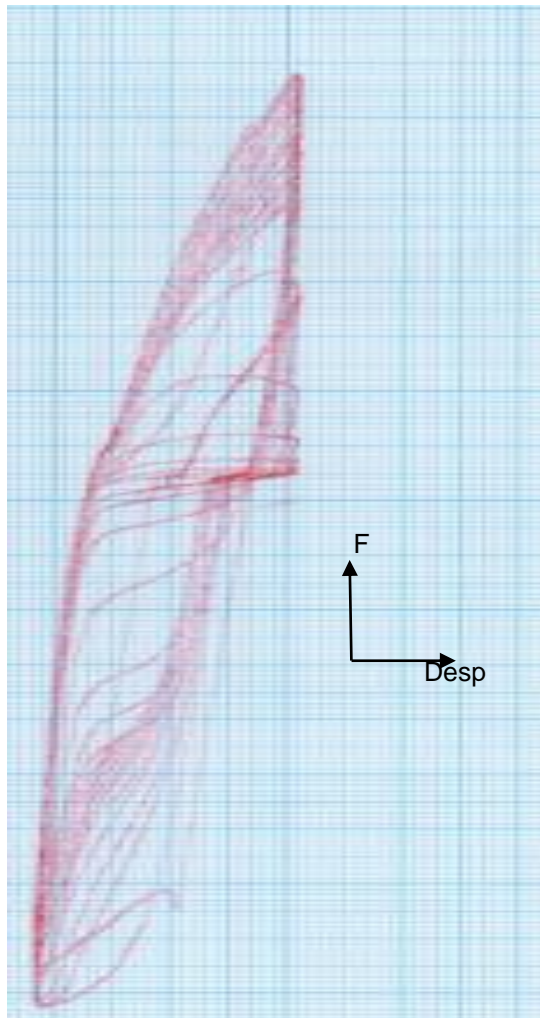


Figura 54: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca ROJO, diámetro 12 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 5,2 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 4950 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 6300 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 18.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 28,6 °C.
- Temperatura ambiente: 24,5 °C.
- % de humedad en el ambiente: 46 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Write analysis to a file? [Yes/No] <N>: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 18 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                16081.6034
Perimeter:           4357.0838
Bounding box:        X: 122.2975 -- 145.2200
                    Y: 55.0456 -- 225.4612
Centroid:            X: 133.3563
                    Y: 142.2998
Moments of inertia:  X: 344285314.0622
                    Y: 286500361.1511
Product of inertia:  XY: -307638847.4969
Radii of gyration:   X: 146.3169
                    Y: 133.4744
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 18974298.7988 along [0.9912 -0.1323]
                    J: 177490.5172 along [0.1323 0.9912]

```

Figura 55: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Cuarto ensayo Estándar, Marca ROJO. ($\varnothing 12$ mm)

En la *Figura 55*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca ROJO, cuarto ensayo, de 12 mm de diámetro en condición Estándar, en los 18 ciclos soportados es de: **16081** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 16081 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 34,1519 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 6^2 \cdot 24 = 2714,34 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{34,1519 \text{ J}}{2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 12,6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.3.2 Varillas de 10 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Rojo “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

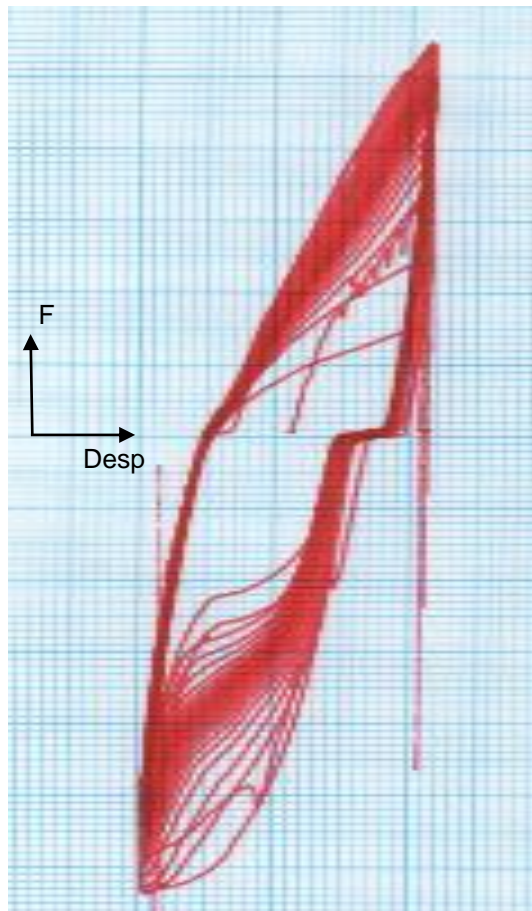


Figura 56: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca ROJO, diámetro 10 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,96 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3475 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 4100 Kgf.

- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 28.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 28,1 °C.
- Temperatura ambiente: 23,8 °C.
- % de humedad en el ambiente: 52 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 28 found
Select objects:
-----      REGIONS      -----
Area:                20156.7231
Perimeter:           5920.5602
Bounding box:        X: 45.0728 -- 67.0574
                    Y: 84.6780 -- 203.1762
Centroid:            X: 56.0188
                    Y: 144.9105
Moments of inertia:  X: 433474815.1448
                    Y: 63867729.7533
Product of inertia:  XY: -165727880.2901
Radii of gyration:   X: 146.6466
                    Y: 56.2899
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 10642920.0849 along [0.9787 -0.2051]
                    J: 173522.3511 along [0.2051 0.9787]

```

Figura 57: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Cuarto ensayo Estándar, Marca ROJO. ($\varnothing 10$ mm).

En la *Figura 57*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca ROJO, cuarto ensayo, de 10 mm de diámetro en condición Estándar, en los 28 ciclos soportados es de: **20156** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 20156 \text{ Kgf} \cdot \text{mm papel} \cdot \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 42,806 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 5^2 \cdot 20 = 1570,8 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{42,806 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 26,7 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.3.3 Varillas de 8 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Rojo “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

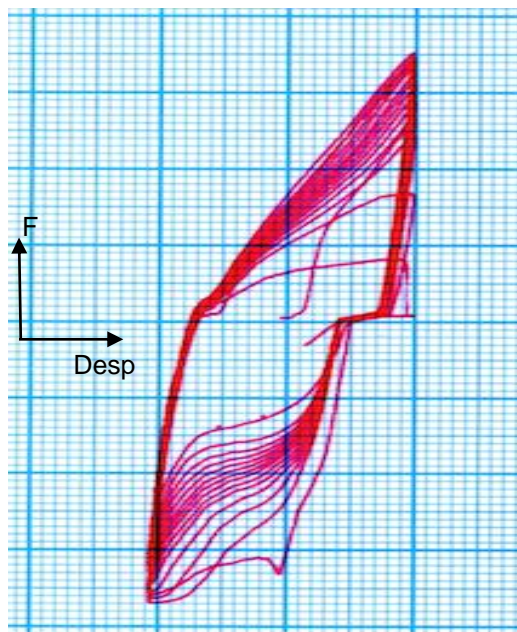


Figura 58: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado marca ROJO, diámetro 8 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,55 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 2275 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 2500 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 15.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 27,7 °C.
- Temperatura ambiente: 23,2 °C.
- % de humedad en el ambiente: 52 %

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 15 found
Select objects:
-----
          REGIONS
-----
Area:                6898.7391
Perimeter:           1915.5139
Bounding box:        X: 141.8834 -- 163.0092
                    Y: 107.4315 -- 180.0010
Centroid:            X: 152.4023
                    Y: 143.0087
Moments of inertia: X: 142329779.7959
                    Y: 160419409.6637
Product of inertia: XY: -150729743.2411
Radii of gyration:  X: 143.6359
                    Y: 152.4908
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 1358812.0272 along [0.9530 -0.3029]
                    J: 67637.8344 along [0.3029 0.9530]

```

Figura 59: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Sexto ensayo Estándar, Marca ROJO. ($\varnothing 8$ mm).

En la *Figura 59*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca ROJO, sexto ensayo, de 8 mm de diámetro en condición Estándar, en los 15 ciclos soportados es de: **6898** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 6898 \text{ Kgf} \cdot \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 14,6506 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$

A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 4^2 \cdot 16 = 804,25 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{14,6506 \text{ J}}{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 18,3 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.4 VARILLAS MARCA ROJO – SOLDADAS.

4.4.1 Varillas de 12 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Rojo “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

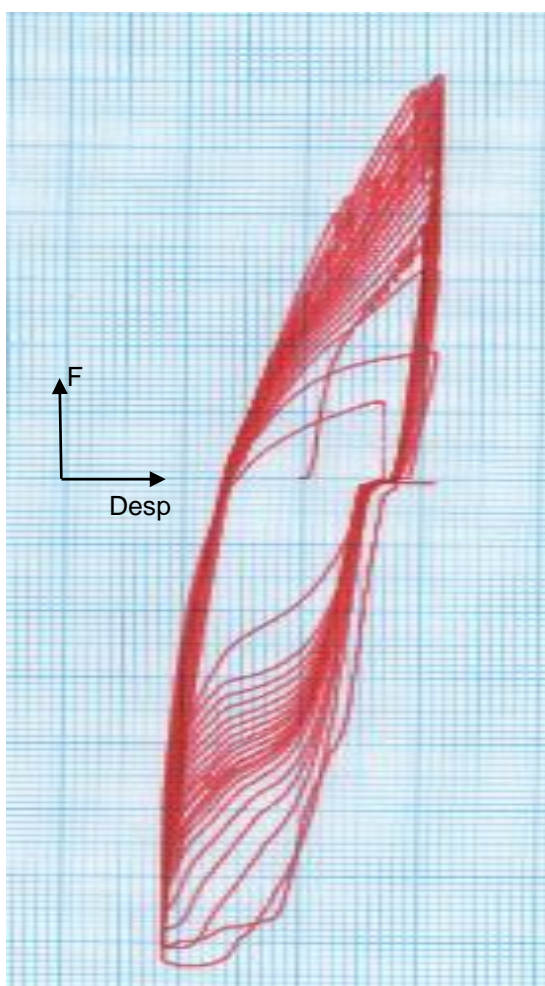


Figura 60: Gráfica del ciclo de histéresis, Segundo ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca ROJO, diámetro 12 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 5,2 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3925 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 4825 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 22.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 28,3 °C.
- Temperatura ambiente: 24,5 °C.
- % de humedad en el ambiente: 42 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 22 found
Select objects:
-----
          REGIONS
-----
Area:                20570.5459
Perimeter:           5225.4914
Bounding box:        X: 130.9653 -- 154.6408
                    Y: 73.0457 -- 207.7697
Centroid:            X: 142.8257
                    Y: 141.2501
Moments of inertia: X: 423764844.7399
                    Y: 420259237.9915
Product of inertia: XY: -417290810.6800
Radii of gyration:  X: 143.5290
                    Y: 142.9341
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 13752137.9409 along [0.9850 -0.1726]
                    J: 234668.3925 along [0.1726 0.9850]

```

Figura 61: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Segundo ensayo – Soldada, Marca ROJO. ($\varnothing 12$ mm).

En la *Figura 61* Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca ROJO, segundo ensayo, de 12 mm de diámetro en condición Soldada, en los 22 ciclos soportados es de: **20570** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 20570 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 43,6848 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 6^2 \cdot 24 = 2714,34 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{43,6848 \text{ J}}{2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 16,2 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.4.2 Varillas de 10 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Rojo “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

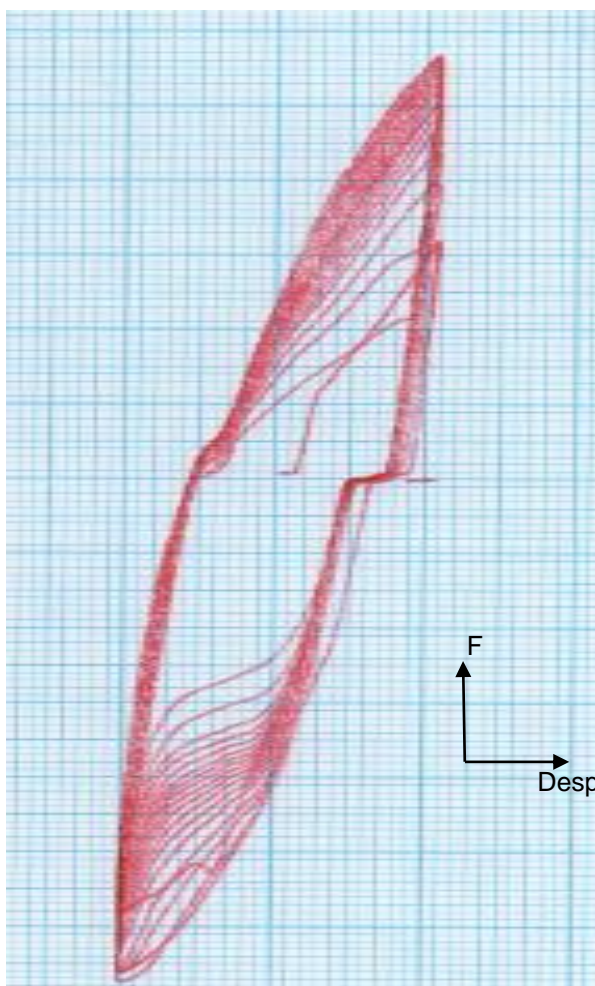


Figura 62: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca ROJO, diámetro 10 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,96 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3675 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 4425 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 19.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 27,7 °C.
- Temperatura ambiente: 24,4 °C.
- % de humedad en el ambiente: 49 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Write analysis to a file? [Yes/No] <N>: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 19 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                15179.0282
Perimeter:           4072.5285
Bounding box:        X: 144.0384 -- 166.1010
                    Y: 79.0486 -- 203.6969
Centroid:            X: 155.0671
                    Y: 142.2639
Moments of inertia: X: 316068102.1555
                    Y: 365415751.3027
Product of inertia: XY: -336463711.3925
Radii of gyration:  X: 144.3007
                    Y: 155.1571
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 9155622.0059 along [0.9835 -0.1811]
                    J: 127783.5565 along [0.1811 0.9835]

```

Figura 63: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Sexto ensayo – Soldada, Marca ROJO. ($\varnothing 10$ mm).

En la *Figura 63*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca ROJO, sexto ensayo, de 10 mm de diámetro en condición Soldada, en los 19 ciclos soportados es de: **15179** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 15179 \text{ Kg} \cdot \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 32,2351 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 5^2 \cdot 20 = 1570,8 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{32,2351 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 20,1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.4.3 Varillas de 8 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Rojo “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 64: Gráfica del ciclo de histéresis, Quinto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca ROJO, diámetro 8 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,55 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 1925 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 1875 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 6.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 28,3 °C.
- Temperatura ambiente: 24,8 °C.
- % de humedad en el ambiente: 51 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 6 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                2869.2171
Perimeter:           755.5269
Bounding box:        X: 143.9758 -- 165.0440
                    Y: 111.6469 -- 180.6993
Centroid:            X: 154.5898
                    Y: 143.3646
Moments of inertia: X: 59475258.1995
                    Y: 68645263.8459
Product of inertia: XY: -63733457.7253
Radii of gyration:   X: 143.9748
                    Y: 154.6762
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 547003.2560 along [0.9563 -0.2924]
                    J: 32700.2592 along [0.2924 0.9563]

```

Figura 65: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Quinto ensayo – Soldada, Marca ROJO. ($\varnothing 8$ mm).

En la *Figura 65*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca ROJO, quinto ensayo, de 8 mm de diámetro en condición Soldada, en los 6 ciclos soportados es de: **2869** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 2869 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 6,0934 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 4^2 \cdot 16 = 804,25 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{6,0934 \text{ J}}{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 7,6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.5 VARILLAS MARCA BLANCO – ESTÁNDAR

4.5.1 Varillas de 12 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Blanco “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

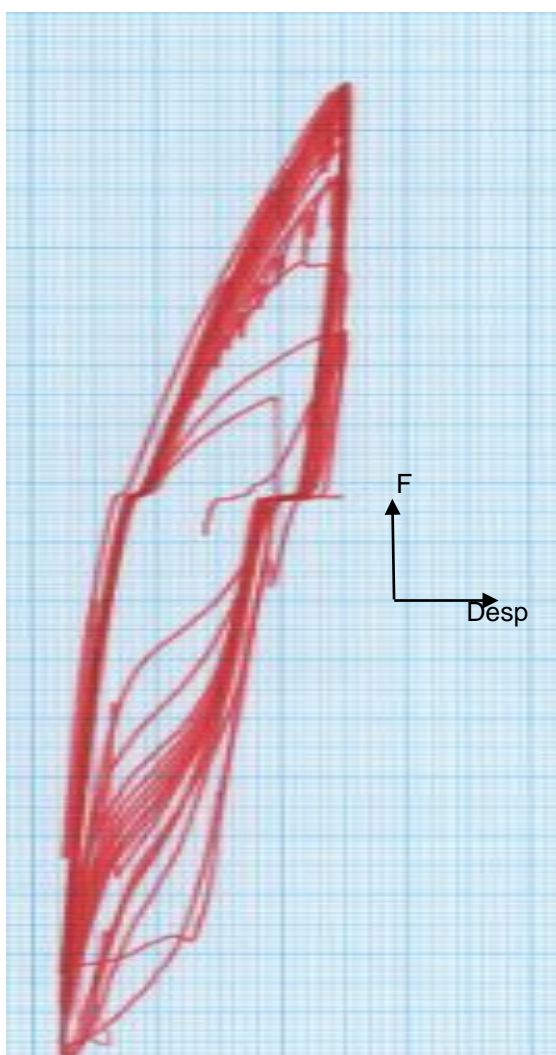


Figura 66: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado marca BLANCO, diámetro 12 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 5,2 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 4825 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 6350 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 17.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 29 °C.
- Temperatura ambiente: 22,4 °C.
- % de humedad en el ambiente: 50 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 17 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                18924.9310
Perimeter:           5402.9268
Bounding box:        X: 126.2744 -- 149.4286
                    Y: 59.3450 -- 226.1045
Centroid:            X: 137.4643
                    Y: 146.7494
Moments of inertia:  X: 428350312.8160
                    Y: 358232339.2967
Product of inertia:  XY: -384765094.8060
Radii of gyration:   X: 150.4466
                    Y: 137.5831
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 21230426.3878 along [0.9896 -0.1439]
                    J: 183191.0315 along [0.1439 0.9896]

```

Figura 67: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Sexto ensayo Estándar, Marca BLANCO. (\varnothing 12 mm).

En la *Figura 67*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca BLANCO, sexto ensayo, de 12 mm de diámetro en condición Estándar, en los 17 ciclos soportados es de: **18924** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 18924 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 40,1901 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 6^2 \cdot 24 = 2714,34 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{40,1901 \text{ J}}{2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 14,9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.5.2 Varillas de 10 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Blanco “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

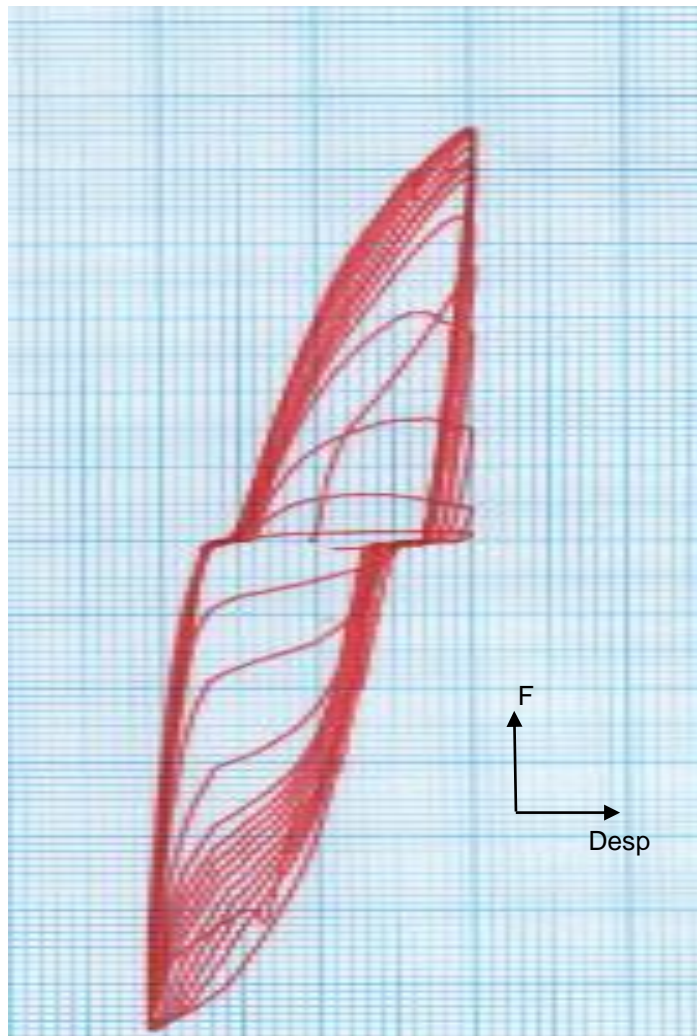


Figura 68: Gráfica del ciclo de histéresis, Cuarto ensayo, varilla de acero corrugado marca BLANCO, diámetro 10 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,96 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3600 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 4275 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 15.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 30,1 °C.
- Temperatura ambiente: 25,8 °C.
- % de humedad en el ambiente: 43 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command: *Cancel*
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 15 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                11213.9469
Perimeter:           3058.4938
Bounding box:        X: 132.8479 -- 153.9886
                    Y: 82.9361 -- 204.9542
Centroid:            X: 143.3164
                    Y: 145.2810
Moments of inertia:  X: 243804138.7774
                    Y: 230641400.6191
Product of inertia:  XY: -234694416.1377
Radii of gyration:   X: 147.4488
                    Y: 143.4133
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 7324022.4889 along [0.9855 -0.1697]
                    J: 103808.3565 along [0.1697 0.9855]

```

Figura 69: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Cuarto ensayo Estándar, Marca BLANCO. ($\varnothing 10$ mm).

En la *Figura 69*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca BLANCO, cuarto ensayo, de 10 mm de diámetro en condición Estándar, en los 15 ciclos soportados es de: **11213** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 11213 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 23,8146 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 5^2 \cdot 20 = 1570,8 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{23,8146 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 14,9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.5.3 Varillas de 8 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Blanco “Estándar”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

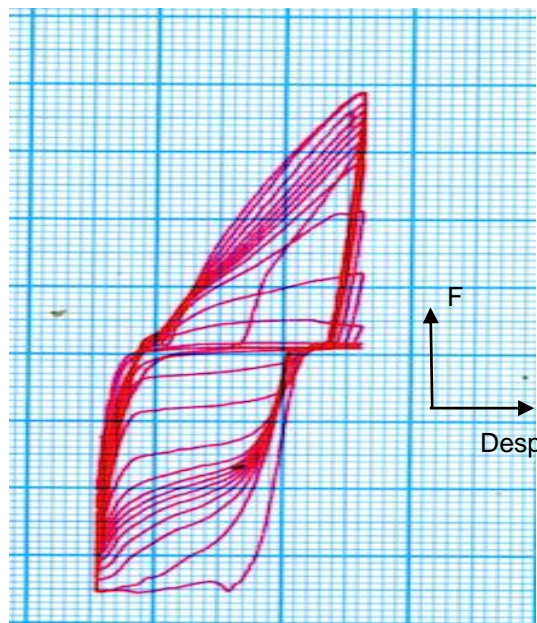


Figura 70: Gráfica del ciclo de histéresis, Primer ensayo, varilla de acero corrugado marca BLANCO, diámetro 8 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,55 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 2475 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 2375 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 14.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 30,8 °C.
- Temperatura ambiente: 23 °C.
- % de humedad en el ambiente: 53 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 14 found
Select objects:
-----
          REGIONS
-----
Area:                6434.9488
Perimeter:           1725.4266
Bounding box:        X: 38.9279 -- 60.4489
                    Y: 108.9327 -- 183.5566
Centroid:            X: 49.5663
                    Y: 143.1493
Moments of inertia: X: 133229310.7858
                    Y: 15993032.5199
Product of inertia: XY: -46037069.8092
Radii of gyration:  X: 143.8889
                    Y: 49.8532
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 1476946.3520 along [0.9597 -0.2810]
                    J: 72687.7663 along [0.2810 0.9597]

```

Figura 71: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Primer ensayo Estándar, Marca BLANCO. ($\varnothing 8$ mm).

En la *Figura 71*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca BLANCO, primer ensayo, de 8 mm de diámetro en condición Estándar, en los 14 ciclos soportados es de: **6434** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 6434 \text{ Kgf} \cdot \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 13,6656 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$

A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 4^2 \cdot 16 = 804,25 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{13,6656 \text{ J}}{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 17,1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.6 VARILLAS MARCA BLANCO – SOLDADAS.

4.6.1 Varillas de 12 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Blanco “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 12 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

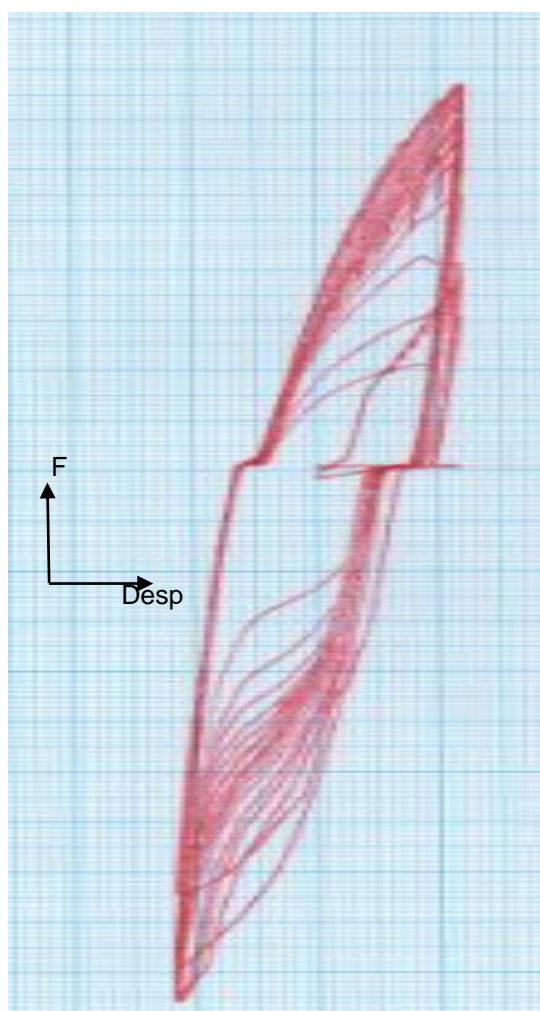


Figura 72: Gráfica del ciclo de histéresis, Primer ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca BLANCO, diámetro 12 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 5,2 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 5000 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 7000 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 19.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 28,5 °C.
- Temperatura ambiente: 23,8 °C.
- % de humedad en el ambiente: 47 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 19 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                22045.2311
Perimeter:           5588.9301
Bounding box:        X: 42.3483  --  65.9201
                    Y: 31.8926  -- 215.3521
Centroid:            X: 54.1684
                    Y: 132.7312
Moments of inertia:  X: 415252673.6236
                    Y: 65407947.9589
Product of inertia:  XY: -162168987.8259
Radii of gyration:   X: 137.2457
                    Y: 54.4701
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 27373642.5311 along [0.9907 -0.1363]
                    J: 217813.8964 along [0.1363 0.9907]

```

Figura 73: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Primer ensayo – Soldada, Marca BLANCO. (Ø12 mm).

En la *Figura 73*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca BLANCO, primer ensayo, de 12 mm de diámetro en condición Soldada, en los 19 ciclos soportados es de: **22045** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 22045 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 46,8166 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 6^2 \cdot 24 = 2714,34 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/v} = \frac{46,8166 \text{ J}}{2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 17,3 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.6.2 Varillas de 10 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Blanco “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 10 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

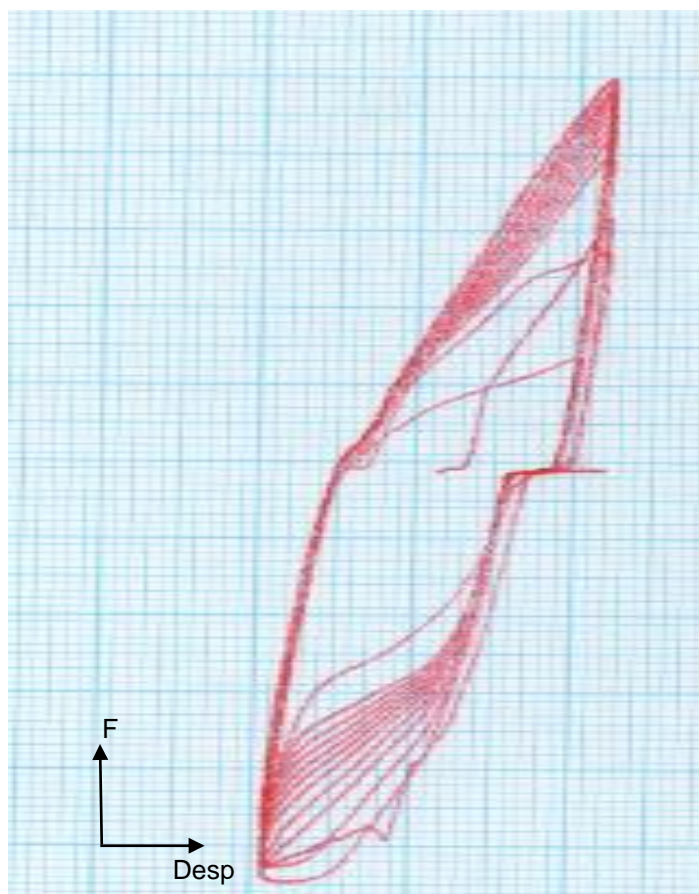


Figura 74: Gráfica del ciclo de histéresis, Tercer ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca BLANCO, diámetro 10 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,96 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 3325 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 3525 Kgf.

- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 13.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 29,1 °C.
- Temperatura ambiente: 25,1 °C.
- % de humedad en el ambiente: 48 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 13 found
Select objects:
-----      REGIONS      -----
Area:                9021.7444
Perimeter:           2411.3528
Bounding box:        X: 44.5482 -- 67.3983
                    Y: 93.7605 -- 198.4945
Centroid:            X: 55.9146
                    Y: 144.2808
Moments of inertia:  X: 191836289.3123
                    Y: 28485324.6361
Product of inertia:  XY: -73662344.6324
Radii of gyration:   X: 145.8210
                    Y: 56.1908
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 4227318.1289 along [0.9760 -0.2176]
                    J: 83078.3812 along [0.2176 0.9760]

```

Figura 75: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Tercer ensayo – Soldada, Marca BLANCO. ($\varnothing 10$ mm).

En la *Figura 75*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca BLANCO, tercer ensayo, de 10 mm de diámetro en condición Soldada, en los 13 ciclos soportados es de: **9021** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 9021 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm deslaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 19,1591 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$. A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 5^2 \cdot 20 = 1570,8 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{19,1592 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 11,9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.6.3 Varillas de 8 milímetros de diámetro.

A continuación se presenta un ensayo de los 7 realizados para este caso ya que el procedimiento es el mismo.

En los ensayos realizados para la Marca Blanco “Soldadas”, con varillas de acero corrugado de 8 mm de diámetro se obtuvieron los siguientes resultados:

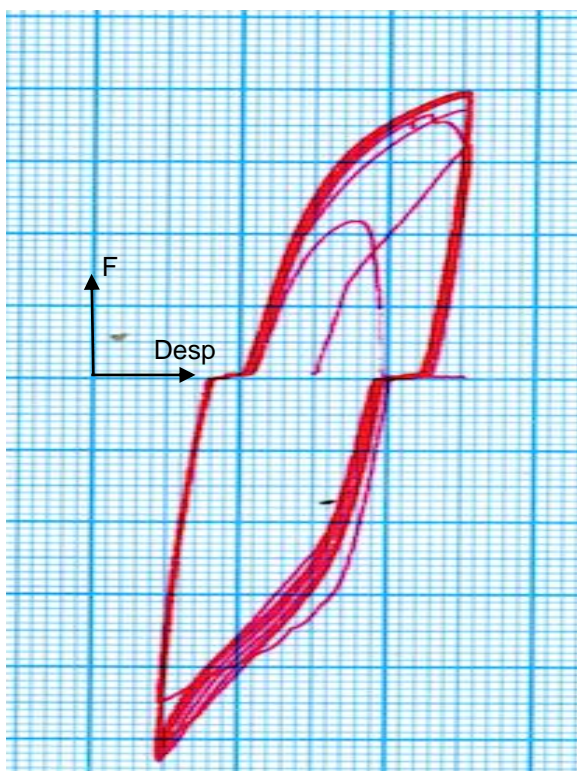


Figura 76: Gráfica del ciclo de histéresis, Sexto ensayo, varilla de acero corrugado – Soldada, marca BLANCO, diámetro 8 mm.

Parámetros y resultados del ensayo:

- Desplazamiento del pistón: 4,55 mm.
- Fuerza máxima aplicada en tracción: 2575 Kgf.
- Fuerza máxima aplicada en compresión: 3650 Kgf.
- Número de ciclos hasta agotar su capacidad a fatiga: 9.
- Temperatura máxima de la varilla en la zona afectada por la fatiga: 29,3 °C.

- Temperatura ambiente: 24,4 °C.
- % de humedad en el ambiente: 52 %.

Índice de Energía por unidad de volumen absorbida por la varilla:

El procedimiento de obtención del Índice de energía absorbida por la varilla es el mismo descrito en la sección 4.1.1. En el Segundo ensayo subsección: Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla.

```

Command:
Command: MASSPROP
Select objects: Specify opposite corner: 9 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                6195.1021
Perimeter:           1566.5119
Bounding box:        X: 38.6247 -- 60.0922
                    Y: 91.7238 -- 184.6487
Centroid:            X: 49.1442
                    Y: 141.8885
Moments of inertia:  X: 127361412.8969
                    Y: 15133615.1120
Product of inertia:  XY: -43743454.5672
Radii of gyration:   X: 143.3820
                    Y: 49.4250
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 2754554.9086 along [0.9785 -0.2065]
                    J: 56495.0156 along [0.2065 0.9785]

```

Figura 77: Datos obtenidos mediante el software de diseño para el cálculo del Índice de energía absorbida por la varilla, Sexto ensayo – Soldada, Marca BLANCO. (\varnothing 8 mm).

En la *Figura 77*. Se observa que el área bajo las distintas curvas de la varilla Marca BLANCO, sexto ensayo, de 8 mm de diámetro en condición Soldada, en los 9 ciclos soportados es de: **6195** ($Kgf \cdot mm$)

A continuación, se realiza el cálculo de cambio de escala del área generada por medio del software de diseño asistido por computador, para obtener el Índice de energía absorbida por la varilla:

$$IEA = 6195 \text{ Kgf} * \text{mm papel} * \frac{0,2167 \text{ mm desplaza pistón}}{1 \text{ mm papel}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$IEA = 13,1563 \text{ (J)}$$

El Índice de energía calculado es absorbido en el volumen de la varilla que se encuentra en la longitud libre entre mordazas, en este caso: $2 \cdot 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$
A continuación se obtiene el volumen en el que se absorbe el IEA calculado anteriormente.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 4^2 \cdot 16 = 804,25 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000^3 \text{ mm}^3} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Por tanto, el Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla es el siguiente:

$$IEA_{/V} = \frac{13,1563 \text{ J}}{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} = 16,4 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

4.7 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

Las gráficas que se obtuvieron en estos ensayos representan un ensayo de histéresis, en el cual se tienen fuerzas de tracción y flexo-compresión. Es por esto que en cada una de las gráficas podemos ver un desfase en el cambio de estos fenómenos, justo en la línea cero; esto es provocado por el pandeo que ocurre en la varilla, realizando flexo-compresión, más no compresión pura, ver Figura 96.

En la tracción existen numerosos picos de caída (Figura 96) mientras llega a su punto máximo en cada ciclo, estos picos se deben al resbalamiento que tuvo cada una de las varillas mientras se realizaban los primeros 5 ciclos, una vez pasado este número de ciclos los picos de caída desaparecen, ya que el autoajuste de las mordazas mejora considerablemente.

Los picos máximos en compresión y flexo-compresión, fueron alcanzados en los primeros 5 ciclos, desde el inicio de cada ensayo estos valores fueron aumentando hasta llegar al máximo, para luego ir decayendo hasta la rotura.

En el apartado 4.8 de este documento, se realizarán los análisis en gráficos de dispersión entre cada una de las marcas, para los distintos diámetros seleccionados; donde se podrán observar las comparaciones realizadas en los diferentes factores tomados en cuenta.

En las varillas soldadas de 8 mm de diámetro, al estar sometidas a soldadura sus propiedades mecánicas se ven afectadas de diferente manera entre cada una de las marcas, por lo que su resistencia a la fatiga continua igual e incluso mejora sus propiedades. El comportamiento para tracción y compresión se ve afectado entre cada marca, todos estos factores influyen en el número de ciclos que pueden soportar cada una de las varillas.

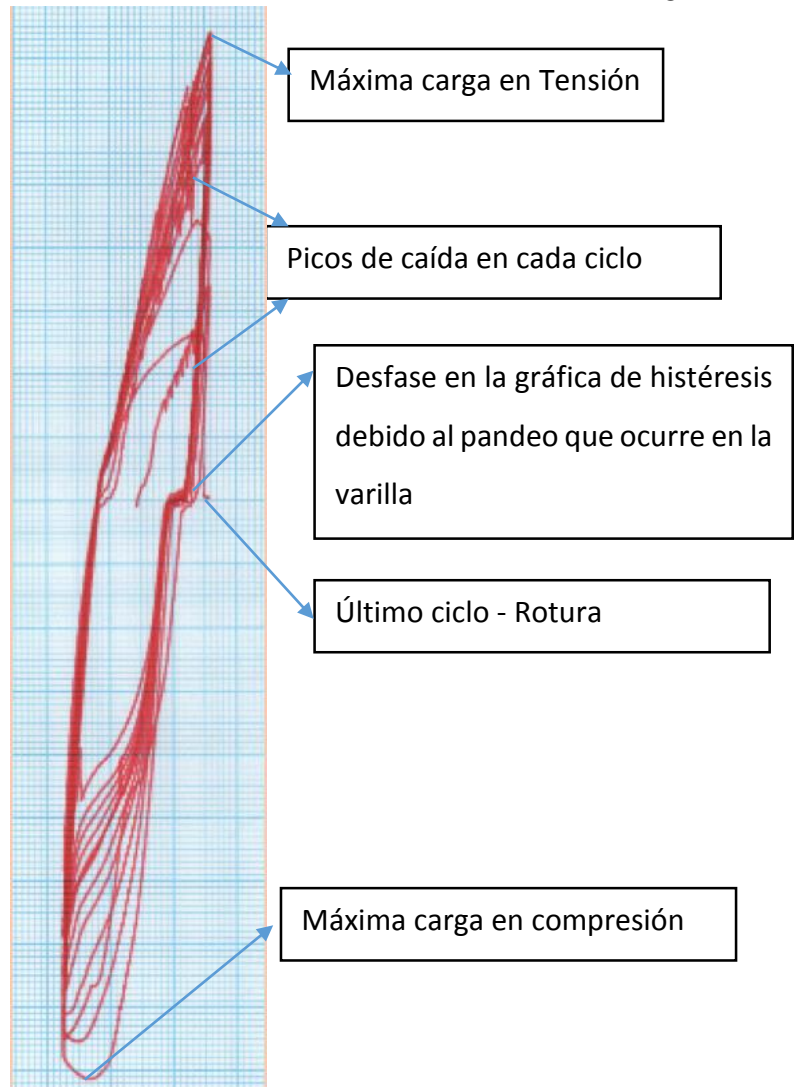


Figura 78: Análisis de los fenómenos ocurridos en una gráfica de histéresis.

4.8 TABLAS RESUMEN.

A continuación, se presenta las tablas resumen obtenidas en la experimentación realizada, se muestran también gráficas comparativas de las 3 marcas estudiadas.

4.8.1 Tablas Resumen de las varillas Estándar.

Tabla 15:

Datos Resumen de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Estándar.

ESTÁNDAR								
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo		Índice de Energía por unidad de volumen absorbida (MJ/m ³)
			Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)	
AMARILLAS	12	1	4700	6875	20	22.5	50	19.91
		2	4800	5400	24	22.9	50	18.60
		3	6750	5425	18	23.0	49	16.56
		4	6175	4775	34	23.2	49	26.76
		5	5675	6250	22	23.5	48	19.82
		6	6300	6175	19	23.7	50	16.20
		7	5200	6650	19	24.0	50	16.90
	10	1	3175	4225	23	24.3	42	21.65
		2	3800	4000	21	24.4	42	22.08
		3	3325	4875	25	24.5	39	25.16
		4	3675	4075	23	24.8	38	21.94
		5	3425	4175	24	25.2	36	21.40
		6	3950	4275	24	25.2	37	26.12
		7	3825	4300	21	25.3	36	20.31
	8	1	2600	2650	17	22.8	54	22.80
		2	2675	2675	22	23.1	53	28.60
		3	2675	3150	15	23.3	53	24.75
		4	2525	2575	18	23.6	53	18.85
		5	2675	2800	15	23.8	52	21.32
		6	2575	2700	19	23.9	51	25.05
		7	2425	2500	17	24.0	50	20.98

Tabla 16:

Datos Resumen de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Estándar.

ESTÁNDAR								
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo		Índice de Energía por unidad de volumen absorbida (MJ/m ³)
			Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)	
ROJAS	12	1	5450	6150	16	23.9	50	14.97
		2	5225	6200	16	24.2	47	14.18
		3	4375	5125	18	24.2	46	14.30
		4	4950	6300	18	24.5	46	12.65
		5	5000	5875	16	25.1	45	11.39
		6	4325	5450	26	25.1	45	17.67
		7	4950	6125	22	25.2	44	18.35
	10	1	3725	3850	29	25.4	36	27.86
		2	3500	4050	21	24.9	49	19.95
		3	3825	4225	29	23.3	53	27.03
		4	3475	4100	28	23.8	52	26.75
		5	3575	3750	28	24.0	52	26.41
		6	3550	4200	31	24.3	50	30.48
		7	3600	4325	36	24.9	49	32.95
	8	1	2625	2825	20	24.1	50	24.99
		2	2300	2300	13	24.3	50	17.26
		3	2400	2350	14	24.5	50	18.20
		4	2325	2275	14	24.6	49	17.79
		5	2225	2250	13	24.7	49	17.11
		6	2275	2500	15	23.2	52	18.31
		7	2600	2675	18	23.0	53	24.19

Tabla 17:

Datos Resumen de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Estándar.

ESTÁNDAR								
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo		Índice de Energía por unidad de volumen absorbida (MJ/m ³)
			Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)	
BLANCAS	12	1	4875	5925	18	22.1	50	14.91
		2	5075	6200	21	22.5	50	19.30
		3	4600	5750	21	22.9	50	14.87
		4	5375	6375	16	22.9	49	16.53
		5	4825	5600	21	22.1	50	18.57
		6	4825	6350	17	22.4	50	14.89
		7	5200	6650	10	23.1	49	10.66
	10	1	3575	3875	18	25.3	47	16.91
		2	3350	3700	13	25.4	45	12.28
		3	3300	3725	24	25.6	45	24.15
		4	3600	4275	15	25.8	43	14.88
		5	3525	4050	14	25.9	43	15.07
		6	3475	3850	14	26.1	43	13.64
		7	3500	3800	15	26.2	44	13.97
	8	1	2475	2375	14	23.0	53	17.08
		2	2475	2675	17	23.1	53	22.56
		3	2550	2675	11	23.4	53	16.49
		4	2450	2450	13	23.6	54	17.96
		5	2475	2475	15	23.7	53	19.60
		6	2450	2400	11	23.7	52	14.57
		7	2400	2375	14	23.7	52	18.58

4.8.2 Tablas Resumen de las varillas Soldadas.

Tabla 18:

Datos Resumen de los ensayos para la marca AMARILLO, varillas en condición Soldada.

SOLDADAS								
Marca	Diámetro (mm)	Número de Ensayos	Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo		Índice de Energía por unidad de volumen absorbida (MJ/m ³)
			Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)	
AMARILLAS	12	1	5025	5275	10	23.3	48	8.96
		2	4875	6025	12	23.5	48	10.91
		3	4825	6000	14	23.5	47	12.61
		4	4150	5075	26	23.7	46	17.02
		5	4725	5025	8	23.8	44	6.44
		6	4275	4950	27	24.0	43	16.19
		7	5400	5200	15	24.2	42	13.09
	10	1	3350	3850	22	26.3	44	17.27
		2	3625	3950	12	21.6	54	11.33
		3	3300	3800	11	22.0	55	10.88
		4	3475	3625	14	22.0	56	14.64
		5	3500	3475	21	22.2	56	17.57
		6	3200	3775	11	22.4	55	10.42
		7	3225	3475	21	22.8	55	17.83
	8	1	1450	2100	2	23.8	51	1.52
		2	1450	2150	2	23.8	51	1.77
		3	2450	2300	9	25.1	50	10.16
		4	2450	3300	6	25.2	50	8.38
		5	2575	3650	12	25.3	49	17.08
		6	2475	3000	12	21.5	57	15.69
		7	1325	2050	2	25.2	56	0.88

Tabla 19:

Datos Resumen de los ensayos para la marca ROJO, varillas en condición Soldada.

SOLDADAS								
Marca	Diámetro	Número de Ensayos	Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo		Índice de Energía por unidad de volumen absorbida (MJ/m ³)
			Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)	
ROJAS	12	1	4575	5575	24	24.3	42	18.87
		2	3925	4825	22	24.5	42	16.18
		3	4800	5100	23	24.8	41	16.46
		4	3725	4325	23	22.0	50	14.27
		5	5000	5550	14	23.2	48	11.89
		6	3625	5475	25	23.3	48	15.81
		7	5000	6250	12	23.7	48	11.10
	10	1	3675	4450	15	23.0	53	16.21
		2	3075	3050	27	23.2	53	20.78
		3	3075	3250	14	23.6	52	11.90
		4	3250	3725	27	23.8	51	23.04
		5	3225	3875	19	24.1	49	17.77
		6	3675	4425	19	24.4	49	20.15
		7	3400	4175	24	24.5	49	22.32
	8	1	2000	1775	2	23.8	52	1.70
		2	2175	2325	7	24.7	52	8.43
		3	2150	2175	4	24.8	52	4.51
		4	2075	2225	2	24.8	52	1.86
		5	1925	1875	6	24.8	51	7.62
		6	1900	1825	6	24.9	51	6.06
		7	2300	2300	13	25.0	50	14.99

Tabla 20:

Datos Resumen de los ensayos para la marca BLANCO, varillas en condición Soldada.

SOLDADAS								
Marca	Diámetro	Número de Ensayos	Carga (kgf)		Ciclos	Condiciones de Trabajo		Índice de Energía por unidad de volumen absorbida (MJ/m3)
			Máxima en Tracción	Máxima en Compresión		Temperatura (°C)	Humedad (%)	
BLANCAS	12	1	5000	7000	19	23.8	47	17.34
		2	5025	6275	20	24.1	46	15.65
		3	5625	6750	25	24.2	46	25.48
		4	4675	6750	20	24.5	45	15.21
		5	4975	7450	20	24.7	46	16.96
		6	5225	7525	15	25.1	47	12.81
		7	6475	7675	17	23.7	44	30.78
	10	1	3050	3075	12	24.9	49	9.32
		2	3300	3575	14	25.0	48	12.28
		3	3325	3525	13	25.1	48	11.97
		4	3225	3525	17	25.2	47	15.13
		5	3425	3450	9	22.4	54	8.27
		6	3225	4150	15	22.8	55	11.41
		7	3300	4425	9	22.6	55	8.00
	8	1	2500	3675	12	23.8	52	18.96
		2	2450	3325	12	24.0	51	16.95
		3	2425	2775	11	24.1	52	15.28
		4	2275	3675	3	24.2	52	4.58
		5	2575	3275	7	24.2	52	12.11
		6	2575	3650	9	24.4	52	16.45
		7	2525	3350	15	24.5	52	24.05

4.8.3 Gráficas para los diámetros de 12mm de las tres marcas Estándar.

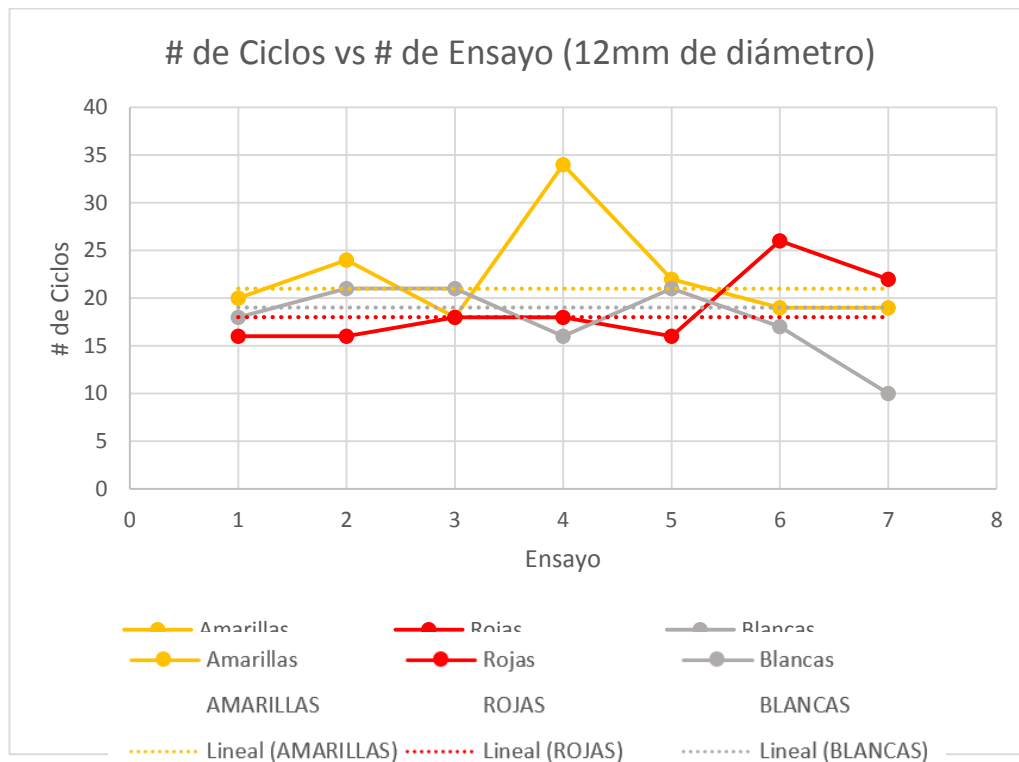


Figura 79: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo.

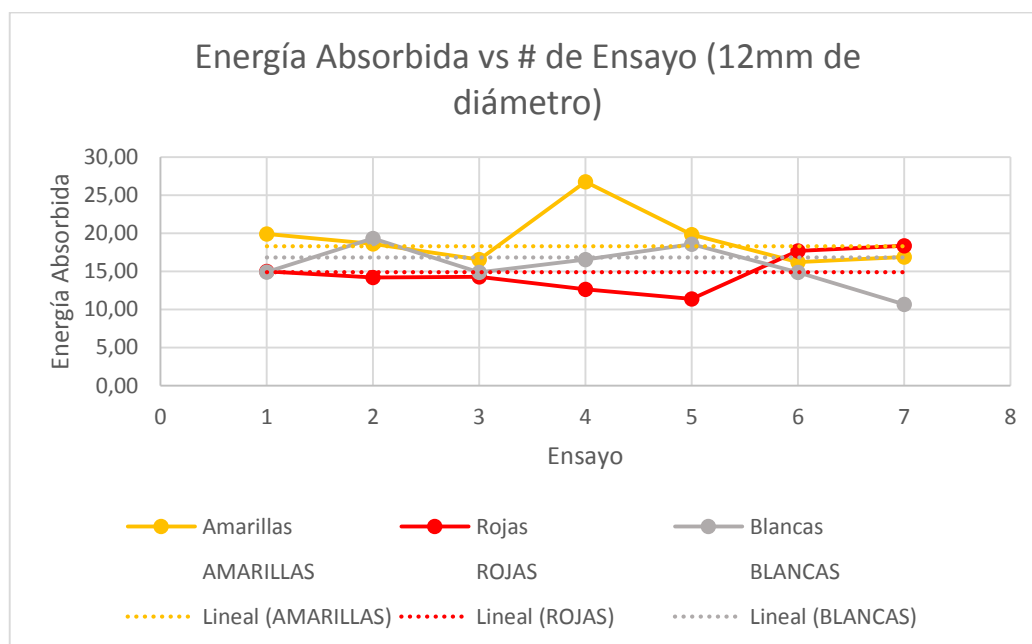


Figura 80: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo.

4.8.4 Gráficas para los diámetros de 10mm de las tres marcas Estándar.

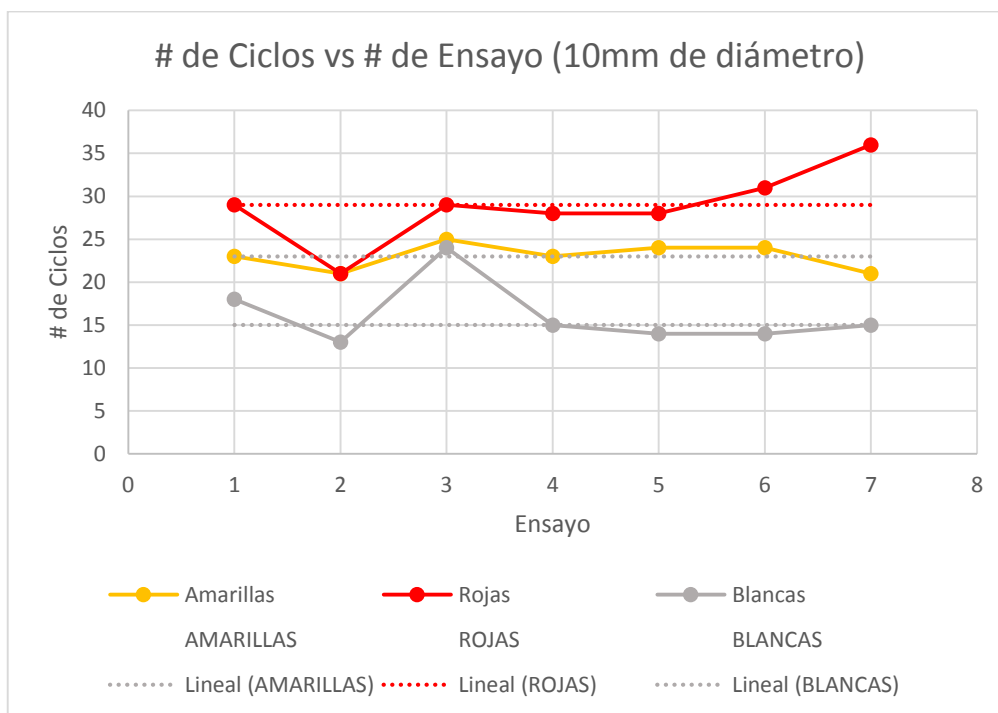


Figura 81: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo.

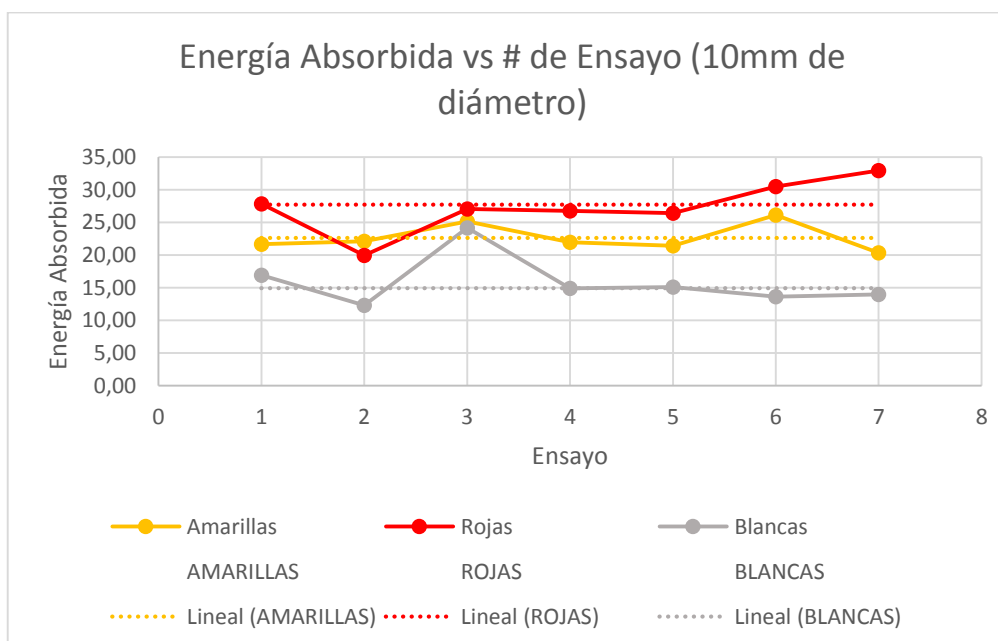


Figura 82: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo.

4.8.5 Gráficas para los diámetros de 8mm de las tres marcas Estándar.

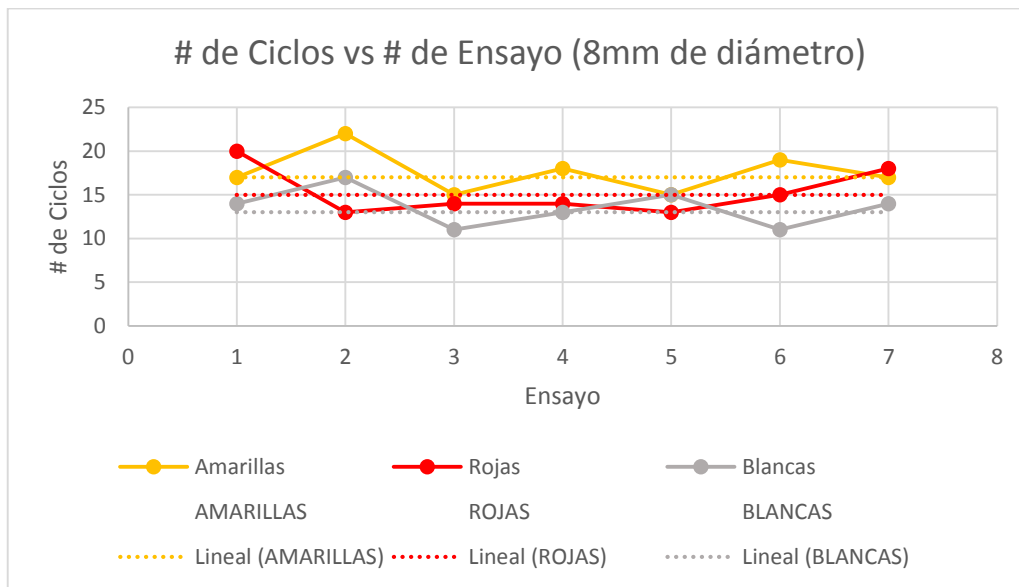


Figura 83: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo.

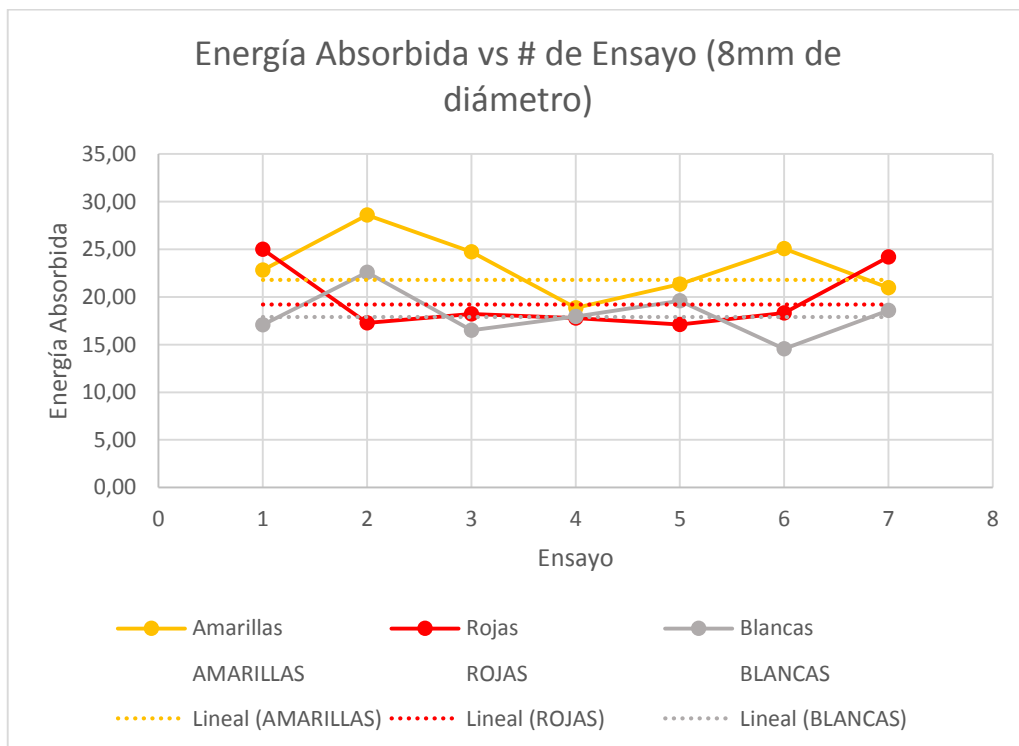


Figura 84: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo.

4.8.6 Gráficas para los diámetros de 12mm de las tres marcas Soldadas.

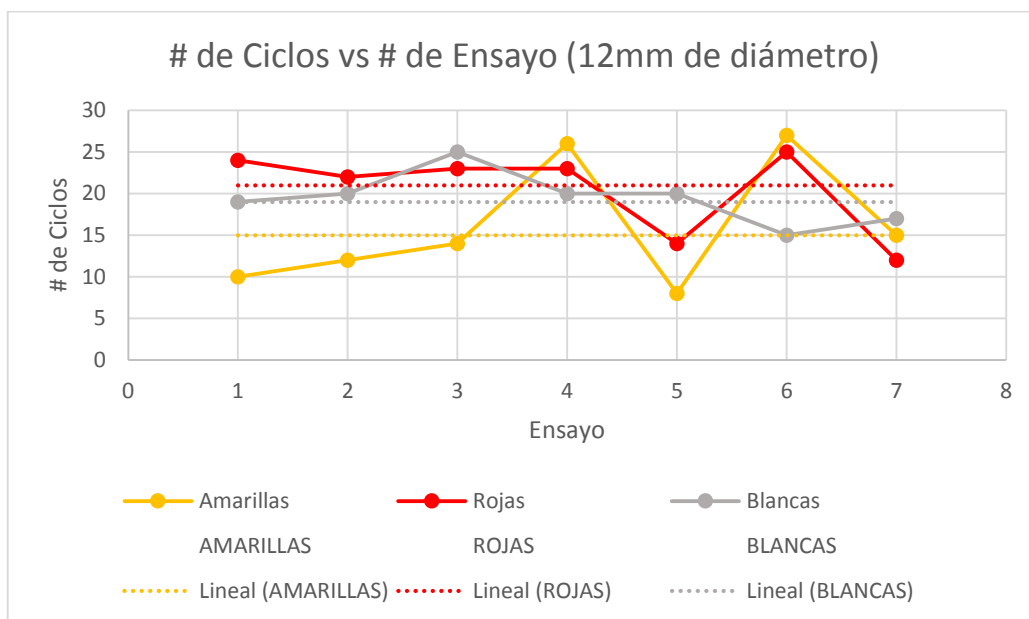


Figura 85: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo.

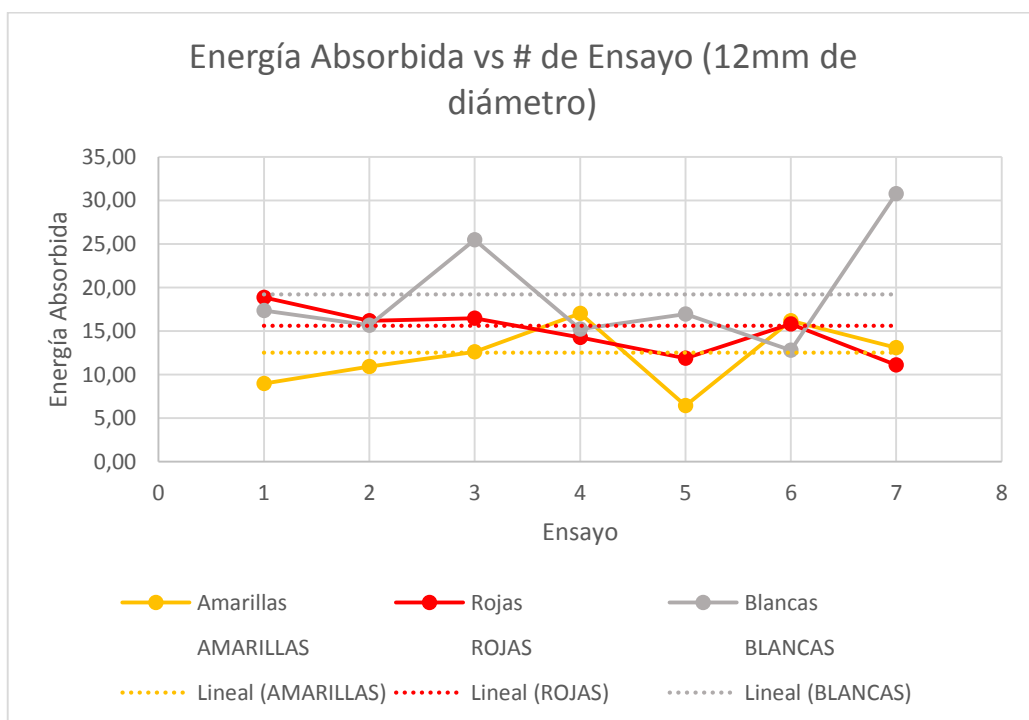


Figura 86: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo.

4.8.7 Gráficas para los diámetros de 10mm de las tres marcas Soldadas.

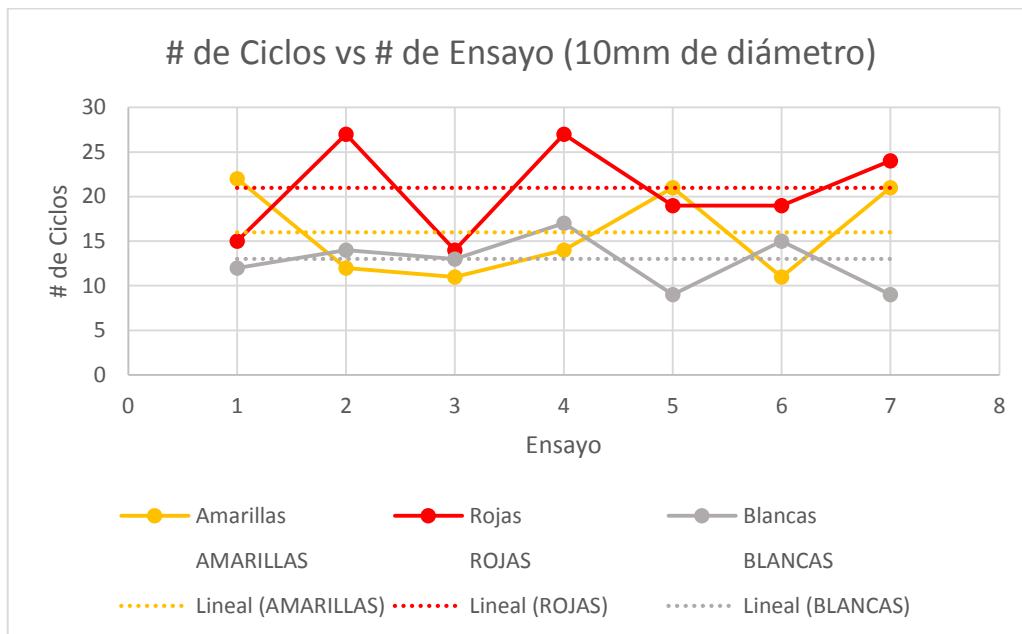


Figura 87: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo.

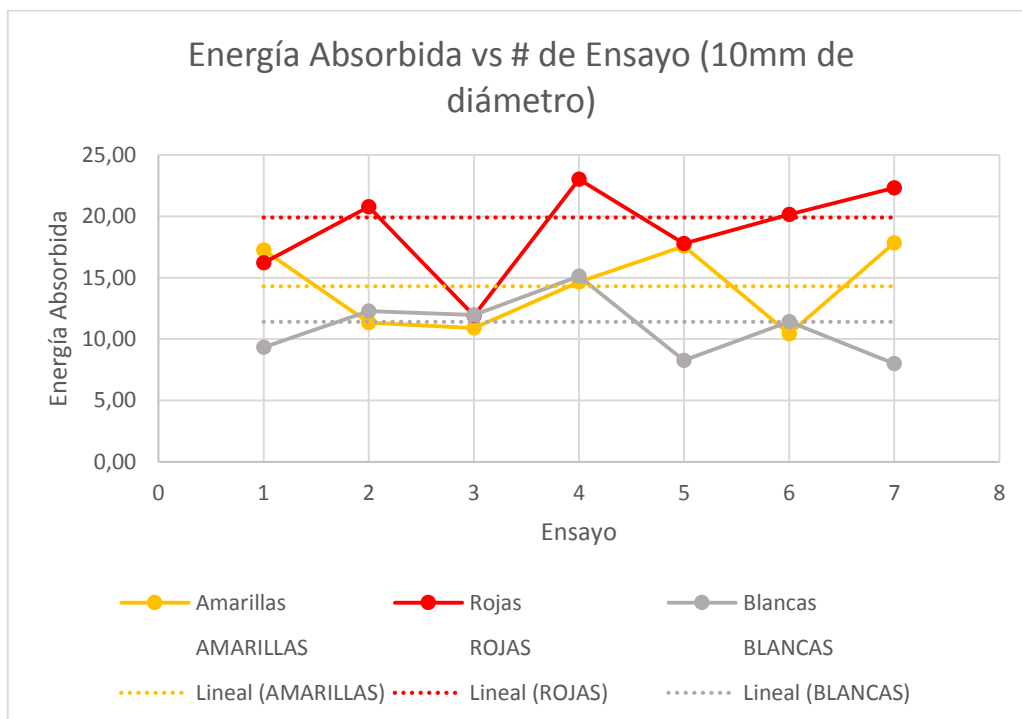


Figura 88 Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo.

4.8.8 Gráficas para los diámetros de 8mm de las tres marcas Soldadas.

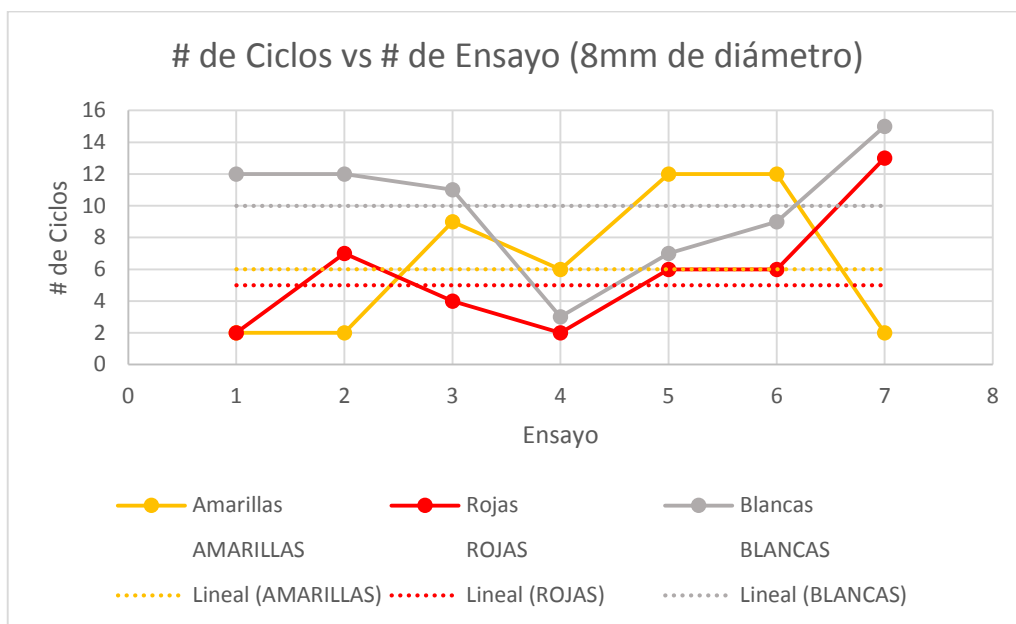


Figura 89: Gráfica comparativa del número de ciclos vs el número de ensayo.

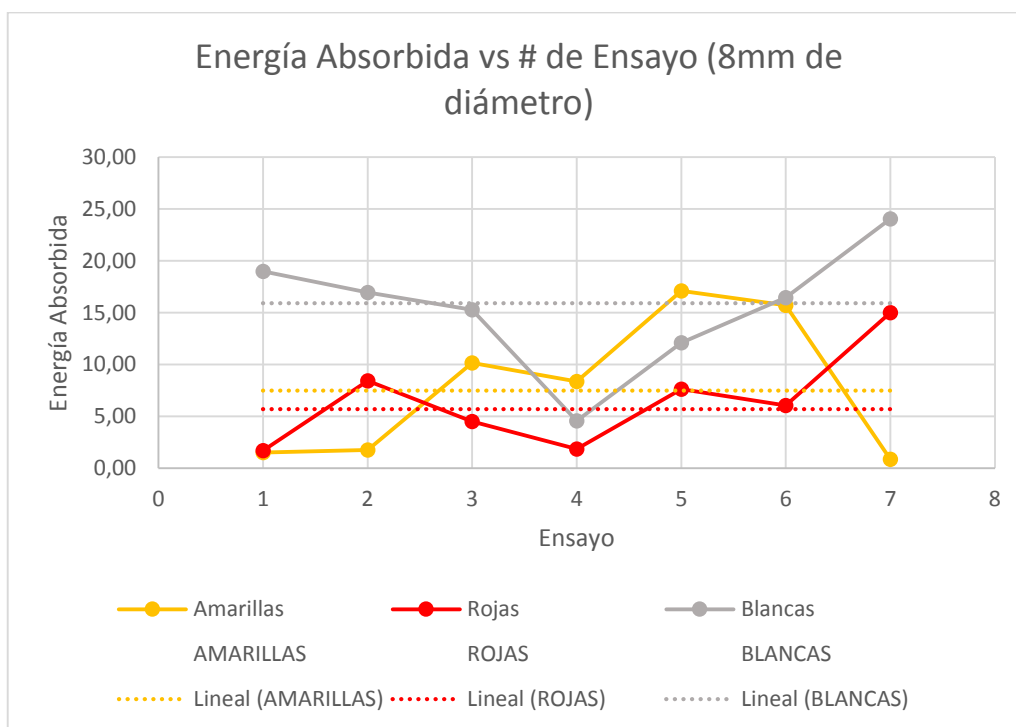


Figura 90: Gráfica comparativa del Índice de Energía por unidad de volumen absorbida vs el número de ensayo.

4.9 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la Tabla 21, que sintetiza los resultados obtenidos, mostrando los promedios de fuerzas máximas y números de ciclos soportados por cada diámetro y marca ensayada.

Tabla 21:

Resumen de Resultados obtenidos en el Estudio de Fatiga de bajos ciclos.

Marca	Diámetro (mm)	Tipo de ensayo	Fuerza máxima-promedio (Kgf)		Número de ciclos soportados-promedio
			Tracción	Compresión	
AMARILLO	12	Estándar	5455	6150	21
	10		3610	4210	23
	8		2560	2645	17
	12	Soldada	4855	5515	15
	10		2405	3660	16
	8		2055	2570	6
ROJO	12	Estándar	4990	5980	18
	10		3630	4025	29
	8		2380	2420	15
	12	Soldada	4405	5075	21
	10		3445	4130	21
	8		2045	2085	5
BLANCO	12	Estándar	4995	6090	19
	10		3535	3970	15
	8		2470	2470	13
	12	Soldada	5230	7030	19
	10		3265	3555	13
	8		2505	3340	10

Es importante recalcar que los ensayos realizados se los llevo a cabo a fatiga de bajos ciclos mas no en presencia de esfuerzo medio igual a cero, lo cual se evidencia en la Tabla 21 ya que los promedios de Tracción no son iguales a los promedios de Compresión en cada ensayo realizado. Teniendo siempre un valor mayor en la compresión debido a que la máquina aplicaba mayor fuerza en esta etapa del ensayo. No fue posible ensayar las 126 probetas con esfuerzo medio igual a cero debido a que la máquina universal de ensayos MTS fue programada con control de desplazamiento (según recomienda la norma ATC 40 para ensayos a fatiga) para llevar a cabo los ensayos, y al realizar la calibración de esta manera no se aplica la misma fuerza en compresión y tracción debido a la

variación de señal y al agotamiento progresivo de la capacidad de carga de la varilla que está siendo ensayada. Por lo tanto las fuerzas de tracción y compresión no son las mismas, con lo cual no se obtuvo el esfuerzo medio igual a cero.

En la *Figura 91*, se presenta una comparación entre las tres marcas, del promedio de número de ciclos soportados a fatiga mediante un diagrama de barras.

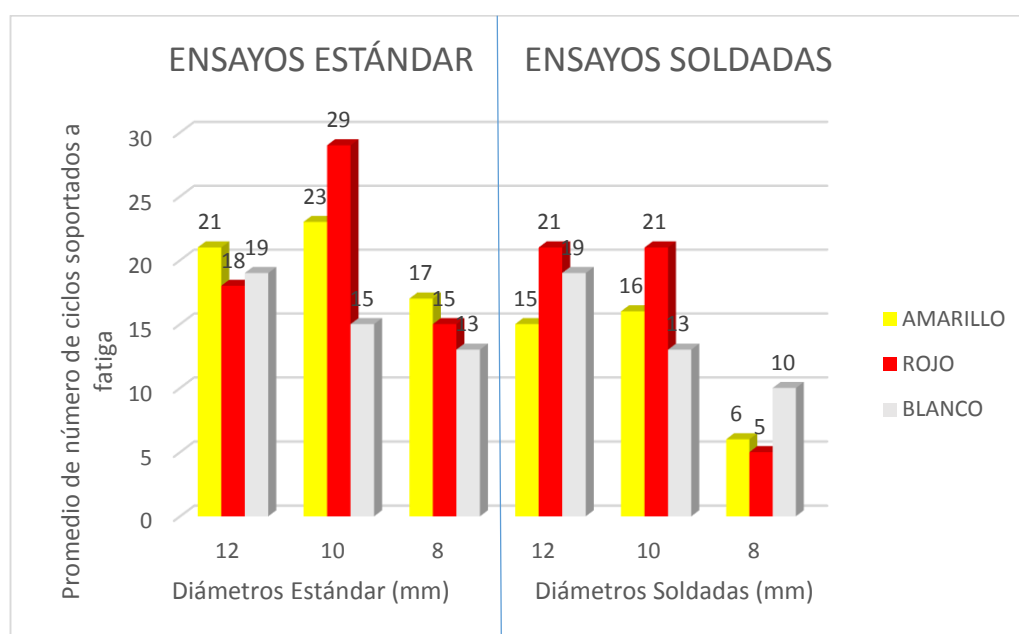


Figura 91: Diagrama de Barras comparativo entre marcas y diámetros ensayados. Número de ciclos soportados a fatiga.

Según los datos obtenidos de la experimentación, se tiene lo siguiente:

En las varillas de 12 mm de diámetro en condición Estándar, la marca ROJO muestra un comportamiento inferior a las otras marcas estudiadas ya que soporta menor número de ciclos. Teniendo así, un comportamiento superior las marcas BLANCO y AMARILLO en 4,8% y 14,3% respectivamente.

En las varillas de 10 mm de diámetro en condición Estándar, la marca BLANCO muestra un comportamiento inferior a las otras marcas estudiadas ya

que soporta menor número de ciclos. Teniendo así, un comportamiento superior las marcas AMARILLO y ROJO en 27,6% y 48,3% respectivamente.

En las varillas de 8 mm de diámetro en condición Estándar, la marca BLANCO muestra un comportamiento inferior a las otras marcas estudiadas ya que soporta menor número de ciclos. Teniendo así, un comportamiento superior las marcas ROJO y AMARILLO en 11,7% y 23,5% respectivamente.

En las varillas de 12 mm de diámetro en condición Soldada, la marca AMARILLO muestra un comportamiento inferior a las otras marcas estudiadas ya que soporta menor número de ciclos. Teniendo así, un comportamiento superior las marcas BLANCO y ROJO en 19% y 28,6% respectivamente.

En las varillas de 10 mm de diámetro en condición Soldada, la marca BLANCO muestra un comportamiento inferior a las otras marcas estudiadas ya que soporta menor número de ciclos. Teniendo así, un comportamiento superior las marcas AMARILLO y ROJO en 14,3% y 38,1% respectivamente.

En las varillas de 8 mm de diámetro en condición Soldada, la marca ROJO muestra un comportamiento inferior a las otras marcas estudiadas ya que soporta menor número de ciclos. Teniendo así, un comportamiento superior las marcas AMARILLO y BLANCO en 10% y 50% respectivamente.

La marca AMARILLO en condición Estándar en los 3 diámetros estudiados tiene un mejor comportamiento que en condición Soldada. Esto se debe a que las probetas al ser soldadas incrementan su longitud y por tanto, la longitud libre entre mordazas aumenta, generándose pandeo por lo que el fenómeno de flexo compresión también se incrementa. Su capacidad de carga se reduce en 28,6% en $\varnothing 12$ mm, 30,4% en $\varnothing 10$ mm y 64,7% en $\varnothing 8$ mm.

En la marca ROJO se observa que en el diámetro de 12 mm, las varillas soldadas tienen un mejor comportamiento a la fatiga que las estándar, siendo superiores en 14,3%, debido a que estas varillas al ser soldadas incrementaron

su diámetro en un 20% (sección soldada) en el área de la longitud libre entre mordazas, con lo cual incrementa su capacidad de carga al momento de soportar el fenómeno de flexo compresión. Lo contrario ocurre en los diámetros de 10 y 8 milímetros, ya que las varillas estándar presentan mayor resistencia a la fatiga que las soldadas en 27,6% en $\varnothing 10$ mm y 66,6% en $\varnothing 8$ mm.

En la marca BLANCO se observa que la presencia de soldadura no afecta significativamente la composición metalográfica y la capacidad de carga en la varilla de acero corrugado, ya que se obtienen promedios de ciclos soportados similares tanto en estándar como en soldadas, en los 3 diámetros estudiados. La longitud de estas varillas no aumentó el momento de ser soldadas por lo cual no incrementa la distancia libre entre mordazas, cabe destacar que el diámetro de la sección soldada se incrementó, con lo cual el fenómeno de flexo compresión disminuye; por tanto estas probetas logran soportar mayor número de ciclos alcanzando así valores cercanos a los obtenidos en ciclos de varillas estándar.

En las Figuras 92 y 93, se presentan diagramas de barras comparativos del Promedio de Fuerza máxima en Tracción y Compresión, respectivamente, para las tres marcas estudiadas en los diámetros analizados.

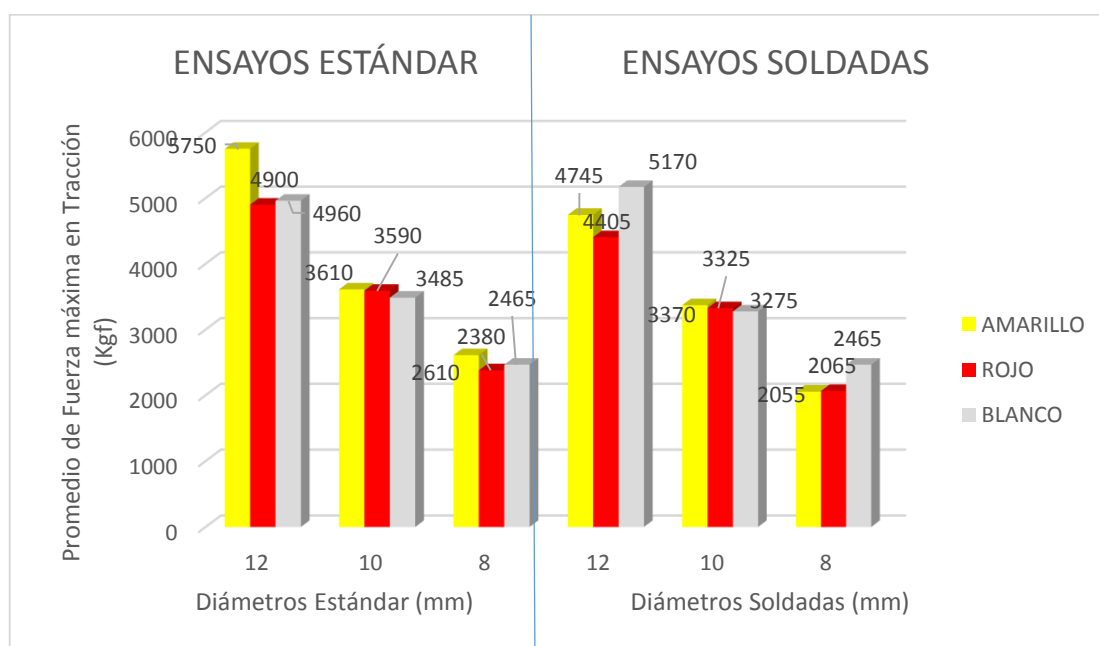


Figura 92: Diagrama de Barras comparativo entre marcas y diámetros ensayados. Promedio de Fuerza máxima en Tracción.

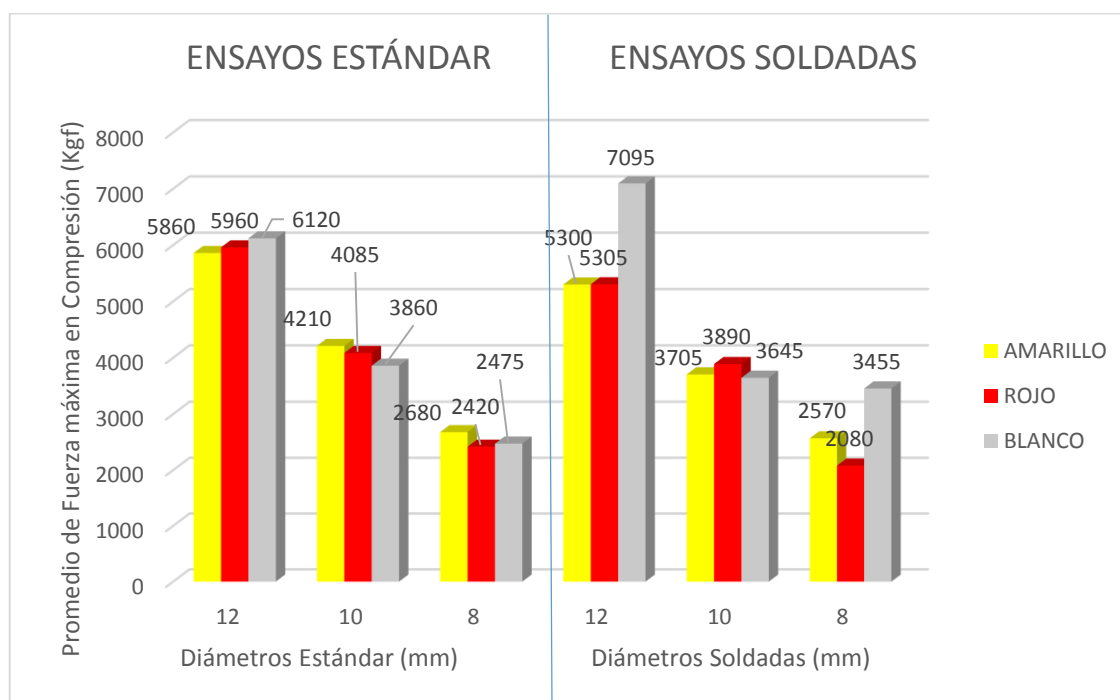


Figura 93: Diagrama de Barras comparativo entre marcas y diámetros ensayados. Promedio de Fuerza máxima en Compresión.

Promedios de Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por las varillas.

Para el cálculo del Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla, se tomó un volumen de referencia (volumen existente en la separación entre mordazas para cada tipo de ensayo) excluyendo los resaltes (crestas o estrías) con las que cuentan cada varilla de acero corrugado estudiada.

A continuación, se presenta la Tabla 22, la cual muestra un resumen del Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla:

Tabla 22:

Promedios de Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por las varillas.

Marca	Diámetro (mm)	Tipo de ensayo	Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por la varilla - promedio (MJ/m ³)
AMARILLO	12	Estándar	18,3
	10		22,6
	8		21,8
	12	Soldada	12,5
	10		14,3
	8		7,5
ROJO	12	Estándar	14,9
	10		27,7
	8		19,2
	12	Soldada	15,6
	10		19,9
	8		5,7
BLANCO	12	Estándar	16,8
	10		14,9
	8		17,9
	12	Soldada	19,2
	10		11,4
	8		15,9

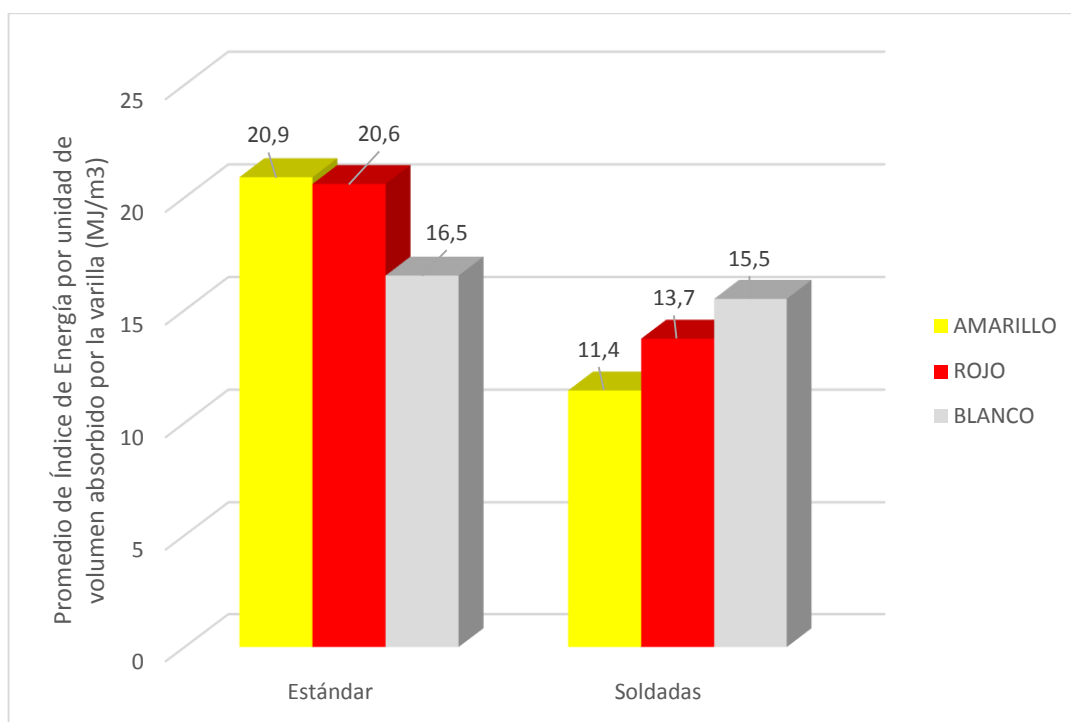


Figura 94: Diagrama de Barras comparativo de marcas ensayadas. Promedio de Índice de Energía por unidad de volumen absorbido por las varillas.

Según la experimentación, como se muestra en la *Figura 95*, las marcas ROJO y BLANCO en condición Estándar, absorben menos energía que la marca AMARILLO, en 1,4% y 21,1% respectivamente.

En tanto que en las varillas Soldadas, las marcas ROJO y AMARILLO absorben menos energía que la marca BLANCO, en 11,6% y 26,5% respectivamente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. No se logró obtener el fenómeno de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio cero el cual implica la existencia de compresión pura, ya que en las mordazas utilizadas para realizar los ensayos se generó pandeó al momento de la compresión, con lo cual se produjo flexo compresión, teniendo así fatiga de bajos ciclos, más no con esfuerzo medio cero debido a la existencia de mayor carga en compresión que en tracción. Por tanto se concluye que la obtención del fenómeno de fatiga de bajos ciclos con esfuerzo medio cero es muy complicado y para lograrlo se debe rediseñar el sistema de mordazas.
2. Una vez realizado el análisis estadístico se determinó 7 ensayos a efectuar, teniendo así un subtotal de 42 para cada marca y un total de 126 ensayos realizados en el presente proyecto. Seleccionando los distribuidores comerciales en donde se adquirió las varillas para la obtención de probetas.
3. Se determinó experimentalmente el comportamiento de las marcas de varillas seleccionadas en presencia de fatiga de bajos ciclos, obteniendo como resultado un promedio del número de ciclos que soportaron. Para un mismo desplazamiento en los ensayos realizados en condición Estándar la marca BLANCO soportó un promedio de 15,7 ciclos, en tanto que las marcas AMARILLO y ROJO, tuvieron un mejor comportamiento con 20,3 y 20,7 ciclos soportados respectivamente. Para los ensayos de varillas soldadas, la marca AMARILLO soportó 12,3 ciclos teniendo así un comportamiento inferior a las marcas BLANCO y ROJO con 14 y 15,7 ciclos soportados respectivamente. Por tanto podemos decir que la varilla

marca ROJO soporta mayor cantidad de ciclos en condiciones estándar y soldadas.

4. Se calculó el coeficiente de variación (%) enfocado al número de ciclos soportados por las varillas estudiadas, empleando la herramienta informática Excel Office. El cual permitió observar la variación existente en relación a la media. Para las varillas en condición Estándar se observó que la marca ROJO presenta un coeficiente de variación de 32,7 %, siendo más confiables las marcas BLANCO y AMARILLO ya que presentaron un coeficiente de variación menor; 23,3 % y 20,2 % respectivamente. En tanto que en condiciones Soldadas, la marca AMARILLO presentó un coeficiente de variación de 56,7 %, siendo así, las marcas ROJO y BLANCO más confiables ya que sus coeficientes de variación fueron menores; 54,5 % y 37,2 % respectivamente. Por tanto la varilla marca AMARILLO es más confiable en condiciones estándar ya que presentó menor porcentaje de variación en los resultados obtenidos posterior a los ensayos. Y en condiciones soldadas la marca BLANCO es la más confiable debido a su menor variación presentada.

5. Se obtuvo un Índice comparativo de Energía por unidad de volumen absorbida para cada una de las varillas de acero corrugado ensayadas, para las varillas en condiciones Estándar la marca BLANCO absorbió 16,5 MJ/m³ siendo superiores las marcas ROJO y AMARILLO ya que absorbieron mayor energía: 20,6 MJ/m³ y 20,9 MJ/m³ respectivamente. En tanto que en condiciones soldadas la marca AMARILLO absorbió menos energía (11,4 MJ/m³) que las marcas ROJO y BLANCO (13,7 MJ/m³ y 15,5 MJ/m³ respectivamente). Por tanto en condiciones estándar la marca AMARILLO tuvo mayor capacidad de absorber energía y en condiciones soldadas la marca BLANCO presentó mejores condiciones de absorción de energía.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Rediseñar o reforzar la carcasa utilizada para los ensayos realizados con guías lo suficientemente rígidas, logrará evitar la desviación ocurrida en los ejes de las carcasas que provocan la flexo-compresión y a su vez el pandeo de la varilla ensayada. Con carcasas que tengan un ajuste hidráulico el control sobre el ensayo de compresión será más eficiente que el sistema manual utilizado, y se evitarán los desfases ocurridos en las gráficas de histeréticas.
2. Rediseñar las muelas de la mordaza utilizadas con un estriado aún más eficiente, puede ayudar a una sujeción mayor en las varillas y evitar picos de caída. De esta manera se logrará sujetar las varillas evitando que estas puedan resbalarse tanto en la tracción y compresión, con esto se podrá reducir las caídas o picos de fuerzas en la tracción que se observan en cada uno de los gráficos histeréticos de las varillas ensayadas.
3. Experimentar mediante el control de fuerza y no sobre el control de desplazamiento, logrará que los ensayos tengan como resultado una gráfica de histéresis con esfuerzo medio cero, ya que será posible enviar la misma señal de carga para tensión y compresión.

BIBLIOGRAFÍA

- CELSA. (2010). Ductilidad Celsa. España.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de Materiales* (Octava ed.). México: Pearson Educación. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, I. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) INEN 2167*. Obtenido de Página oficial Instituto Ecuatoriano de Normalización: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2167.2011.pdf>
- Lacaze, C. (2009). *ESTUDIO Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DEL PANDEO EN LA FATIGA DE BAJOS CICLOS EN BARRAS LONGITUDINALES PARA HORMIGÓN ARMADO*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile. Recuperado el 03 de Noviembre de 2015, de ESTUDIO Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DEL PANDEO EN LA FATIGA DE BAJOS CICLOS EN BARRAS LONGITUDINALES PARA HORMIGÓN ARMADO:
http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103483/lacaze_c.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Lalanne, C. (2002). *Mechanical Vibration and Shock Fatigue Damage* (Vol. IV). London: HERMES PENTON SCIENCE.
- Navarro González, D., López López, A., & Rosado Tamariz, E. (s.f.). *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Recuperado el 04 de Noviembre de 2015, de Análisis de Estructuras de concreto reforzado considerando fatiga de bajos ciclos:
http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_18/te_01/ar_05.pdf
- NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN. (2014). *Hormigón Armado*. Quito.
- Porras Navarro González, D., López López, A., & Rozado Tamariz, E. (s.f.). *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Recuperado el 17 de Julio de 2015, de Análisis de Estructuras de Concreto Reforzado considerando fatiga de bajos ciclos:
http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_18/te_01/ar_05.pdf

Saquina, D. (2015). *CARACTERIZACIÓN Y COMPROBACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y QUÍMICAS DE LA VARILLAS DE ACERO CORRUGADAS AL SER EMPALMADAS MEDIANTE SOLDADURA PARA LOS DIÁMETROS 20,25 y 32 mm.*

Schijve, J. (2004). *Fatigue of Structures and Materials*. Delft: Kluwer Academic Publishers.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. (s.f.). *Sismos en México*. Obtenido de Sismos: <http://www.smis.org.mx/htm/sm5.htm>

SUPERINTENDENCIAS DE COMPAÑÍAS. (2012). *Ranking de Compañías 2012*. Quito.

Susmel, L. (2009). *Multiaxial notch fatigue*. Oxford: Woodhead Publishing Limited.

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. (2013). Obtenido de QUIENES SOMOS: <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=75>

Universidad de Valladolid. (2011). *Universidad de Valladolid plataforma virtual*. Obtenido de Alojamiento: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/.../Documento11.pdf