



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CABLES TRENZADOS Y EN
PARALELO DE ALAMBRES DE CuAlBe, PARA APLICACIONES EN
INGENIERÍA SÍSMICA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

CRISTIAN EMANUEL CRUZ DOGGENWEILER

**PROFESOR GUIA:
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
RICARDO HERRERA MARDONES
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2010**

RESUMEN DE LA TESIS
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL Y GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA
POR : Cristián Emanuel Cruz Doggenweiler
FECHA : 28 de Abril de 2010
PROF. GUÍA : Sra. María O. Moroni

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CABLES TRENZADOS Y EN PARALELO DE ALAMBRES DE CuAlBe, PARA APLICACIONES EN INGENIERÍA SÍSMICA

En esta investigación se estudia el comportamiento de cables fabricados con alambres de una aleación de cobre en forma experimental y analítica. La aleación utilizada, Cu-11.8%p.Al-0.5%p.Be, ha sido estudiada en numerosos trabajos anteriores y, en forma de alambres, exhibe un comportamiento superelástico.

En la etapa experimental, se fabricaron cuatro probetas de cables con alambres de 0.5 mm de diámetro recocidos a 700°C por 20 seg. El tamaño de grano nominal es 60 μm . Dos de ellas estaban conformadas por alambres trenzados y las dos restantes, por alambres dispuestos en paralelo. La configuración escogida para los cables trenzados fue de un único torón formado por un núcleo central de un solo alambre sobre el cual se trenzaron dos capas. La primera consistió en 6 alambres enrollados helicoidalmente con un paso de 20 mm en arreglo derecho. Sobre ésta se trenzó una segunda capa de 12 alambres con un paso de 20 mm en arreglo izquierdo.

Los cables fueron ensayados cíclicamente en tracción, siguiendo dos rutinas de ensayo. En la primera, se cicló a una amplitud constante (2%). La segunda consistió en ciclos a amplitud variable y creciente entre el 0.5% y el 8%. Se determinó la rigidez, esfuerzo de transformación, rigidez secante, tensiones máximas y factor de amortiguamiento equivalente para cada probeta en cada ensayo realizado. Para el caso de alambres en paralelo, se obtuvo que los valores calculados concuerdan con las propiedades calculadas en alambres singulares. Para las probetas de cables trenzados, los valores de los parámetros citados disminuyen, salvo el factor de amortiguamiento equivalente, donde la variación no es significativa para ciclos dentro del rango superelástico.

El amortiguamiento para ciclos a un 2.2% de deformación es cercano al 2%, y para ciclos al 5% de deformación llega al 4.0% y 4.7% para cables trenzados y alambres en paralelo, respectivamente. El amortiguamiento aumenta con la deformación máxima impuesta en la probeta. Para varios ciclos de carga a un mismo nivel de deformación, el factor de amortiguamiento equivalente disminuye con el número de ciclos. Si la deformación de la probeta está dentro del rango superelástico, el valor del amortiguamiento tiende a estabilizarse y converger.

El límite superelástico, determinado a través del análisis de las deformaciones remanentes y del decaimiento en la rigidez en función de la amplitud de cada ciclo, llega al 3%.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente, se extendió un modelo numérico, que predice el comportamiento de cables sometidos a cargas axisimétricas. La simulación utiliza un modelo de ley constitutiva multilínea. Los resultados analíticos estiman en forma precisa (error del 1%) la disminución en el módulo de elasticidad debido al ángulo de la hélice del cable, respecto de la disminución en dicho parámetro observada experimentalmente; predicen tensión máxima en el cable con un error inferior al 10% y son consistentes con las deformaciones remanentes en la probeta. Sin embargo, el amortiguamiento predicho es inferior al obtenido experimentalmente, debido a que la ley constitutiva considera un tramo perfectamente elástico.

Dedicado al Tatin y a la Irene

Agradecimientos

Ésta investigación no hubiese sido posible sin la ayuda de Javier Barona, Catalina Cattaneo, Oriel Feliú, Bernardo Orostica, Juan Carlos Salgado y Carlos Yáñez; quienes colaboraron enérgicamente en el proceso de fabricación de las probetas, tratamientos térmicos y metalografías.

Se agradece encarecidamente al profesor Reginald DesRoches y a la Escuela de Ingeniería Civil y Medioambiental del Georgia Institute of Technology por permitir realizar los ensayos en su casa de estudios. Además, quisiera destacar la fundamental ayuda de Matthew Spiecher en el desarrollo de los experimentos y agradecer a César Pastén, Kartik Ramanathan y Tim Wright por la acogida durante mi estadía en Atlanta.

La estadía en Georgia Tech fue posible gracias al financiamiento otorgado por el Departamento de Postgrado y Postítulo de la Vicerrectoría de Asuntos Académicos de la Universidad de Chile, en el marco de su programa de becas de estadías cortas de investigación. Se agradece también a CONICYT por la importante ayuda económica entregada a través del proyecto FONDECYT N° 1070370.

Se agradece además la importante ayuda de mi profesora guía, María Ofelia Moroni, y de los profesores Juan Felipe Beltrán, Ricardo Herrera y Aquiles Sepúlveda, quienes siempre tuvieron una buena disposición para colaborar con este trabajo.

Finalmente, quisiera dar las gracias por el apoyo incondicional de mi familia y amigos en el largo camino que he recorrido para llegar hasta esto.

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	6
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.3. CONTENIDOS DE LA TESIS.....	6
CAPÍTULO 2: ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA.....	8
2.1. INTRODUCCIÓN A LAS ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA.....	8
2.2. TRANSFORMACIONES DE FASE Y LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA.....	8
2.3. EFECTO DE MEMORIA DE FORMA Y EFECTO DE SUPERELASTICIDAD.....	10
2.4. LEY CONSTITUTIVA DE LAS SMA.....	11
2.5. CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN EMPLEADA.....	12
CAPÍTULO 3: MODELO DE CABLES DE SMA.....	13
3.1. INTRODUCCIÓN.....	13
3.2. DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN CABLE.....	13
3.2.1. <i>Organización de los Elementos</i>	14
3.3. MODELO GEOMÉTRICO DE UN CABLE.....	15
3.3.1. <i>Parametrización Matemática de una Hélice Circular</i>	15
3.3.2. <i>Sistema de Coordenadas Locales</i>	17
3.3.3. <i>Curvatura y Torsión</i>	19
3.4. RELACIONES DE DEFORMACIÓN.....	21
3.4.1. <i>Hipótesis Generales</i>	21
3.4.2. <i>Deformación Global del Cable</i>	21
3.4.3. <i>Deformación Axial de los Elementos</i>	23
3.4.3.1. Deformación Axial Debido a un Esfuerzo Axial.....	23
3.4.3.2. Deformaciones Debido a Cambios en la Curvatura y Torsión.....	24
3.5. ANÁLISIS SECCIONAL.....	26
3.5.1. <i>Modelo de Fibra</i>	27
3.6. MODELO DE LEY CONSTITUTIVA.....	29
3.7. DEFORMACIONES REMANENTES.....	31
CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	35
4.1. INTRODUCCIÓN.....	35
4.2. MATERIAL DISPONIBLE.....	36

4.3.	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	36
4.3.1.	<i>Equipo Utilizado</i>	36
4.3.2.	<i>Perfil Térmico del Horno</i>	37
4.3.3.	<i>Tratamientos de Prueba y Metalografías</i>	39
4.3.3.1.	Metodología Empleada en los Tratamientos de Prueba	39
4.3.3.2.	Metodología Empleada en las Metalografías	40
4.3.3.3.	Determinación del Tamaño de Grano.....	40
4.3.3.4.	Prueba de Efecto de Apantallamiento.....	48
4.3.4.	<i>Tratamiento de los Alambres</i>	50
4.4.	FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS.....	51
4.4.1.	<i>Descripción de las Probetas de Cable Trenzado</i>	51
4.4.2.	<i>Proceso de Trenzado</i>	53
4.4.2.1.	Idea General del Proceso	53
4.4.2.2.	Equipo Utilizado	54
4.4.2.3.	Metodología	57
4.4.3.	<i>Probetas de Alambres en Paralelo</i>	62
4.5.	ENSAYOS	63
4.5.1.	<i>Equipo Utilizado</i>	64
4.5.2.	<i>Metodología de Ensayo</i>	65
4.5.3.	<i>Datos de montaje de cada ensayo</i>	70
4.5.4.	<i>Formato y Proceso de los Registros</i>	70
CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES		72
5.1.	PARÁMETROS CALCULADOS	72
5.2.	ENSAYOS CÍCLICOS A AMPLITUD CONSTANTE	75
5.2.1.	<i>Ensayos de Probetas de Alambres Trenzados</i>	75
5.2.1.1.	Gráficos de Tensión vs Deformación	75
5.2.1.2.	Módulos de Elasticidad.....	77
5.2.1.3.	Esfuerzos de Transformación.....	78
5.2.1.4.	Rigidez Secante	79
5.2.1.5.	Deformaciones y Tensiones Máximas.....	80
5.2.1.6.	Factores de Amortiguamiento Equivalente.....	82
5.2.1.7.	Deformaciones Remanentes.....	82
5.2.2.	<i>Ensayos de Probetas de Alambres en Paralelo</i>	86
5.2.2.1.	Gráficos de Tensión vs Deformación	86
5.2.2.2.	Módulos de Elasticidad.....	89
5.2.2.3.	Esfuerzos de Transformación.....	90
5.2.2.4.	Rigidez Secante	90
5.2.2.5.	Deformaciones y Tensiones Máximas.....	91

5.2.2.6.	Factores de Amortiguamiento Equivalente.....	93
5.2.2.7.	Deformaciones Remanentes.....	94
5.3.	ENSAYOS CÍCLICOS A AMPLITUD VARIABLE	97
5.3.1.	<i>Ensayos de Probetas de Alambres Trenzados.....</i>	<i>97</i>
5.3.1.1.	Gráficos de Tensión vs Deformación	97
5.3.1.2.	Módulos de Elasticidad.....	99
5.3.1.3.	Esfuerzos de Transformación.....	100
5.3.1.4.	Rigidez Secante	101
5.3.1.5.	Deformaciones y Tensiones Máximas.....	103
5.3.1.6.	Factores de Amortiguamiento Equivalente.....	104
5.3.1.7.	Deformaciones Remanentes.....	105
5.3.2.	<i>Ensayos de Probetas de Alambres en Paralelo</i>	<i>109</i>
5.3.2.1.	Gráficos de Tensión vs Deformación	109
5.3.2.2.	Módulos de Elasticidad.....	111
5.3.2.3.	Esfuerzos de Transformación.....	112
5.3.2.4.	Rigidez Secante	113
5.3.2.5.	Deformaciones y Tensiones Máximas.....	114
5.3.2.6.	Factores de Amortiguamiento Equivalente.....	116
5.3.2.7.	Deformaciones Remanentes.....	117
CAPÍTULO 6:	RESULTADOS ANALÍTICOS	121
6.1.	INTRODUCCIÓN	121
6.2.	RESULTADOS PARA ENSAYOS CÍCLICOS A AMPLITUD CONSTANTE.....	121
6.2.1.	<i>Ley Constitutiva Utilizada.....</i>	<i>121</i>
6.2.2.	<i>Notación.....</i>	<i>122</i>
6.2.3.	<i>Datos de Entrada.....</i>	<i>122</i>
6.2.3.1.	Archivos de Carga (Deformaciones)	122
6.2.3.2.	Deformaciones Remanentes.....	123
6.2.4.	<i>Resultados Obtenidos para Cables Trenzados.....</i>	<i>124</i>
6.2.4.1.	Gráficos de Tensión vs Deformación	124
6.2.4.2.	Módulos de Elasticidad.....	124
6.2.4.3.	Esfuerzos de Transformación.....	126
6.2.4.4.	Rigidez Secante	127
6.2.4.5.	Tensiones Máximas.....	128
6.2.4.6.	Factores de Amortiguamiento Equivalente.....	129
6.2.5.	<i>Alambres en Paralelo.....</i>	<i>131</i>
6.2.5.1.	Gráficos de Tensión vs Deformación	131
6.2.5.2.	Módulos de Elasticidad.....	132
6.2.5.3.	Esfuerzos de Transformación.....	133
6.2.5.4.	Rigidez Secante	134

6.2.5.5.	Tensiones Máximas	135
6.2.5.6.	Factores de Amortiguamiento Equivalente.....	136
6.3.	RESULTADOS PARA ENSAYOS CÍCLICOS A AMPLITUD VARIABLE.....	139
6.3.1.	<i>Datos de Entrada</i>	139
6.3.1.1.	Archivo de Cargas (deformaciones).....	139
6.3.1.2.	Deformaciones Remanentes.....	140
6.3.1.3.	Modelo de Ley Constitutiva Utilizado en Ensayos al 5%.....	143
6.3.2.	<i>Predicciones Dentro del Rango Superelástico</i>	144
6.3.2.1.	Resultados Para Cables Trenzados	144
6.3.2.2.	Resultados Para Alambres en Paralelo	147
6.3.3.	<i>Predicciones Hasta el 5% de Deformación</i>	150
6.3.3.1.	Resultados para Cables Trenzados	150
6.3.3.2.	Resultados para Alambres en Paralelo	152
CAPÍTULO 7:	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.....	155
7.1.	RESUMEN	155
7.2.	CONCLUSIONES	156
7.2.1.	<i>Resultados Experimentales</i>	156
7.2.2.	<i>Resultados Analíticos</i>	157
7.3.	LIMITACIONES	158
7.4.	RECOMENDACIONES	158
BIBLIOGRAFÍA		159

Índice de Figuras

FIGURA 1-1 : FOTOGRAFÍAS Y SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS CABLES ENSAYADOS POR REEDLUN Y SHAW (2008).....	3
FIGURA 1-2 : (A) CURVA TÍPICA PARA ALAMBRES DE NITINOL (IP, 2000); (B) RESULTADOS PARA CABLES DE ÁNGULO BAJO (REEDLUNN & SHAW, 2008); (C) RESULTADOS PARA CABLES DE ÁNGULO MAYOR (REEDLUNN & SHAW, 2008)	5
FIGURA 2-1 : MODELO SIMPLIFICADO DE LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA.....	9
FIGURA 2-2 : CURVAS TENSIÓN - DEFORMACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA ALEACIÓN CUZNSN	11
FIGURA 2-3 : CURVA TENSIÓN VS DEFORMACIÓN TÍPICA PARA UN MATERIAL SMA (GYSLING, 2008)	12
FIGURA 3-1 : ELEMENTOS DE UN CABLE (COSTELLO, 1998)	13
FIGURA 3-2 : CONCEPTO DE NIVEL (GYSLING, 2008)	15
FIGURA 3-3 : CONCEPTO DE CAPA	15
FIGURA 3-4 : PARÁMETROS QUE DESCRIBEN LA GEOMETRÍA DE UN CABLE (GYSLING, 2008).	16
FIGURA 3-5 : PARAMETRIZACIÓN DE HÉLICE CIRCULAR	17
FIGURA 3-6 : SISTEMA LOCAL DE COORDENADAS. VECTORES TANGENTE (T), NORMAL (N) Y BINORMAL (B)	17
FIGURA 3-7 : CURVATURA Y VARIACIÓN DEL VECTOR TANGENTE.....	19
FIGURA 3-8 : DESPLAZAMIENTO DE UN ELEMENTO (MACHIDA & DURELLI, 1973)	22
FIGURA 3-9 : DEFORMACIÓN AXIAL POR CAMBIO DE CURVATURA (POPOV, 2000)	25
FIGURA 3-10: MODELO MULTILINEAL PARA SMA EN RANGO SUPERELÁSTICO (GYSLING, 2008)	29
FIGURA 3-11 : SUB-CICLOS (MOTAHARI & GHASSEMIEH, 2007).....	31
FIGURA 3-12 : ASIGNACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD CUANDO EXISTEN DEFORMACIONES REMANENTES.....	33
FIGURA 4-1 : (A) PUNTOS DE MEDICIÓN Y (B) RESULTADOS PARA EL PERFIL TÉRMICO (DIMENSIONES EN MILÍMETROS).....	38
FIGURA 4-2 : PERFIL TÉRMICO DEL HORNO	39
FIGURA 4-3 : PROBETA DE PRUEBA 1, SIN TRATAMIENTO	42
FIGURA 4-4 : PROBETA DE PRUEBA 2, SIN TRATAMIENTO	42
FIGURA 4-5 : PROBETA DE PRUEBA 3, TRATADA POR 15 SEGUNDOS.....	43
FIGURA 4-6 : PROBETA DE PRUEBA 4, TRATADA POR 15 SEGUNDOS.....	43
FIGURA 4-7 : PROBETA DE PRUEBA 5, TRATADA POR 20 SEGUNDOS.....	44
FIGURA 4-8 : PROBETA DE PRUEBA 6, TRATADA POR 20 SEGUNDOS.....	44
FIGURA 4-9 : PROBETA DE PRUEBA 7, TRATADA POR 25 SEGUNDOS.....	45
FIGURA 4-10 : PROBETA DE PRUEBA 8, TRATADA POR 25 SEGUNDOS	45
FIGURA 4-11 : PROBETA DE PRUEBA 9, TRATADA POR 30 SEGUNDOS	46
FIGURA 4-12 : PROBETA DE PRUEBA 10, TRATADA POR 30 SEGUNDOS	46
FIGURA 4-13 : PROBETA DE PRUEBA 11, TRATADA POR 35 SEGUNDOS	47
FIGURA 4-14 : PROBETA DE PRUEBA 12, TRATADA POR 35 SEGUNDOS	47
FIGURA 4-15 : PRUEBA DE APANTALLAMIENTO, EXTREMO 1	49
FIGURA 4-16 : PRUEBA DE APANTALLAMIENTO, TERCIO CENTRAL	49
FIGURA 4-17 : PRUEBA DE APANTALLAMIENTO, EXTREMO 2	50

FIGURA 4-18 : HORNO UTILIZADO	50
FIGURA 4-19 : DISPOSICIÓN DE LOS ALAMBRES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO	51
FIGURA 4-20 : CONFIGURACIÓN DE LAS PROBETAS FABRICADAS	52
FIGURA 4-21 : PROBETA DE CABLE TRENZADO	52
FIGURA 4-22 : ESQUEMA DE TRENZADO DE LOS CABLES	54
FIGURA 4-23 : PLANOS PIEZA PARA FIJAR DISCO III AL CABEZAL DE LA FRESADORA (MEDIDAS EN MILÍMETROS)	55
FIGURA 4-24 : PLANOS DE LOS DISCOS EMPLEADOS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS CABLES (MEDIDAS EN MILÍMETROS)	56
FIGURA 4-25 : MODO DE FIJAR LOS ALAMBRES AL DISCO III	58
FIGURA 4-26 : ALAMBRES FIJOS AL DISCO III	58
FIGURA 4-27 : DISCO II INSTALADO EN EL ROTOR DE LA FRESADORA	59
FIGURA 4-28 : ESQUEMA EQUIPO MONTADO SOBRE LA FRESADORA	59
FIGURA 4-29 : MECANISMO DE TRENZADO	60
FIGURA 4-30 : MECANISMO DE TRENZADO - DISCOS II Y III	60
FIGURA 4-31 : CABLE TRENZADO AL FINALIZAR EL PROCESO	61
FIGURA 4-32 : PRENSAS EMPLEADAS PARA FIJAR EL TRENZADO DE LA PRIMERA CAPA	62
FIGURA 4-33 : PROBETA DE ALAMBRE EN PARALELO	63
FIGURA 4-34 : PLANOS MORDAZAS CILÍNDRICAS (DIMENSIONES EN MILÍMETROS)	64
FIGURA 4-35 : EQUIPO UTILIZADO	65
FIGURA 4-36 : PROBETA DE CABLE TRENZADO MONTADA EN LA MÁQUINA DE ENSAYO	67
FIGURA 4-37 : DEFORMACIÓN VS TIEMPO PARA ENSAYO DE RUTINA 2, CON PROBETA DE 10 CM DE LARGO	68
FIGURA 4-38 : PROBETA DE ALAMBRES EN PARALELO MONTADA SOBRE LA MÁQUINA DE ENSAYO	69
FIGURA 5-1 : PARÁMETROS CALCULADOS	72
FIGURA 5-2 : ÁREAS QUE SE EMPLEAN PARA CALCULAR EL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE	74
FIGURA 5-3 : DEFORMACIONES REMANENTES	74
FIGURA 5-4 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 1, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	76
FIGURA 5-5 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 2, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	76
FIGURA 5-6 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETAS 1 Y 2 SUPERPUESTAS, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	77
FIGURA 5-7 : MÓDULOS DE ELASTICIDAD, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	78
FIGURA 5-8 : ESFUERZOS DE TRANSFORMACIÓN, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	79
FIGURA 5-9 : RIGIDEZ SECANTE, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	80
FIGURA 5-10 : DEFORMACIONES MÁXIMAS EFECTIVAS, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	81
FIGURA 5-11 : ESFUERZOS MÁXIMOS, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	81
FIGURA 5-12 : FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	82
FIGURA 5-13 : DEFORMACIÓN REMANENTE ACUMULADA, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	83
FIGURA 5-14 : DEFORMACIÓN REMANENTE RELATIVA, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	83
FIGURA 5-15 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 1, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	87
FIGURA 5-16 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 2, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	87

FIGURA 5-17 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN DE LA PROBETA 1 CON EL ÁREA CORREGIDA (RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO)	88
FIGURA 5-18 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETAS 1 Y 2 SUPERPUESTAS, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO.....	88
FIGURA 5-19 : MÓDULOS DE ELASTICIDAD, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO.....	89
FIGURA 5-20 : ESFUERZOS DE TRANSFORMACIÓN, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	90
FIGURA 5-21 : RIGIDEZ SECANTE, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	91
FIGURA 5-22 : DEFORMACIONES MÁXIMAS EFECTIVAS, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	92
FIGURA 5-23 : ESFUERZOS MÁXIMOS, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	92
FIGURA 5-24 : FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	93
FIGURA 5-25 : DEFORMACIONES REMANENTES, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	94
FIGURA 5-26 : DEFORMACIONES REMANENTES RELATIVAS, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	95
FIGURA 5-27 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 1, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS.....	98
FIGURA 5-28 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 2, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS.....	98
FIGURA 5-29 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, SERIE DE 5 CICLOS AL 5% (CICLOS 17 A 21 DE LA RUTINA 2), PROBETA 2, CABLES TRENZADOS	99
FIGURA 5-30 : MÓDULOS DE ELASTICIDAD, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	100
FIGURA 5-31 : ESFUERZOS DE TRANSFORMACIÓN, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	101
FIGURA 5-32 : RIGIDEZ SECANTE VS N° DE CICLOS, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	102
FIGURA 5-33 : RIGIDEZ SECANTE VS AMPLITUD DE CICLO, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	102
FIGURA 5-34 : DEFORMACIONES MÁXIMAS EFECTIVAS, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	103
FIGURA 5-35 : ESFUERZOS MÁXIMOS, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS.....	104
FIGURA 5-36 : FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	105
FIGURA 5-37 : DEFORMACIÓN REMANENTE ABSOLUTA, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	106
FIGURA 5-38 : DEFORMACIÓN REMANENTE RELATIVA, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS.....	106
FIGURA 5-39 : DEFORMACIONES REMANENTES EN FUNCIÓN DE LA AMPLITUD DE CADA CICLO, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	107
FIGURA 5-40 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 1, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	109
FIGURA 5-41 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 2, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	110
FIGURA 5-42 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, SERIE DE 5 CICLOS AL 5% (CICLOS 17 A 21 DE LA RUTINA 2), PROBETA 1, ALAMBRES EN PARALELO	110
FIGURA 5-43 : MÓDULOS DE ELASTICIDAD, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO.....	111
FIGURA 5-44 : ESFUERZOS DE TRANSFORMACIÓN, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	112
FIGURA 5-45 : RIGIDEZ SECANTE, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	113
FIGURA 5-46 : RIGIDEZ SECANTE VS AMPLITUD DE CICLO, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO.....	114
FIGURA 5-47 : DEFORMACIONES MÁXIMAS EFECTIVAS, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	115
FIGURA 5-48 : ESFUERZOS MÁXIMOS, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	115
FIGURA 5-49 : FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	116
FIGURA 5-50 : FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE EN FUNCIÓN DE LA AMPLITUD DE CADA CICLO.....	117
FIGURA 5-51 : DEFORMACIÓN REMANENTE ACUMULADA, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	118
FIGURA 5-52 : DEFORMACIÓN REMANENTE RELATIVA, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO.....	118

FIGURA 5-53: DEFORMACIONES REMANENTES VS AMPLITUD DE CICLO, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO	118
FIGURA 6-1 : LEY CONSTITUTIVA EMPLEADA.....	122
FIGURA 6-2 : MODELAMIENTO DE LA TASA DE DEFORMACIONES REMANENTES	123
FIGURA 6-3 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, RUTINA 1, PROBETA 1, CABLES TRENZADOS.....	124
FIGURA 6-4 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, RUTINA 1, PROBETA 2, CABLES TRENZADOS.....	125
FIGURA 6-5 : PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	125
FIGURA 6-6 : PREDICCIÓN DEL ESFUERZO DE TRANSFORMACIÓN, RUTINA1, CABLES TRENZADOS	126
FIGURA 6-7 : PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ SECANTE, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	127
FIGURA 6-8 : PREDICCIÓN DE ESFUERZOS MÁXIMOS, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	128
FIGURA 6-9 : PREDICCIÓN DE LOS FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	129
FIGURA 6-10 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 1, RUTINA1, ALAMBRES EN PARALELO	131
FIGURA 6-11 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN, PROBETA 2, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	132
FIGURA 6-12 : PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	133
FIGURA 6-13 : PREDICCIÓN DEL ESFUERZO DE TRANSFORMACIÓN, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	134
FIGURA 6-14 : PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ SECANTE, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	135
FIGURA 6-15 : PREDICCIÓN DE ESFUERZOS MÁXIMOS, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	136
FIGURA 6-16 : PREDICCIÓN DE LOS FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	137
FIGURA 6-17 : DEFORMACIONES DE ENTRADA PARA SIMULACIÓN DE RUTINA 2.....	140
FIGURA 6-18: TASA DE DEFORMACIÓN REMANENTE, ALAMBRES EN PARALELO, RUTINA 2	141
FIGURA 6-19 : TASA DE DEFORMACIÓN REMANENTE, CABLES TRENZADOS, RUTINA 2	142
FIGURA 6-20 : LEY CONSTITUTIVA EMPLEADA EN SIMULACIONES CON DEFORMACIONES SOBRE EL LÍMITE SUPERELÁSTICO	143
FIGURA 6-21 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN EN RANGO SUPERELÁSTICO, PROBETA 1, CABLES TRENZADOS.....	145
FIGURA 6-22 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN EN RANGO SUPERELÁSTICO, PROBETA 2, CABLES TRENZADOS.....	145
FIGURA 6-23 : PREDICCIÓN DE TENSIONES MÁXIMAS EN RANGO SUPERELÁSTICO, CABLES TRENZADOS	146
FIGURA 6-24 : PREDICCIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE EN RANGO SUPERELÁSTICO, CABLES TRENZADOS	146
FIGURA 6-25 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN EN RANGO SUPERELÁSTICO, PROBETA 1, ALAMBRES EN PARALELO.....	147
FIGURA 6-26 : PREDICCIÓN DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN EN RANGO SUPERELÁSTICO, PROBETA 2, ALAMBRES EN PARALELO.....	148
FIGURA 6-27 : PREDICCIÓN DE TENSIONES MÁXIMAS EN RANGO SUPERELÁSTICO, ALAMBRES EN PARALELO	148
FIGURA 6-28 : PREDICCIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE EN RANGO SUPERELÁSTICO, ALAMBRES EN PARALELO	149
FIGURA 6-29 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN EN CABLES TRENZADOS, DEFORMACIÓN HASTA 5%	150
FIGURA 6-30 : PREDICCIÓN DE TENSIONES MÁXIMAS, DEFORMACIONES HASTA EL 5%, CABLES TRENZADOS.....	151
FIGURA 6-31 : PREDICCIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, DEFORMACIONES HASTA EL 5%, CABLES TRENZADOS....	151
FIGURA 6-32 : TENSIÓN VS DEFORMACIÓN EN ALAMBRES EN PARALELO, DEFORMACIÓN HASTA 5%.....	152
FIGURA 6-33 : PREDICCIÓN DE TENSIONES MÁXIMAS, DEFORMACIONES HASTA EL 5%, ALAMBRES EN PARALELO	153
FIGURA 6-34 : PREDICCIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, DEFORMACIONES HASTA EL 5%, ALAMBRES EN PARALELO	153

Índice de Tablas

TABLA 2.1 : TEMPERATURAS CRÍTICAS DE LA ALEACIÓN EMPLEADA	12
TABLA 3.1 : PARÁMETROS DE UNA HÉLICE CIRCULAR	15
TABLA 4.1 : DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO PARA TIEMPOS DE COCCIÓN DE 20 S (IZQUIERDA) Y 25 S (DERECHA).....	41
TABLA 4.2 : RESULTADOS PRUEBA EFECTO DE APANTALLAMIENTO	48
TABLA 4.3 : LARGO LIBRE Y TEMPERATURA DE ENSAYO	70
TABLA 4.4 : DATOS DE CALIBRACIÓN MTS	71
TABLA 5.1 : RESUMEN DE PARÁMETROS CALCULADOS, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	85
TABLA 5.2 : RESUMEN DE PARÁMETROS CALCULADOS, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO.....	96
TABLA 5.3 : RESUMEN DE PARÁMETROS CALCULADOS, RUTINA 2, CABLES TRENZADOS	108
TABLA 5.4 : RESUMEN DE PARÁMETROS CALCULADOS, RUTINA 2, ALAMBRES EN PARALELO.....	120
TABLA 6.1 : VALORES EMPLEADOS EN LEY CONSTITUTIVA	122
TABLA 6.2 : RESUMEN DE PARÁMETROS ESTIMADOS POR EL SOFTWARE, RUTINA 1, CABLES TRENZADOS	130
TABLA 6.3 : RESUMEN DE PARÁMETROS ESTIMADOS POR EL SOFTWARE, RUTINA 1, ALAMBRES EN PARALELO	138
TABLA 6.4 : PARÁMETROS MODELO DE DEFORMACIONES REMANENTES, ALAMBRES EN PARALELO, RUTINA 2.....	141
TABLA 6.5 : PARÁMETROS MODELO DE DEFORMACIONES REMANENTES, CABLES TRENZADOS, RUTINA 2.....	142
TABLA 6.6 : VALORES LEY CONSTITUTIVA AL 5%.....	143
TABLA 6.7 : RESUMEN DE PARÁMETROS ESTIMADOS POR EL SOFTWARE, DEFORMACIONES EN RANGO SUPERELÁSTICO	149
TABLA 6.8 : RESUMEN DE PARÁMETROS ESTIMADOS POR EL SOFTWARE, DEFORMACIONES HASTA 5%.....	154

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes Generales

Las aleaciones con memoria de forma (SMA, por sus siglas en inglés) se distinguen del resto de los metales por exhibir dos importantes comportamientos: El efecto de memoria de forma y el efecto de superelasticidad (SME y SE, respectivamente, por sus siglas en inglés). El SME es la capacidad del material de recuperar su forma luego de ser sometido a grandes deformaciones (llegando al orden del 10%), al ser calentado por sobre una determinada temperatura de transformación. El SE consiste en la capacidad del material de ser sometido a estas deformaciones y recuperarse de ellas si los ciclos de carga y descarga se realizan dentro de un determinado rango de temperaturas y esfuerzos. Ambos procesos están relacionados con transformaciones de la estructura interna del material o cambios de fase; entendiendo por fase a una zona del sistema cuyas propiedades son homogéneas y que son físicamente distintas a otras partes de éste.

Si bien se conocen muchas aleaciones que exhiben el SME y el SE, el Nitinol (aleación de Níquel – Titanio) se ha empleado como el compuesto preferido para fabricar elementos “inteligentes” debido a sus propiedades termodinámicas y termoeléctricas. Actualmente, se han desarrollado diversos dispositivos basados en este material para el control de vibraciones sísmicas (Wilson & Wesolowsky, 2005; Song et al., 2005). Sin embargo, el elevado costo de éste ha dado pie para que se busquen nuevas alternativas de aleaciones con memoria de forma. Dentro de éstas, las aleaciones basadas en cobre asoman como una buena opción debido a su inferior costo y, aún más importante, a que es posible que exhiban un comportamiento superelástico en un rango de temperaturas que es común al cual operan las estructuras civiles (Montecinos et al., 2005; Araya et al., 2008).

Existen numerosos estudios acerca de las propiedades mecánicas de alambres y barras de SMA, así como de su capacidad de disipar energía y de su potencial en la ingeniería sísmica. Graesser y Cozzarelli (1991) estudiaron el efecto de la frecuencia de excitación en la capacidad disipativa en alambres de Nitinol y plantearon la posibilidad de utilizar elementos de Nitinol como disipadores sísmicos en estructuras civiles. Desde entonces, la capacidad disipativa de alambres de nitinol ha sido estudiada y caracterizada en diversas investigaciones. Piedboeuf y otros (1998) estudiaron los efectos de cambios en la temperatura, la frecuencia de excitación y la deformación aplicada, sobre la capacidad de disipar energía. Sus resultados indicaron que, dentro del rango superelástico, la disipación de energía no se ve afectada en forma significativa por cambios en la temperatura ambiental. La amplitud de la deformación y la frecuencia de excitación, en cambio, sí afectan esta propiedad: a mayor amplitud se disipa más energía, mientras que ésta decrece al aumentar la frecuencia de excitación. Más recientes son los estudios realizados por Dolce y Cardone (2001a,b) y por DesRoches et al. (2004) que caracterizan las curvas de tensión – deformación de alambres y barras de Nitinol en términos de esfuerzos máximos y de

transformación, rigidez secante, energía disipada por ciclo, factores de amortiguamiento equivalente y deformaciones remanentes luego de cada ciclo de carga.

Dentro de los estudios sobre SMA basadas en cobre, destacan una serie de trabajos realizados en la Universidad de Chile (Mir, 2005; Marivil, 2007; Araya et al., 2008; Montecinos et al., 2008) en los cuales se caracterizaron las propiedades mecánicas de alambres de CuAlBe en función de la temperatura de ensayo y de la microestructura interna del material. En ellos, se caracterizó la curva de tensión - deformación del material y se determinó que la tensión máxima que los alambres son capaces de alcanzar crece a medida que aumenta la temperatura y decrece con el aumento en el tamaño de grano de la estructura interna de la aleación. En particular, el trabajo de Mir (2005) estudió la respuesta mecánica de alambres de CuAlBe de 0.5 mm de diámetro, sometidos a distintos tratamientos térmicos para obtener tamaños de grano de 60, 100 y 200 μm . En él se determinó que el mayor tamaño de grano presenta más amortiguamiento, pero sus propiedades mecánicas decrecen significativamente respecto a las muestras con granos de tamaño menor. Además, no se observaron grandes variaciones entre las propiedades obtenidas para los granos de 60 y 100 μm . Finalmente se concluye que, para efectos de disipación energía, el menor tamaño de grano (60 μm) sería el más adecuado, pero que fluctuaciones en el tamaño de grano entre 60 y 100 μm no afectarían significativamente los resultados. Marivil (2007) complementó el trabajo de Mir (2005) ensayando alambres de las mismas características, verificando y corrigiendo sus curvas de tensión – deformación. Otro trabajo similar, realizado por Casciati y Van der Eijk (2008) analiza diversas muestras de alambres y barras de CuAlBe, elaborados por distintos fabricantes, y compara las propiedades mecánicas obtenidas para muestras con el tamaño de grano proveniente de fábrica contra aquellas obtenidas a partir de probetas tratadas térmicamente. El objetivo del estudio era verificar la factibilidad de utilizar el material en dispositivos sísmicos empleando como parámetros de diseño las propiedades del material especificadas por el fabricante. Los resultados difieren considerablemente para las probetas elaboradas por distintas empresas, pese a poseer, nominalmente, la misma composición. En consecuencia, el estudio de la microestructura del material y el tratamiento térmico realizado resultan fundamentales al trabajar con SMA basados en cobre.

Diversas investigaciones han intentado caracterizar con distintos modelos matemáticos la disipación de energía: Gandhi y Wolons (1999) propusieron un modelo analítico capaz de predecir el loop de histéresis empleando el módulo complejo, método comúnmente utilizado para estimar la disipación de energía en la dinámica de estructuras. Ip (2000) derivó un set de fórmulas que permiten estimar la disipación de una barra de Nitinol sometida a flexión empleando la teoría clásica de vigas y un modelo idealizado, multilineal, de la ley constitutiva del material.

Por otra parte, dentro de los distintos dispositivos para el control de vibraciones, los cables de SMA son elementos nuevos que poseen potenciales ventajas respecto a los cables de acero comunes. Entre éstas destacan una mayor absorción de energía (de los alambres que los componen), buen amortiguamiento, gran flexibilidad, un adecuado comportamiento a la fatiga y versatilidad al momento de diseñar. Además, se ha demostrado que los alambres de SMA poseen una mayor capacidad para disipar

energía que barras sólidas del mismo material (DesRoches et al., 2004), por lo que resulta lógico estudiar el comportamiento de cables formados por grupos de alambres dispuestos en forma helicoidal o en paralelo.

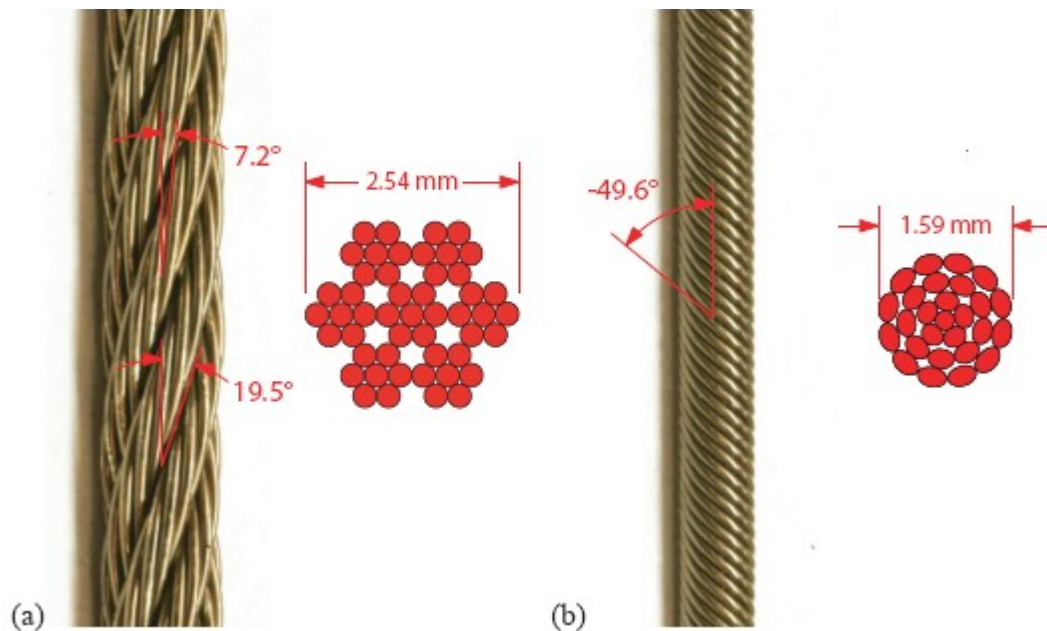


Figura 1-1 : Fotografías y sección transversal de los cables ensayados por Reedlun y Shaw (2008)

A la fecha, sólo se ha llevado a cabo una investigación sobre el comportamiento de cables de SMA (Reedlun y Shaw, 2008; con Nitinol). En ella, se ensayaron en forma cíclica, a deformación máxima constante ($\varepsilon_{max} = 10\%$), tres probetas de dos configuraciones de cables trenzados (Figura 1-1); y se analizaron sus respuestas mecánica y termomecánica. El estudio concluye que para las probetas trenzadas en una hélice de ángulo menor (Figura 1-1a), la forma de la curva de tensión – deformación es similar a la obtenida para alambres sin trenzar (Figura 1-2a y Figura 1-2b). Sin embargo, se notan diferencias en cuanto a tensiones máximas, deformaciones de transformación de fase (ver sección 2.2) y la tasa a la que crecen las deformaciones remanentes en la probeta luego de cada ciclo de carga. Por otra parte, los resultados obtenidos para la configuración de cable con el mayor ángulo de trenzado (Figura 1-1b y Figura 1-2c) difieren considerablemente de las curvas de tensión – deformación de alambres sin trenzar.

Existen numerosos intentos por modelar el comportamiento de aleaciones con memoria de forma. Para ello, se han utilizado diversas teorías, que permiten dividir los modelos en tres categorías: de termodinámica microscópica, basados en micromecánica y modelos macroscópicos fenomenológicos (Huang & Brinson, 1998). Los modelos de termodinámica microscópica utilizan la cinemática de la martensita para describir los cambios de fase (Falk, 1983; Abeyaratne et al., 1994). Los modelos basados en micromecánica proponen una ley constitutiva para un grano del material, a partir de la cual establecen un modelo de comportamiento para un volumen representativo de la aleación (Huang & Brinson, 1998;

Zhu et al., 2002). Los modelos macroscópicos fenomenológicos se basan en el comportamiento termodinámico de la aleación y se obtienen a partir de ajustes de curvas experimentales. Debido a su simplicidad, son más apropiados para aplicaciones de ingeniería (Liang & Rogers, 1992; Boyd & Lagoudas, 1996; Motahari & Gassemieh, 2006).

Dentro de los modelos macroscópicos fenomenológicos, los más simples proponen linealizar las curvas esfuerzo – deformación, separando el ciclo de histéresis en cuatro tramos lineales según la fase en que se encuentre el material. En particular, el modelo propuesto por Motahari y Gassemieh (2006) destaca por representar los cambios de fase del material (respuesta pseudoelástica, parcialmente pseudoelástica, maclado, respuesta bajo condiciones adiabáticas y ciclos de carga y descarga aún cuando no se alcanza a cambiar completamente de fase) y por ser un modelo relativamente fácil de implementar computacionalmente.

Gysling (2008) implementó un modelo lineal que permite obtener las deformaciones y tensiones de cables bajo condiciones de carga axisimétricas empleando distintos modelos analíticos. Además, incorporó el modelamiento de cables SMA empleando la ley constitutiva de Motahari y Gassemieh (2007). Sin embargo, éste modelo aún no se ha corroborado con datos experimentales para SMA.

En este contexto, el presente trabajo de tesis busca aportar con nuevos resultados en cuanto a tensiones máximas, amortiguamiento equivalente, módulo de elasticidad, rigidez secante, deformaciones remanentes y esfuerzos de transformación en cables de SMA basados en cobre, así como verificar y, eventualmente, extender el modelo numérico propuesto por Gysling (2008). Para esto, se contó con 28 metros de alambre de una aleación de CuAlBe que posee comportamiento superelástico, cuyas propiedades han sido previamente estudiadas en los trabajos de Mir (2005) y Marivil (2007). Se diseñó un mecanismo capaz de trenzar cables y se fabricaron 2 muestras de alambres trenzados, conformados por 19 alambres 20 cm de largo cada uno. Además, se elaboraron dos probetas de alambres en paralelo manteniendo las características de largo y número de elementos de las muestras trenzadas. Los cables se ensayaron a ciclos de carga y descarga, primero manteniendo una deformación máxima constante y luego aplicando una rutina de deformaciones máximas variables. Después se estudiaron sus curvas de esfuerzo – deformación y se contrastaron con los resultados predichos por el modelo de Gysling (2008). Finalmente, se extendió el modelo numérico propuesto por Gysling (2008) en base a las evidencias experimentales.

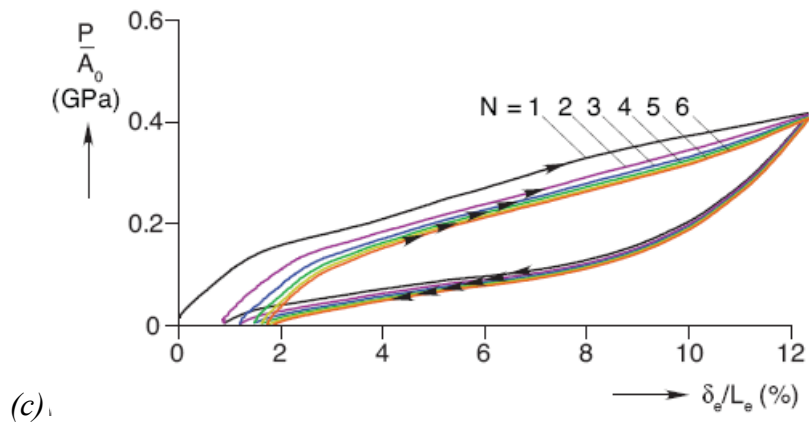
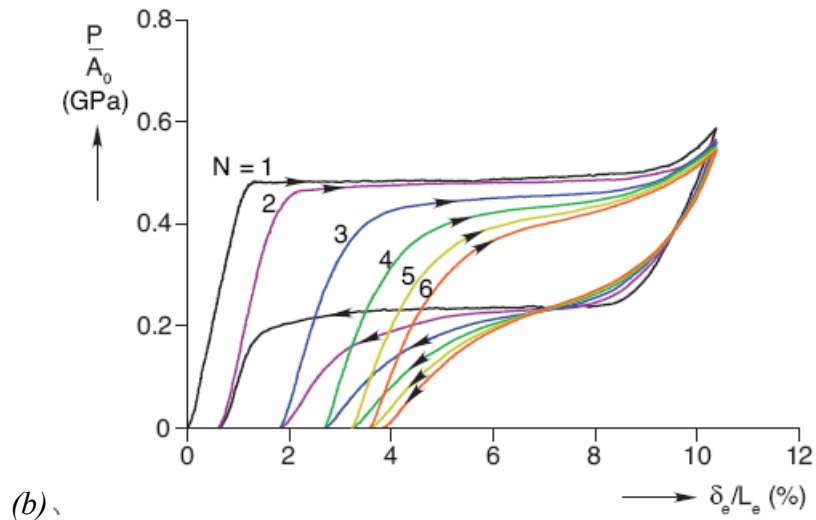
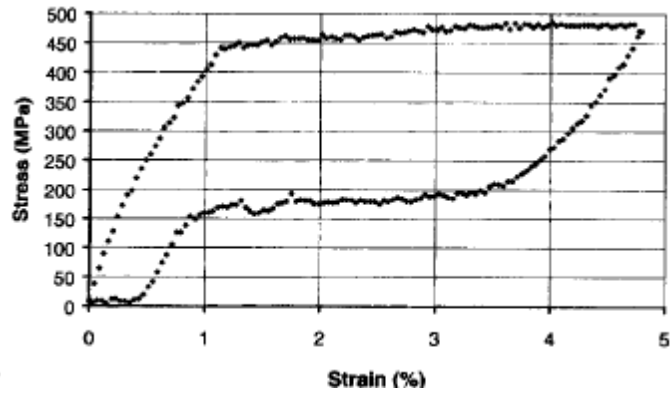


Figura 1-2 : (a) Curva típica para alambres de Nitinol (Ip, 2000); (b) Resultados para cables de ángulo bajo (Reedlunn & Shaw, 2008); (c) Resultados para cables de ángulo mayor (Reedlunn & Shaw, 2008)

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar experimentalmente la capacidad de disipar energía de cables formados por alambres de 0.5 mm de diámetro de una aleación Cu-11.8%p.Al-0.5%p.Be y comparar con los resultados obtenidos del modelo computacional propuesto por Gysling (2008).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir una metodología para la fabricación de probetas de cable trenzado y en paralelo.
- Determinar experimentalmente la capacidad de disipar energía en función de la configuración del cable.
- Verificar, y eventualmente extender, el modelo propuesto por Gysling (2008) para determinar las deformaciones de un cable de SMA sometido a cargas axisimétricas.

1.3. Contenidos de la Tesis

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Se relatan los antecedentes generales existentes al momento de iniciar esta investigación, de modo de situar el contexto en que está enmarcado el proyecto. Se plantean los objetivos generales y específicos a cumplir durante el desarrollo de la tesis y se resumen los contenidos de la misma.

CAPÍTULO 2: ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Se introduce el concepto y teoría básica de las SMA. Debido a que el tema no es comúnmente conocido entre ingenieros civiles, este capítulo cubre aspectos básicos como qué es una fase, en qué consisten las fases austenítica y martensítica de las SMA, qué son transformaciones de fase y la transformación martensítica, qué es y por qué se producen el SME y el SE. Además se especifica la composición del material utilizado y sus temperaturas críticas de transformación de fase. Finalmente, se explican las características de la curva esfuerzo – deformación típica del material.

CAPÍTULO 3: MODELO DE CABLES DE SMA

Se explica en forma detallada el modelo matemático de la geometría de un cable, así como las ecuaciones que rigen su comportamiento al ser sometido a cargas axisimétricas. Además, se detalla la forma en que se modela la ley constitutiva del material para ser implementada en un modelo numérico. Se resumen los trabajos de Gysling (2008) y Motahari – Ghassemieh (2006).

CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se describen detalladamente los tratamientos térmicos realizados, el proceso de fabricación y la matriz y el dispositivo de ensayo final de los cables.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se exponen los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados y la discusión de los mismos.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS ANALÍTICOS

Se exponen los resultados obtenidos a partir del software desarrollado por Gysling (2008), se comparan con los resultados del capítulo anterior. Además se explican las extensiones realizadas al programa original para adaptarlo para predecir en forma más precisa el comportamiento de cables de SMA.

CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se resume lo realizado durante el desarrollo de la investigación y el impacto de los resultados obtenidos. Se evalúa el cumplimiento de los objetivos planteados en el primer capítulo.

Capítulo 2: Aleaciones con Memoria de Forma

2.1. Introducción a las Aleaciones con Memoria de Forma

El origen de las SMA se remonta a 1932, cuando Chang y Read observaron por primera vez el efecto de memoria de forma en una aleación de oro y cadmio. Sin embargo, sólo se comenzó a investigar el potencial de las SMA en aplicaciones prácticas luego de que Buecher y otros colaboradores, en 1962, descubrieran el SME en una aleación de níquel – titanio en el Laboratorio Naval de Artillería (NOL, por sus siglas en inglés), White Oak, Maryland, EE.UU. Este compuesto fue bautizado como *Nitinol* en honor al lugar en que fue descubierto (Otsuka & Wayman, 1998).

Actualmente se conocen muchas otras aleaciones que poseen memoria de forma, sin embargo, el Nitinol se ha mantenido como el material preferido para fabricar elementos “inteligentes” debido a sus propiedades termodinámicas y termoeléctricas. Por otra parte, el elevado costo de este material ha dado pie para que se busquen nuevas alternativas en aleaciones con memoria de forma (Otsuka & Wayman, 1998). Dentro de estas, aquellas basadas en cobre asoman como una buena opción debido a su relación costo-desempeño.

2.2. Transformaciones de Fase y la Transformación Martensítica

¿Por qué ocurre el efecto de memoria de forma o el de superelasticidad? Para responder esta pregunta, primero es necesario definir lo que es una fase y explicar lo que se entiende por *transformación de fase*. Luego se desarrollará el concepto de *transformación martensítica*, evento que está estrechamente relacionado con el SME y el SE.

En metalurgia, se define una *fase* como una zona del sistema cuya composición y propiedades son homogéneas y que son distinguibles respecto de las de otras partes de éste. Debido a diferentes causas, una fase puede volverse inestable y verse forzada a cambiar. Esto se conoce como *transformación de fase*, y se define como el proceso de cambio de una o más fases en la aleación (el sistema) en una nueva fase o mezcla de ellas (Porter & Easterling, 1981).

Tanto el efecto de memoria de forma como el de superelasticidad están relacionados con una transformación de fase en sólidos conocida como *Transformación Martensítica* (MT). Ésta se caracteriza por ser una transformación sin difusión, es decir, desde que comienza a producirse el reordenamiento de átomos hasta que se alcanza la nueva fase, los movimientos atómicos individuales son menores al espaciamiento interatómico (Porter & Easterling, 1981). Usualmente la fase inicial (también llamada fase madre) para la MT corresponde a una estructura cristalina cúbica de cara centrada (FCC) conocida como austenita, estable a altas temperaturas. El resultado de la MT es una fase cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (Body Centered Tetragonal, BCT) de baja simetría, metaestable a bajas temperaturas,

conocida como martensita. Esta transformación ocurre a altas velocidades (cercanas a la velocidad del sonido), es generada por mecanismos de corte e induce esfuerzos internos en el material (Otsuka & Wayman, 1998).

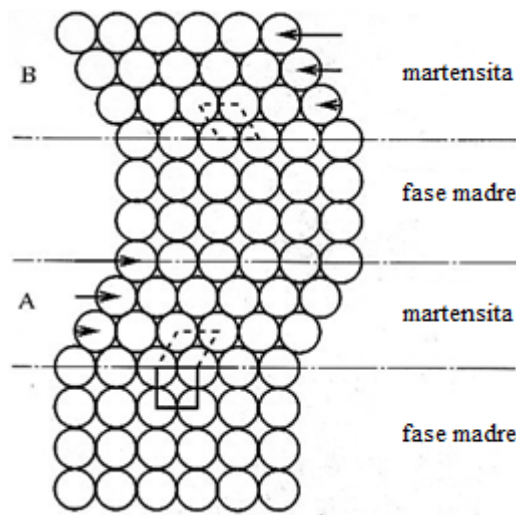


Figura 2-1 : Modelo simplificado de la transformación martensítica.
(Otsuka & Wayman, 1998)

La MT comienza cuando la fase inicial (austenita estable a alta temperatura) es sometida a un enfriamiento rápido por debajo de una temperatura característica conocida como M_s (martensite start). Para temperaturas bajo M_s la austenita se vuelve inestable y se empieza a formar martensita metaestable mediante un mecanismo de corte como el que se muestra en forma esquemática en la Figura 2-1. El cambio de fase concluye cuando toda la austenita se ha convertido en martensita, al enfriar por debajo una temperatura denominada M_f (martensite finish). El proceso inverso se conoce como *Transformación Martensítica Inversa* (IMT). En este caso, en la fase inicial se tiene únicamente martensita metaestable. Al calentar por sobre una temperatura crítica A_s (austenite start) la martensita se vuelve inestable y se comienza a formar austenita en su orientación inicial. Cuando la temperatura supera A_f (austenite finish), toda la martensita se habrá transformado en austenita metaestable a altas temperaturas (Marivil, 2007). En la Figura 2-1 se puede apreciar que la martensita de las regiones A y B poseen la misma estructura, pero que están orientadas inversamente, por lo que se denominan *variantes* de la martensita. Debido a la alta simetría de la austenita, es posible obtener muchas variantes a partir de la misma fase madre (Otsuka & Wayman, 1998).

Existe otra forma de obtener martensita en un material SMA. Si en vez de aplicar calor se aplica un esfuerzo sobre la aleación, es posible generar un cambio de fase de austenita a martensita siempre y cuando la temperatura sea menor a un valor crítico denominado M_D . Esta transformación se conoce como *Transformación Martensítica Inducida por Esfuerzos* (SIM, por sus siglas en inglés). Sin embargo, el mecanismo de reacomodo de los átomos que se produce en la SIM es distinto al que se obtiene

induciendo la MT por temperatura. En el primer caso, la estructura martensítica se genera mediante el deslizamiento de planos (*detwinned martensite*). En el segundo, el acomodo se debe a la introducción de maclas (*twinned martensite*), es decir, a la agrupación en forma simétrica de los cristales (Motahari & Ghassemieh, 2007). El lector interesado puede revisar el libro de Otsuka y Wayman (1998) para mayor detalle sobre este proceso.

A pesar de que el movimiento de partículas debido a la MT es a nivel microscópico, éstos generan un cambio de forma del sistema global. Este fenómeno es lo que liga a la transformación martensítica al efecto de memoria de forma y al de superelasticidad.

2.3. Efecto de Memoria de Forma y Efecto de Superelasticidad

Como se mencionó en la sección anterior, una aleación con memoria de forma posee cuatro temperaturas características que regulan su comportamiento: M_f , M_s , A_s , A_f ; cumpliéndose que $M_f < M_s < A_s < A_f$. Si se tiene un material en fase austenítica a una temperatura entre A_f y M_D , y se aplica un esfuerzo mayor a un determinado valor crítico, se dará lugar a una SIM y se comenzará a formar martensita inducida por esfuerzos, puesto que la austenita, en este rango de temperaturas, no es estable al ser sometida a altos esfuerzos. La fase martensítica se mantendrá en el material hasta que se deje de aplicar la carga. Cuando esto suceda, la martensita cambiará de fase a austenita puesto que no es estable a bajos esfuerzos si es que la temperatura es mayor a A_f . Este proceso se denomina **Efecto de Superelasticidad (SE)** o pseudoelasticidad debido a que volverá a su condición inicial sin dejar deformaciones permanentes en el material. En caso de que la temperatura fuese menor a A_f , el material quedaría con deformaciones permanentes puesto que al menos una porción de la martensita inicial seguiría siendo estable. Esta configuración deformada se mantendría hasta que la temperatura del material se eleve por sobre A_f , donde la martensita, por medio de la MT, se transformaría en austenita metaestable volviendo a su configuración original. Esto se conoce como **Efecto de Memoria de Forma (SME)**. De esta forma, es claro que tanto el SME como el SE son partes de un mismo proceso.

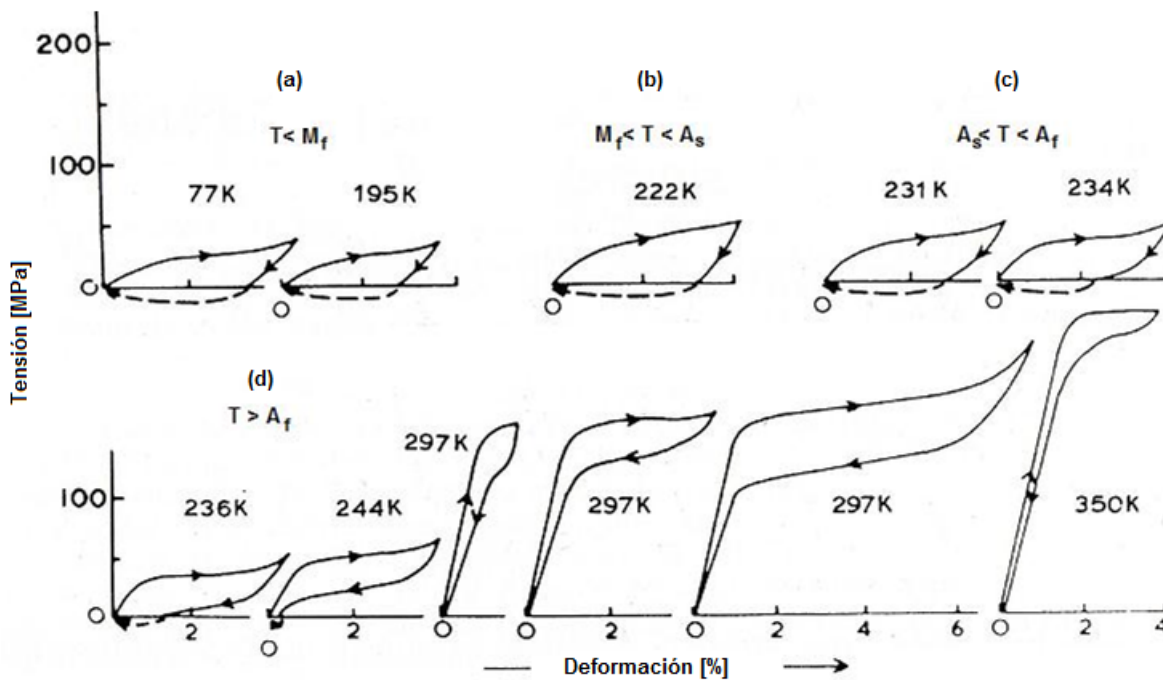


Figura 2-2 : Curvas tensión - deformación en función de la temperatura para aleación CuZnSn
(Otsuka & Wayman, 1998)

La Figura 2-2 muestra los gráficos de tensión versus deformación de una SMA al ser sometida a carga y descarga a diferentes temperaturas. En ella, las dos primeras curvas de la parte superior (Figura 2-2a y Figura 2-2b) muestran que el material queda con grandes deformaciones permanentes si se aplica una carga y la temperatura es inferior a A_s (líneas continuas). El tercer gráfico (Figura 2-2c) de la parte superior muestra menores deformaciones permanentes puesto que la temperatura se encuentra entre A_s y A_f . Las líneas punteadas representan el efecto de memoria de forma, que se obtiene al calentar la probeta por sobre A_f luego de haberse deformado. Los gráficos de la parte inferior (Figura 2-2d) muestran materiales cargados a una temperatura superior a A_f y representan el efecto de superelasticidad.

2.4. Ley Constitutiva de las SMA

La Figura 2-3 muestra una curva tensión – deformación típica para una aleación con comportamiento superelástico. En ella se aprecian los distintos cambios de fase por los que atraviesa el material. Suponiendo que la temperatura es mayor a A_f , en un comienzo (punto A) el material se encontrará en su fase austenítica y exhibirá un comportamiento relativamente lineal hasta el punto B, donde comienza el cambio de fase. Del punto B al C se produce la transformación martensítica inducida por esfuerzos, comúnmente esto se ve reflejado en una segunda zona lineal. Se ha observado que este tramo es prácticamente horizontal en el Nitinol, mientras que para aleaciones de CuAlBe posee una pendiente más pronunciada. Los puntos C-D-A representan la descarga del material, dando lugar a la transformación martensítica inversa desde D a A. Como se puede ver en la figura, este proceso se lleva a

cabo en un nivel tensional menor, por lo que se forma un ciclo de histéresis. El área del ciclo representa la energía disipada por el material.

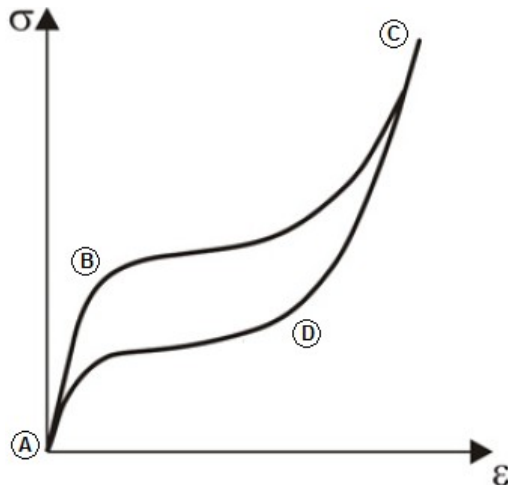


Figura 2-3 : Curva tensión vs deformación típica para un material SMA (Gysling, 2008)

2.5. Características de la Aleación Empleada

Para esta investigación se empleó una aleación Cu-11.8%Al-0.5%Be, cuyas propiedades han sido estudiadas en trabajos anteriores (Mir, 2005; Montecinos et al. 2005; Marivil, 2007) Las temperaturas críticas del material se listan en la Tabla 2.1, de acuerdo con lo informado por el fabricante.

Tabla 2.1 : Temperaturas críticas de la aleación empleada

Temperatura Crítica	Valor [°C]
A _f	2
A _s	-20
M _s	-18
M _f	-47

Salvo en zonas de temperaturas extremas, las estructuras civiles operan en rangos de temperatura que están por sobre A_s (y, comúnmente, sobre A_f). En consecuencia, la aleación en estudio se considera apta para trabajar en forma superelástica al mantenerse en fase austenítica para casi todo su rango térmico de operación.

Capítulo 3: Modelo de Cables de SMA

3.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es detallar el modelo computacional empleado para calcular el comportamiento esperado de cables sometidos a cargas axisimétricas. Para ello, primero se define en forma general lo que se entiende por un cable. Luego, se resume el trabajo de Gysling (2008) explicando en forma detallada el modelo matemático de la geometría de un cable, las ecuaciones que rigen su comportamiento bajo cargas axisimétricas y el modelo discreto empleado para resolverlas. Finalmente, se analiza la modelación e implementación de una ley constitutiva para materiales con memoria de forma (Motahari & Ghassemieh, 2007) aplicable al modelo de cables descrito.

3.2. Definición y Descripción General de un Cable

Un cable consiste en un conjunto de elementos continuos en toda su longitud, organizados en forma jerárquica (Figura 3-1) y contruidos a partir de alambres que pueden tener distintos diámetros entre sí. Usualmente, los cables se conforman a partir de un conjunto de alambres dispuestos en forma helicoidal conocido como *torón*. A su vez, los torones se entrelazan en forma helicoidal en torno a un núcleo para conformar el cable. El material del núcleo varía de acuerdo al uso que se le quiera dar al cable.

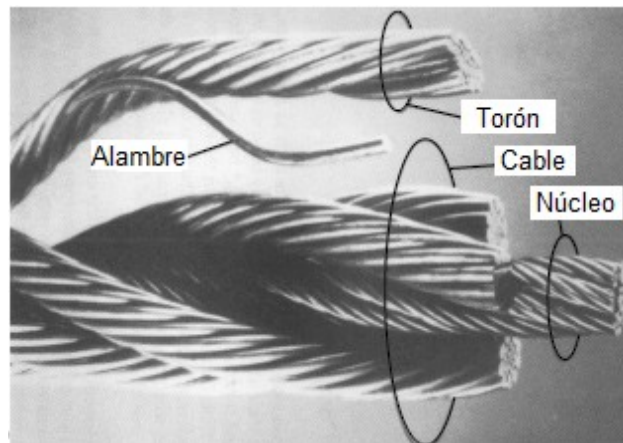


Figura 3-1 : Elementos de un cable (Costello, 1998)

El sentido en que se entrelazan los elementos se conoce como *arreglo*. Los torones pueden ir orientados hacia la izquierda o hacia la derecha (arreglo izquierdo o arreglo derecho). A su vez, la disposición en forma de hélice de los alambres de un torón puede ir en el sentido opuesto al arreglo del cable (arreglo regular), en el mismo sentido (arreglo contrario) o en forma alternada (arreglo alternado). El número de alambres por torón, la disposición de éstos y el tipo de arreglo a utilizar deben determinarse según el uso que tendrá el elemento.

Los cables se distinguen del resto de los elementos estructurales por poseer una resistencia y rigidez en su dirección axial similar a los que tendría una barra rígida. Sin embargo, son livianos y poseen una baja rigidez a la flexión y a la torsión, lo que facilita su manipulación y transporte.

3.2.1. Organización de los Elementos

Los elementos de un cable se pueden ordenar en *niveles* y *capas*. Un *nivel* se define como una estructura central con elementos enrollados en torno a él y se refiere a la jerarquía de los elementos dentro del cable, definiendo como nivel 1 al cable mismo. A modo de ejemplo, se analiza el cable que se muestra en la Figura 3-2. En este caso, el nivel 1 corresponde al cable mismo y sus elementos corresponden a los torones que se enrollan helicoidalmente en torno al núcleo. El nivel 2 está conformado por los torones y sus elementos son los alambres enrollados en torno al núcleo de ellos. Como los alambres no se conforman de otros elementos enrollados helicoidalmente, se dice que el cable tiene sólo 2 niveles.

Se entiende por *capa* a un anillo de elementos que describen una hélice en torno al eje central de un nivel particular. Éstas se numeran según su cercanía al núcleo, siendo la capa 1 la que está en contacto directo con éste. Siguiendo el ejemplo anterior, en la Figura 3-3 se muestra la sección transversal de los torones del cable de la Figura 3-2. El nivel 1 (cable completo) sólo posee una capa de elementos (en este caso, torones). El nivel 2 (cada torón que compone el nivel 1) está formado por 2 capas de alambres que se enrollan en torno al núcleo del torón.

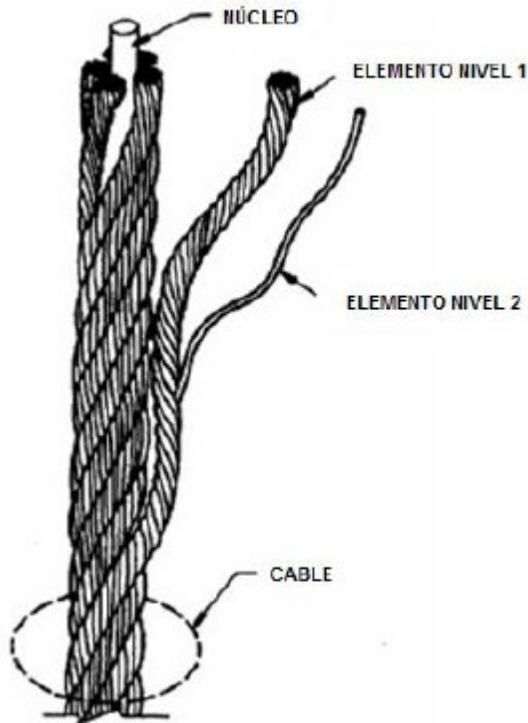


Figura 3-2 : Concepto de nivel (Gysling, 2008)

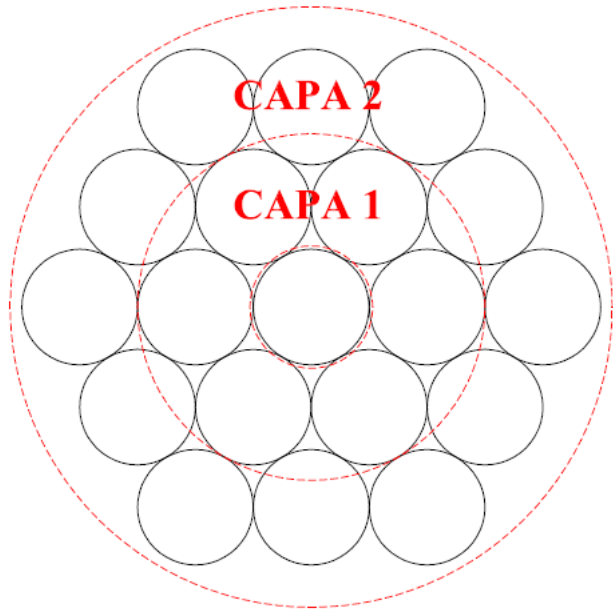


Figura 3-3 : Concepto de capa

3.3. Modelo Geométrico de un Cable

3.3.1. Parametrización Matemática de una Hélice Circular

En el trabajo de Gysling (2008) se detalla un modelo matemático de dos dimensiones para describir la geometría de un cable helicoidal. Este modelo parametriza la curva mediante el vector posición de una partícula que describe un movimiento helicoidal. La hélice es descrita por cuatro parámetros independientes, listados en la Tabla 3.1. Éstos se ilustran en la Figura 3-4, salvo el ángulo de crecimiento ϕ , que no se incluye por problemas de perspectiva (Para mayor claridad en este parámetro, ver la Figura 3-5, que muestra una hélice que da 3 vueltas en torno a su eje, con valores de ϕ entre 0 y 6π)

Tabla 3.1 : Parámetros de una hélice circular

Parámetro	Símbolo
Radio de la hélice	R
Longitud	L
Paso	p
Ángulo de crecimiento	ϕ

Se define además el ángulo θ como el ángulo que se forma entre el eje longitudinal del cable y el eje axial de los elementos que lo conforman. Dicho ángulo se conoce como *ángulo de la hélice*, y su valor se puede calcular como:

$$\theta = \arctg\left(\frac{2\pi R}{p}\right) \quad (3.1)$$

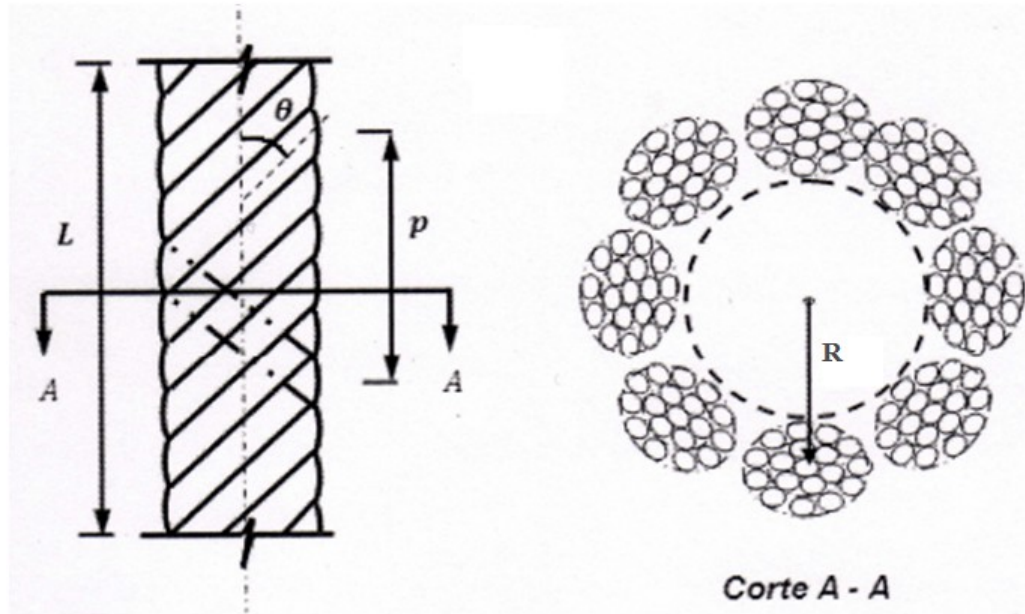


Figura 3-4 : Parámetros que describen la geometría de un cable (Gysling, 2008).

Por simplicidad, en adelante se estudiará el cable como si fuera de un solo nivel, es decir, como alambres enrollados en torno a un eje central.

Una hélice circular puede parametrizarse como una función $\vec{u}(\phi) = (x(\phi), y(\phi), z(\phi))$ en coordenadas cartesianas como:

$$x(\phi) = R \cdot \cos(\phi) \quad (3.2)$$

$$y(\phi) = R \cdot \text{sen}(\phi) \quad (3.3)$$

$$z(\phi) = \frac{p\phi}{2\pi} \quad (3.4)$$

La Figura 3-5 muestra un ejemplo de esta parametrización para una hélice de radio $R = 2$ y paso $p = 3$, para valores de ϕ entre 0 y 6π .

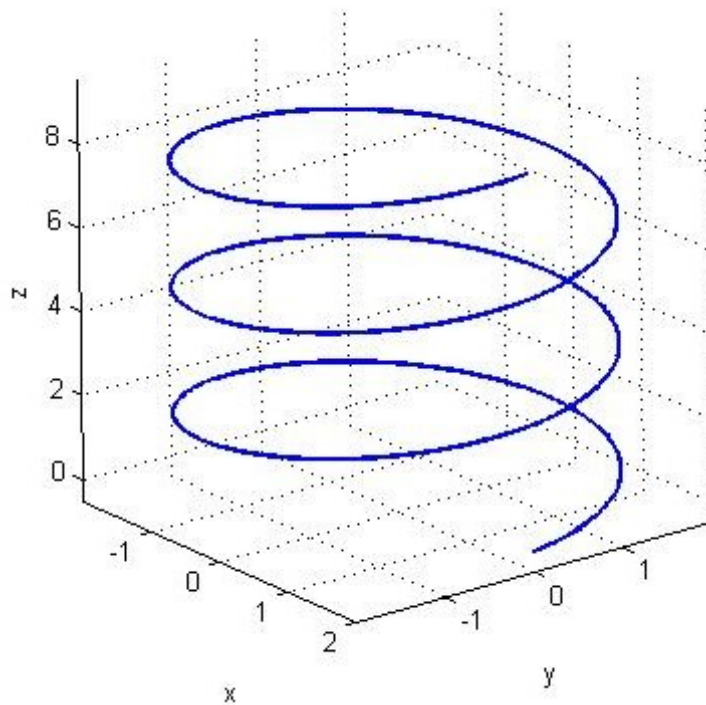


Figura 3-5 : Parametrización de hélice circular

3.3.2. Sistema de Coordenadas Locales

Resulta práctico utilizar un sistema de coordenadas local para describir el cable. Este tipo de sistema de coordenadas consiste en tres vectores unitarios, perpendiculares entre sí, que siguen en todo momento a la curva. El sistema queda definido por un vector tangente a la curva, y dos vectores normales a éste y perpendiculares entre sí, denominados vector normal y binormal (Figura 3-6).

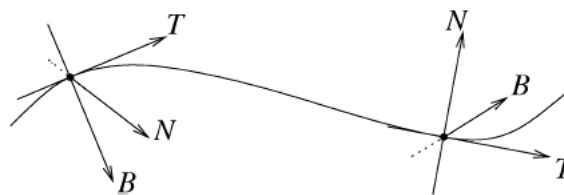


Figura 3-6 : Sistema local de coordenadas. Vectores tangente (T), normal (N) y binormal (B)

(Álvarez et al., 2005)

Antes de definir matemáticamente los vectores que determinan el sistema local, es necesario establecer una parametrización de la curva en función de su *longitud de arco*. Ésta corresponde a la distancia recorrida por una partícula que se mueve a lo largo de la curva entre dos puntos de ella.

Se define la longitud de arco s entre dos puntos de una curva en el espacio como:

$$s(\phi) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \|u(\phi)\| d\phi = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\phi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\phi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\phi}\right)^2} d\phi \quad (3.5)$$

donde ϕ_1 y ϕ_2 corresponden a los puntos inicial y final de la parametrización.

Para el caso particular de la hélice circular se tiene que la longitud de arco, medida desde el origen, resulta:

$$s(\phi) = \phi \sqrt{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2} \quad (3.6)$$

Si se expresan las ecuaciones (3.2) a (3.4) como función de la longitud de arco s resulta:

$$x(s) = R \cdot \cos\left(\frac{s}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2}}\right) \quad (3.7)$$

$$y(s) = R \cdot \text{sen}\left(\frac{s}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2}}\right) \quad (3.8)$$

$$z(s) = \frac{ps}{2\pi \sqrt{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2}} \quad (3.9)$$

Al vector $\vec{u}(s) = (x(s), y(s), z(s))$ se le conoce como *parametrización natural* o *en longitud de arco* de la curva.

Empleando la notación utilizada por Gysling, los vectores unitarios tangente, normal y binormal se denotan como \hat{x}_1 , \hat{x}_2 , y \hat{x}_3 respectivamente.

El vector unitario tangente a la curva en el punto $u(s)$ se define matemáticamente como:

$$\hat{x}_1(s) = \frac{d\vec{u}(s)}{ds} \quad (3.10)$$

El vector unitario normal a la curva en el punto $u(s)$ se define matemáticamente como:

$$\hat{x}_2(s) = \frac{\frac{d\hat{x}_1(s)}{ds}}{\left\| \frac{d\hat{x}_1(s)}{ds} \right\|} \quad (3.11)$$

El vector unitario binormal a la curva en el punto $u(s)$ se define matemáticamente como:

$$\hat{x}_3(s) = \hat{x}_1(s) \times \hat{x}_2(s) \quad (3.12)$$

3.3.3. Curvatura y Torsión

El concepto de curvatura está asociado a la variación del vector tangente a lo largo de la curva (Figura 3-7). Una tasa de cambio leve implica una baja curvatura de la curva, mientras que cambios abruptos en el recorrido del vector tangente significan una curvatura mayor.

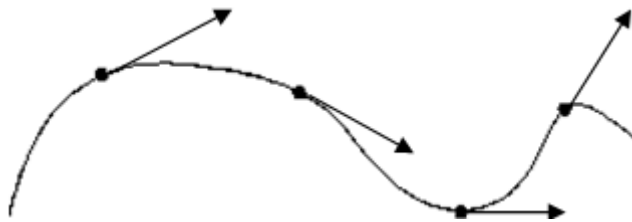


Figura 3-7 : Curvatura y variación del vector tangente

Matemáticamente, la curvatura en el punto $u(s)$ se define como:

$$\kappa(s) = \left\| \frac{d\hat{x}_1}{ds}(s) \right\| \quad (3.13)$$

El inverso de la curvatura en el punto $u(s)$ se conoce como *radio de curvatura* y se define como:

$$\rho(s) = \frac{1}{\kappa(s)} \quad (3.14)$$

Aplicando lo anterior para una hélice circular, se tiene que:

$$\kappa = \frac{R}{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2} \quad (3.15)$$

O bien:

$$\kappa = \frac{\text{sen}^2(\theta)}{R} \quad (3.16)$$

Análogamente, la torsión de la curva corresponde a la variación del vector binormal y se define matemáticamente como:

$$\tau(s) = -\hat{x}_2 \cdot \frac{d\hat{x}_3}{ds} \quad (3.17)$$

Que para el caso de la hélice en estudio resulta:

$$\tau = \frac{\frac{p}{2\pi}}{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2} \quad (3.18)$$

O bien:

$$\tau = \frac{\text{sen}(\theta)\cos(\theta)}{R} \quad (3.19)$$

Dividiendo la ecuación (3.16) por la (3.19) se obtiene:

$$\theta = \text{arctg} \left(\frac{\kappa}{\tau} \right) \quad (3.20)$$

3.4. Relaciones de Deformación

Como ya se mencionó, un cable se compone de múltiples elementos ordenados en forma jerárquica, siendo el alambre la unidad básica de esta configuración. En consecuencia, al ser sometido a cargas axisimétricas, la deformación que sufre cada elemento es distinta a la exhibida por el cable en forma global. Por ello, es necesario identificar la deformación de un elemento y relacionarla con el comportamiento general del cable.

3.4.1. Hipótesis Generales

- i) Las secciones que son planas antes de la deformación, permanecen planas después de ésta
- ii) La geometría de un elemento del cable puede describirse como una hélice circular antes y después de la deformación
- iii) El cable es sometido a cargas axisimétricas

3.4.2. Deformación Global del Cable

El cable, en forma global, experimenta dos tipos de deformaciones: Deformación axial (ε) y rotación por unidad de longitud (φ). Éstas se definen matemáticamente como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L' - L_0}{L_0} \quad (3.21)$$

$$\varphi = \frac{\psi}{L_0} \quad (3.22)$$

donde:

L_0 : Longitud axial inicial del cable

L' : Longitud axial del cable en su posición deformada

ψ : Rotación, en radianes, de la posición deformada del cable en una longitud L_0

En lo que sigue, se analizará un segmento de cable de largo p_0 igual al paso de la hélice, que ha sido sometido a un desplazamiento axial δ . La Figura 3-8 grafica esta situación. En ella, la línea EF corresponde al eje central de un elemento del cable en su posición original, mientras que la línea EF' corresponde al mismo elemento en su posición deformada.

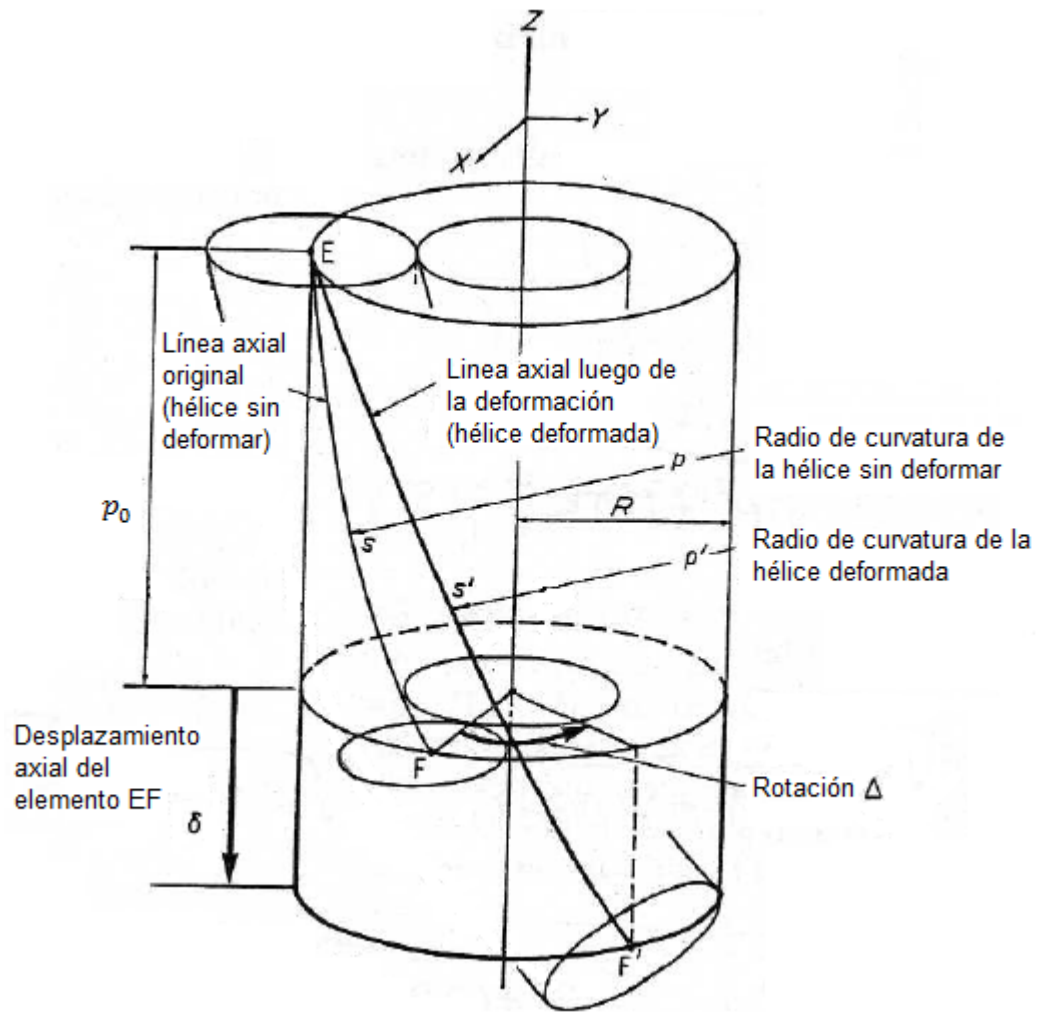


Figura 3-8 : Desplazamiento de un elemento (Machida & Durelli, 1973)

donde:

p_0 : Paso de la hélice en su posición no deformada

δ : Desplazamiento longitudinal del cable

Δ : Rotación, en radianes, de la posición deformada del cable en una longitud p_0

Para este segmento, la deformación axial será:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{p_0} \quad (3.23)$$

Y la rotación por unidad de largo está dada por:

$$\varphi = \frac{\Delta}{p_0} \quad (3.24)$$

Usualmente, se trabaja con la rotación normalizada:

$$\gamma = \frac{\Delta}{2\pi} \quad (3.25)$$

En adelante, el subíndice 0 indicará el valor del parámetro geométrico en su posición no deformada, mientras que los parámetros evaluados en su posición deformada irán seguidos de una comilla simple ('). Por ejemplo, R_0 y R' denotan el radio de la hélice en su posición original y deformada respectivamente.

Por otra parte, despejando 2π de las ecuaciones (3.1) y (3.25), por transitividad se tiene:

$$\gamma = \varphi \cdot R_0 \cdot \frac{\cos(\theta_0)}{\sen(\theta_0)} \quad (3.26)$$

3.4.3. Deformación Axial de los Elementos

La deformación axial que sufren los elementos se puede separar en los siguientes componentes, según su causa: deformación axial debido a un esfuerzo axial, debido a un cambio en la curvatura de la curva y debido a un cambio en la torsión de la curva. A continuación, se analizan los tres casos y se presenta el valor de la deformación correspondiente. El detalle de los cálculos puede consultarse en las referencias correspondientes (Machida & Durelli, 1973; Knapp, 1979; Gysling, 2008).

3.4.3.1. Deformación Axial Debido a un Esfuerzo Axial

La deformación axial debido a un esfuerzo axial, para un elemento i (ε_a^i), corresponde a la variación en el largo de su longitud de arco y será igual para toda la sección del elemento, de esta forma:

$$\varepsilon_a^i(s_0, s') = \frac{s' - s_0}{s_0} \quad (3.27)$$

Reemplazando la longitud de arco por la ecuación (3.6) y empleando las ecuaciones de deformación global (3.23) a (3.25):

$$s_0 = \frac{L}{p_0} \sqrt{p_0^2 + (2\pi R_0)^2} \quad (3.28)$$

$$s' = \frac{L}{p_0} \sqrt{(p_0 + \delta)^2 + ((2\pi + \Delta)R')^2} \quad (3.29)$$

Luego, es posible expresar la deformación debido a esfuerzo axial en términos de la deformación general del cable como:

$$\varepsilon_a^i(\varepsilon, \gamma) = \sqrt{(1 + \varepsilon)^2 \cos^2(\theta_0) + \beta(1 + \gamma)^2 \sin^2(\theta_0)} - 1 \quad (3.30)$$

donde

$$\beta = \frac{R'}{R_0} \quad (3.31)$$

Se debe notar que la naturaleza no lineal de la deformación axial de un elemento respecto a la deformación global que sufre el cable, representada en la ecuación (3.30), se origina exclusivamente en la geometría del cable.

3.4.3.2. Deformaciones Debido a Cambios en la Curvatura y Torsión

Al pasar de la configuración original a la posición deformada, los elementos del cable describen una hélice distinta a la inicial, ocasionando un cambio en la curvatura de la curva. Este cambio de curvatura induce flexión en los elementos y, por lo tanto, una deformación axial variable en la sección (ε_f^i).

La Figura 3-9 muestra un segmento infinitesimal de un elemento sometido a un cambio de curvatura (marcado con color en la figura). El eje O – O corresponde al eje neutro. Interesa estudiar la deformación de la fibra m – n respecto de la fibra del eje neutro e – f. La longitud de la fibra e – f corresponde al diferencial de la longitud de arco ds y se puede calcular como:

$$ds = \rho d\alpha \quad (3.32)$$

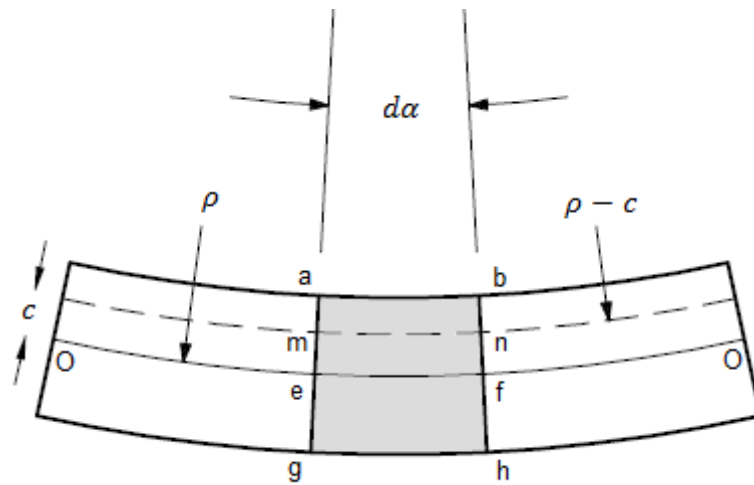


Figura 3-9 : Deformación axial por cambio de curvatura (Popov, 2000)

luego,

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{\rho} = \kappa \quad (3.33)$$

La diferencia entre el largo de las fibras m – n y e – f será:

$$dl = (\rho - c)d\alpha - \rho d\alpha = -c \cdot d\alpha \quad (3.34)$$

Dividiendo por ds y, suponiendo que las deformaciones son pequeñas, aproximando dl a du y ds a dx , se llega a:

$$\varepsilon_f = -c \cdot \kappa \quad (3.35)$$

Para el caso de la hélice en su posición deformada, se tiene que la deformación axial debido al cambio de curvatura respecto de la posición no deformada está dada por:

$$\varepsilon_f^i = -c \cdot (\kappa' - \kappa_0) \quad (3.36)$$

El paso de la hélice en su posición deformada puede ser escrito en términos del paso original y la deformación axial y rotación globales:

$$p' = (p_0 + \delta) \left(\frac{2\pi}{2\pi + \Delta} \right) = p \frac{1 + \varepsilon}{1 + \gamma} \quad (3.37)$$

Reemplazando la ecuación anterior, así como las ecuaciones de curvatura para la hélice circular (3.15) y (3.16) en la ecuación (3.36) se llega a:

$$\varepsilon_f^i(\varepsilon, \gamma) = c \cdot \frac{\text{sen}^2(\theta_0)}{R_0} \cdot \left[\frac{\beta(1 + \gamma)^2}{\beta^2(1 + \gamma)^2 \text{sen}^2(\theta_0) + (1 + \varepsilon)^2 \text{cos}^2(\theta_0)} - 1 \right] \quad (3.38)$$

Análogo a lo visto para la deformación axial debido a un cambio en la torsión, la distorsión angular debido a cambios en la torsión de la curva se puede calcular como:

$$\gamma_t^i = \bar{c} \cdot (\tau' - \tau_0) \quad (3.39)$$

La distorsión angular varía según la distancia al centro de la sección, por lo que \bar{c} corresponde al radio donde se desea evaluar dicha deformación (válido sólo para secciones circulares). En términos de las deformaciones globales, la distorsión angular puede calcularse como:

$$\gamma_t^i(\varepsilon, \gamma) = \bar{c} \cdot \frac{\text{sen}(\theta_0) \cdot \text{cos}(\theta_0)}{R_0} \cdot \left[\frac{(1 + \varepsilon)(1 + \gamma)}{\beta^2(1 + \gamma)^2 \text{sen}^2(\theta_0) + (1 + \varepsilon)^2 \text{cos}^2(\theta_0)} - 1 \right] \quad (3.40)$$

3.5. Análisis Seccional

A continuación se describe la forma en que se relacionan las deformaciones globales aplicadas al cable con las fuerzas que éstas inducen. Para ello, se requiere modelar el comportamiento de una sección transversal arbitraria del cable en estudio. En el trabajo de Gysling (2008) se evaluaron seis modelos diferentes de análisis seccional. En él se comprobó que cuando el cable se encuentra empotrado en ambos extremos, los distintos modelos entregan resultados casi idénticos. En consecuencia, para esta investigación sólo se considerará el modelo de fibra, que corresponde al más simple de todos.

El modelo linealiza la geometría del cable, de modo que la relación entre fuerza y deformación del cable sujeto a cargas axisimétricas puede expresarse, de manera incremental, de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} \Delta F \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_\varepsilon & F_\varphi \\ M_\varepsilon & M_\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta \varphi \end{Bmatrix} \quad (3.41)$$

En esta formulación, los incrementos de fuerza (ΔF y ΔM , desconocidos) se relacionan con los incrementos en la deformación global del cable ($\Delta\varepsilon$ y $\Delta\varphi$, conocidos) a través de la matriz de rigidez tangente $[K_T]$, definida como:

$$[K_T] \equiv \begin{bmatrix} F_\varepsilon & F_\varphi \\ M_\varepsilon & M_\varphi \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Donde F_ε , F_φ , M_ε y M_φ corresponden a los coeficientes de rigidez de fuerza y momento debido a la deformación axial y a la rotación respectivamente. La matriz de rigidez tangente se calcula a partir del módulo de elasticidad tangente asociado a cada incremento en la deformación.

3.5.1. Modelo de Fibra

Este modelo es el más simple de todos ya que considera únicamente la rigidez axial de los elementos del cable y la rigidez a la torsión del núcleo. Fue derivado por Knapp (1979) para un núcleo rígido y no considera variaciones en el radio de los elementos debido al efecto Poisson. Pese a sus limitaciones, el trabajo de Gysling (2008) muestra que, para casos donde los extremos del cable están impedidos de girar, los resultados no presentan mayores diferencias con el resto de los modelos. Como todos los ensayos de este estudio corresponden a cables empotrados, se eligió este modelo debido a su simplicidad.

Si se suponen pequeñas deformaciones, es posible despreciar los términos cuadráticos de la ecuación (3.30), de modo que:

$$(1 + \varepsilon)^2 \approx 1 + 2\varepsilon \quad (3.43)$$

$$(1 + \gamma)^2 \approx 1 + 2\gamma \quad (3.44)$$

$$(1 + \varepsilon_a^i)^2 \approx 1 + 2\varepsilon_a^i \quad (3.45)$$

Como el modelo no considera reducción del radio del núcleo, se tiene que $\beta = 1$ por lo que la ecuación (3.30) resulta:

$$\varepsilon_a^i(\varepsilon, \gamma) = \varepsilon \cdot \cos^2(\theta_0) + \gamma \cdot \sen^2(\theta_0) \quad (3.46)$$

Expresando lo anterior en términos de la rotación por unidad de largo:

$$\varepsilon_a^i(\varepsilon, \gamma) = \varepsilon \cdot \cos^2(\theta_0) + \varphi \cdot R_0 \cdot \cos(\theta_0) \cdot \sen(\theta_0) \quad (3.47)$$

A continuación se calculan los coeficientes de la matriz de rigidez tangente $[K_T]$. Para ello, la tensión axial de un elemento i del cable se denomina como T_a^i . Debido a la geometría helicoidal del cable, dicha tensión apunta en el sentido de trenzado del cable. Como interesa la rigidez axial del cable en su conjunto, se requiere proyectar la tensión de cada elemento sobre el eje del cable. Esta proyección se denomina F_i' y se calcula como:

$$F_i' = T_a^i \cdot \cos(\theta_0) \quad (3.48)$$

El momento torsor generado por T_a^i es:

$$M_i' = T_a^i \cdot \sen(\theta_0) \cdot R_0 \quad (3.49)$$

Además se tiene que:

$$T_a^i = E_i \cdot \varepsilon_a^i \cdot A_i \quad (3.50)$$

Donde E_i y A_i corresponden al módulo de elasticidad tangente en el incremento de deformación determinado y al área del elemento i , respectivamente.

Finalmente, se tiene que, para un incremento en la deformación global del cable, los coeficientes de rigidez de la matriz $[K_T]$ están dados por la suma de las fuerzas F_i' y momentos M_i' . De esta forma, empleando las ecuaciones (3.47) a (3.50) e incorporando la rigidez a torsión del núcleo, se llega a:

$$F_\varepsilon = (AE)_c + \sum_i (AE)_i \cdot \cos^3(\theta_0) \quad (3.51)$$

$$F_\varphi = M_\varepsilon = \sum_i (AE)_i \cdot R_0 \cdot \cos^2(\theta_0) \cdot \sen(\theta_0) \quad (3.52)$$

$$M_\varphi = (GJ)_c + \sum_i (AE)_i \cdot R_0^2 \cdot \cos(\theta_0) \cdot \sen^2(\theta_0) \quad (3.53)$$

3.6. Modelo de Ley Constitutiva

Dentro de diversos modelos de ley constitutiva para materiales SMA (enunciados en el capítulo 1), los más simples proponen linealizar las curvas esfuerzo – deformación, separando el ciclo de histéresis en cuatro tramos lineales según la fase en que se encuentre el material. En particular, el modelo propuesto por Motahari y Gassemieh (2007) destaca por representar los cambios de fase del material (respuesta pseudoelástica, parcialmente pseudoelástica, maclado, respuesta bajo condiciones adiabáticas y ciclos de carga y descarga aún cuando no se alcanza a cambiar completamente de fase) y por ser un modelo relativamente fácil de implementar computacionalmente.

La ley constitutiva implementada por el modelo numérico corresponde al originalmente propuesto por Motahari y Ghassemieh (2007), para cuando el material se encuentra en un rango de temperatura tal que exhibe un comportamiento superelástico. Suponiendo, que al inicio de cada ciclo, el material siempre se encuentra en fase austenítica y, por lo tanto, exhibiendo un comportamiento superelástico, la ley constitutiva de la aleación queda definida por los cinco puntos indicados en la Figura 3-10.

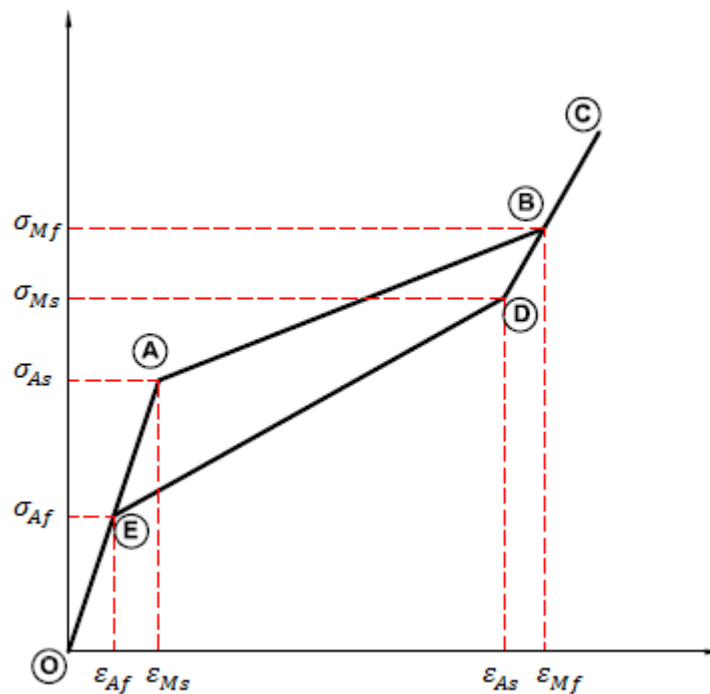


Figura 3-10: Modelo multilínea para SMA en rango superelástico (Gysling, 2008)

donde:

σ_{Ms} : Esfuerzo de transformación que da inicio a la SIM, la austenita comienza a transformarse en martensita.

σ_{Mf} : Tensión final de la fase martensítica.

σ_{As} : Esfuerzo de transformación que da inicio a la SIM inversa, donde la martensita comienza a transformarse en austenita.

σ_{Af} : Tensión final de la fase austenítica.

De acuerdo con la Figura 3-10, la trayectoria de tensiones que seguiría un elemento de material SMA sometido a un ciclo de deformaciones que va desde 0 hasta ε_{Mf} sería pasando por los puntos: O-A-B-D-E-O. Sin embargo, si la descarga ocurre antes del término de la transformación martensítica o se vuelve a cargar antes del término de la SIM inversa, la rigidez del material será distinta a aquella que se tenía en la fase austenítica (tramo O-A) o martensítica (tramo B-D), respectivamente. Esta situación está graficada en la Figura 3-11, en ella se considera que el módulo de elasticidad E_m será un promedio entre la de los tramos austenítico (E_A) y martensítico (E_M), ponderada por el porcentaje de transformación de fase que se ha llevado a cabo.

De esta forma:

$$E_m = \frac{E_M \cdot E_A}{x(E_A - E_M) + E_M} \quad (3.54)$$

donde, para la descarga:

$$x = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{Ms}}{\varepsilon_{Mf} - \varepsilon_{Ms}} \quad (3.55)$$

y para la recarga:

$$x = \frac{\varepsilon_{min} - \varepsilon_{Af}}{\varepsilon_{As} - \varepsilon_{Af}} \quad (3.56)$$

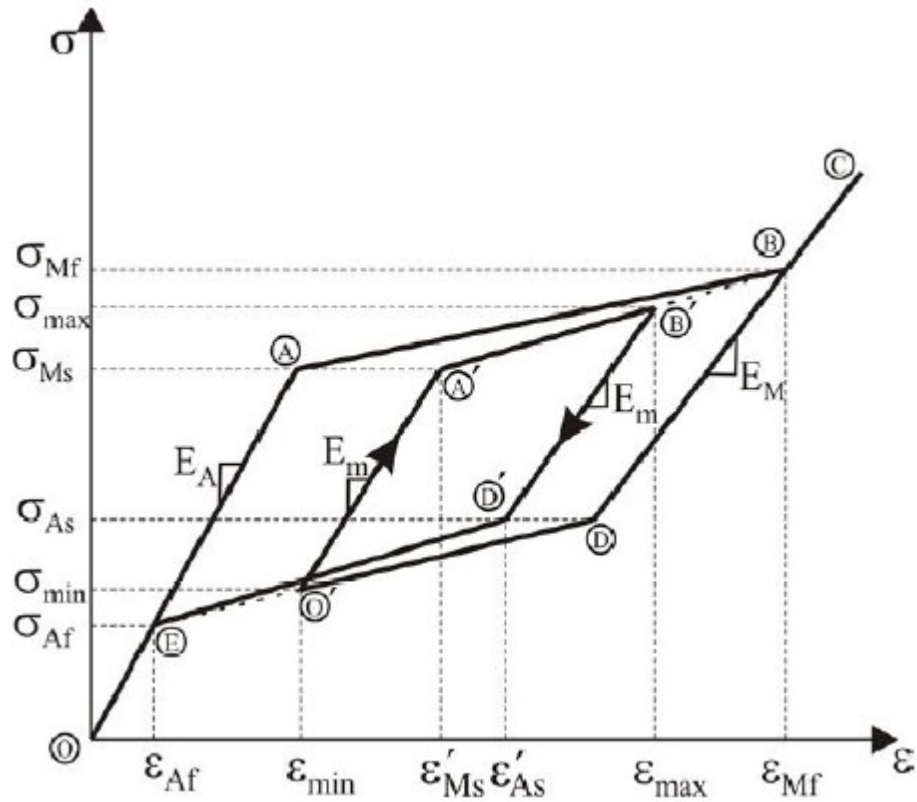


Figura 3-11 : Sub-ciclos (Motahari & Ghassemieh, 2007)

Así, los valores para las deformaciones críticas (donde ocurre un cambio de pendiente) resultan:

$$\epsilon'_{Ms} = \epsilon_{min} + \frac{\sigma_{Ms} - \sigma_{min}}{E_m} \quad (3.57)$$

$$\epsilon'_{As} = \epsilon_{max} + \frac{\sigma_{As} - \sigma_{max}}{E_m} \quad (3.58)$$

3.7. Deformaciones Remanentes

Se incorporó en el modelo numérico la capacidad de predecir deformaciones remanentes. Para ello, el usuario debe especificar la tasa de deformación remanente η como porcentaje de la deformación máxima alcanzada en cada ciclo. De esta forma, la deformación remanente relativa δ_ϵ (ver definiciones al inicio del capítulo 5) luego de cada ciclo queda dada por:

$$\delta_{\epsilon_i} = \eta_i \cdot \epsilon_{max_i} \quad (3.59)$$

donde:

δ_{ε_i} : Deformación remanente, relativa al ciclo i

η_i : Tasa de deformación remanente para el ciclo i (especificada por el usuario).

ε_{max_i} : Deformación máxima del ciclo i

Por simplicidad, se considera que la ley constitutiva es desplazada luego de cada ciclo de acuerdo al valor de la deformación remanente. De esta forma, las deformaciones características de la ley constitutiva ε_{Af} , ε_{Ms} , ε_{As} y ε_{Mf} luego de cada ciclo resultan:

$$\tilde{\varepsilon}_{x_i} = \varepsilon_x + \varepsilon_{R_i} \quad (3.60)$$

con

$$\varepsilon_{R_i} = \sum_{k=1}^i \delta_{\varepsilon_k} \quad (3.61)$$

donde:

ε_x : Deformación característica sin desplazar

$\tilde{\varepsilon}_{x_i}$: Deformación característica desplazada para el ciclo i

ε_{R_i} : Deformación remanente acumulada hasta el ciclo i

Para la asignación del módulo de elasticidad se tienen 3 escenarios posibles, ilustrados junto a la ley constitutiva en la Figura 3-12. El primer caso (Figura 3-12b) corresponde cuando la descarga del ciclo en estudio se realiza antes de alcanzar la deformación ε_{Ms} . En este caso no quedan deformaciones remanentes y la trayectoria de tensiones sigue el tramo lineal – elástico y, para todo el rango de deformaciones, se asigna al elemento el módulo de elasticidad E_A .

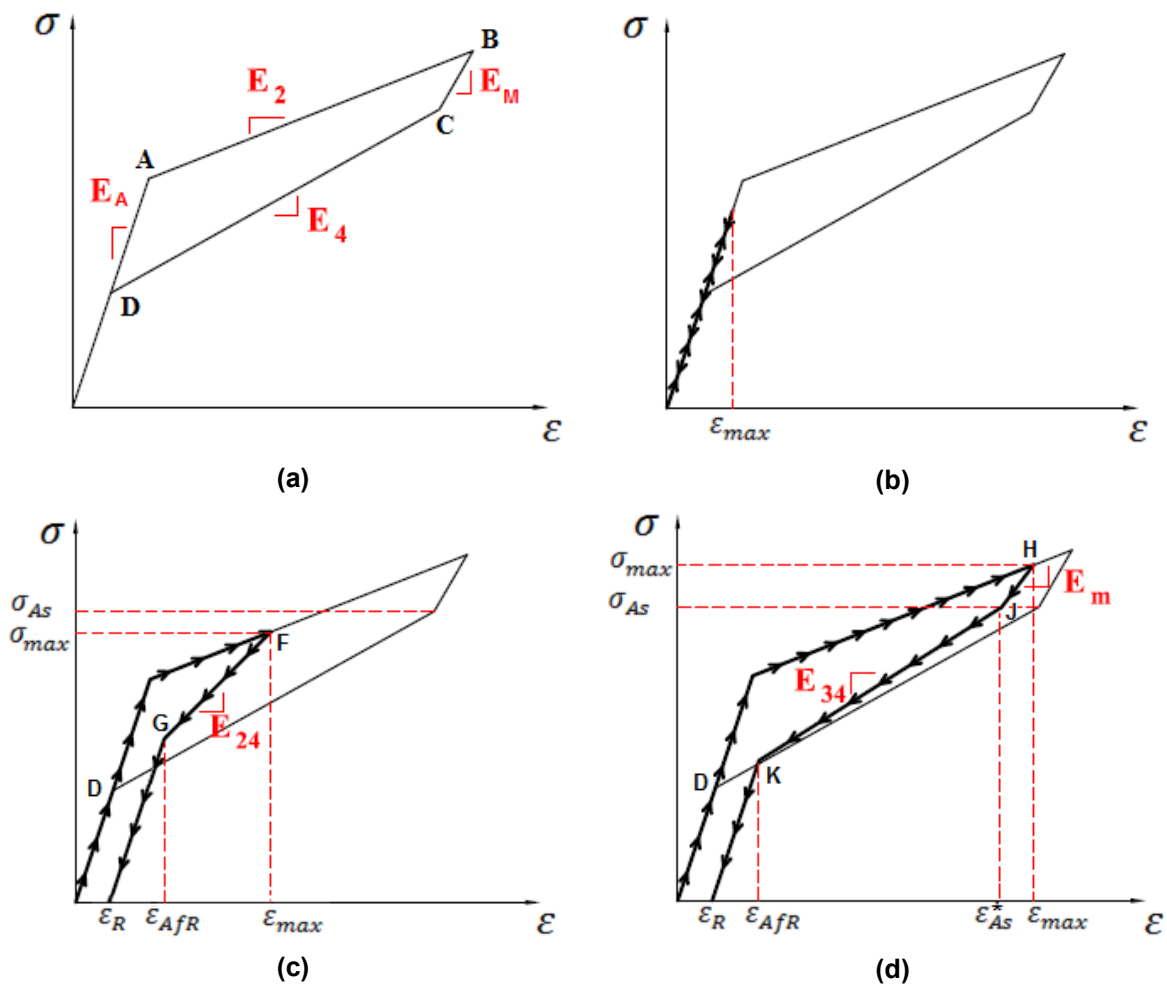


Figura 3-12 : Asignación del módulo de elasticidad cuando existen deformaciones remanentes

El segundo caso (Figura 3-12c) corresponde cuando se ha superado la deformación que da inicio a la transformación martensítica ε_{Ms} , por lo que hay un cambio en la rigidez. Sin embargo, la descarga ocurre antes que la tensión en la probeta haya alcanzado el valor de σ_{As} . De esta forma, se tiene que para deformaciones crecientes, antes de alcanzar ε_{Ms} al elemento se le asigna E_A como módulo de elasticidad. Una vez sobrepasado este límite, y hasta llegar a ε_{max} , se asigna el valor correspondiente a E_2 . Para la descarga, como la tensión en la probeta es menor a σ_{As} , la trayectoria de tensiones sigue una recta que va desde el punto de descarga al punto D de la Figura 3-12a. Sin embargo, en vez de llegar al punto D, la trayectoria de tensiones vuelve al tramo lineal – elástico producto de las deformaciones remanentes. La pendiente E_{24} de la recta de descarga y la deformación en el punto de intersección ε_{Afr} se calculan empleando geometría analítica básica, resultando:

$$E_{24} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{Af}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{Af}} \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_{AfR} = \frac{E_A \cdot \varepsilon_R + \sigma_{Af} - E_{24} \cdot \tilde{\varepsilon}_{Af}}{E_A - E_{24}} \quad (3.63)$$

con:

$$\sigma_{max} = \sigma_{Mf} - E_2 \cdot (\tilde{\varepsilon}_{Mf} - \varepsilon_{max}) \quad (3.64)$$

El tercer escenario corresponde cuando la descarga se produce para una tensión en el cable mayor a σ_{As} . En este caso, la trayectoria de tensiones sigue una recta con pendiente E_m hasta que la tensión en el cable sea igual a σ_{As} . Luego, la trayectoria continúa por la recta de pendiente E_{34} que une el punto $(\varepsilon_{As}^*, \sigma_{As})$ con el punto D de la Figura 3-12a. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, la trayectoria cambia al tramo lineal elástico antes de llegar a D producto de la deformación remanente. El cálculo de las propiedades necesarias para la asignación de la pendiente E_{34} se detalla a continuación.

$$E_{34} = \frac{\sigma_{As} - \sigma_{Af}}{\varepsilon_{As}^* - \tilde{\varepsilon}_{Af}} \quad (3.65)$$

$$\varepsilon_{As}^* = \varepsilon_{max} - \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{As})}{E_m} \quad (3.66)$$

$$\varepsilon_{AfR} = \frac{E_A \cdot \varepsilon_R + \sigma_{Af} - E_{34} \cdot \tilde{\varepsilon}_{Af}}{E_A - E_{34}} \quad (3.67)$$

σ_{max} y E_m se calculan con las ecuaciones (3.64) y (3.54) respectivamente.

Capítulo 4: Procedimiento Experimental

4.1. Introducción

Este capítulo detalla el procedimiento experimental empleado en el desarrollo de esta investigación. Se describe el tratamiento térmico aplicado al material, la fabricación de las probetas y los ensayos realizados.

Mir (2005) estudió la respuesta mecánica de alambres de CuAlBe de 0.5 mm de diámetro, sometidos a distintos tratamientos térmicos para obtener tamaños de grano de 60, 100 y 200 μm . En su investigación observó que, si bien la disipación de energía era mayor para el tamaño de grano de 200 μm , el resto de las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, rigidez secante, tensiones máximas) es significativamente menor respecto de las obtenidas para los granos de menor tamaño. Finalmente concluye que, para efectos de disipación energía, el menor tamaño de grano (60 μm) sería el más adecuado, pero que fluctuaciones en el tamaño de grano entre 60 y 100 μm no afectarían significativamente los resultados.

Para obtener el tamaño de grano óptimo (60 μm) encontrado por Mir (Mir, 2005; Marivil 2007) el material fue sometido a un tratamiento térmico de alta temperatura, seguido de un temple en agua con hielo. Mediante metalografías se verificó el tamaño de grano obtenido. Finalmente, los alambres fueron sumergidos en agua a 100°C para eliminar las posibles dislocaciones en la red cristalina del material producto del templado.

Para la fabricación de los cables se diseñó un método de trenzado de alambres empleando una fresadora. En ella se montó un set de tres discos: uno estático, uno móvil y uno de operación manual para prevenir el enredo de los alambres. Los alambres se fijan al disco estático mientras que el móvil gira y se desplaza longitudinalmente trenzando los alambres en torno al núcleo según el paso que se le quiera dar al cable. Una vez que finaliza el proceso, el cable se fija con masilla epóxica para prevenir que se destrence al ser retirado del dispositivo de fabricación.

Los cables fueron ensayados en tracción cíclica hasta alcanzar una deformación axial global del 2.0%. Cada probeta fue sometida a 20 ciclos a una velocidad de deformación de 0.1 mm/s.

4.2. Material Disponible

Se contó con 28 metros de alambre de 0.5 mm de diámetro de una aleación de composición nominal Cu-11.8%p.Al-0.5%p.Be. El material fue comprado a la empresa francesa Tréfimetaux y sus propiedades han sido estudiadas en investigaciones previas (Mir, 2005; Marivil 2007).

4.3. Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos se realizaron en el Laboratorio de Termofluidos y Procesos Mecánicos y de Manufactura del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

4.3.1. Equipo Utilizado

Para la medición del perfil térmico del horno:

- Horno Nabertherm, modelo N 21/H, de 30 x 41 cm. Con termocupla incorporada (Figura 4-18)
- Termocupla tipo K de 1 metro de largo
- Medidor de temperatura digital
- Cronómetro
- Tenazas
- Guantes resistentes a alta temperatura
- Bandeja de acero inoxidable de 24 x 35 cm y 2 mm de espesor, con bordes de 3 cm de alto
- Cilindro de acero de 5 cm de diámetro y 5 cm de alto

Para los tratamientos térmicos:

- Horno Nabertherm, modelo N 21/H, de 30 x 41 cm. Con termocupla incorporada (Figura 4-18)
- Cronómetro
- Tenazas grandes de acero
- Tenazas pequeñas tipo tijera, de acero inoxidable
- Guantes resistentes a alta temperatura
- Bandeja de acero inoxidable de 17 x 24 cm y 2 mm de espesor, con bordes de 3 cm de alto y uno de sus lados anchos sin borde
- Palangana con agua
- Hielo (1.5 kg sobre el agua, se debe ir reponiendo a medida que se derrite)
- Mini bandeja de 10 x 10 cm de ladrillo térmico tallado (sólo para tratamientos de prueba)
- Olla grande tipo cacerola de acero inoxidable
- Colador de acero inoxidable
- Cocina doméstica

Para las metalografías:

- Resina epóxica transparente para embutir en frío
- Pulidora eléctrica de disco
- Lijas al agua N° 400, 600, 1000 y 1200
- Paño con alúmina disuelta en agua destilada
- Alcohol (50 ml)
- Ácido Clorhídrico (30 ml)
- Cloruro Férrico (1.5 g)
- Secador de pelo
- Microscopio óptico con cámara digital incorporada

4.3.2. Perfil Térmico del Horno

Para garantizar un tratamiento térmico uniforme del material, se midió el perfil de temperatura de horno mediante el siguiente procedimiento:

- i) Se encendió el horno estableciendo una temperatura nominal de 700 °C. Se introdujo la bandeja de acero y, sobre ella, el cilindro. Se esperó por 2 horas para garantizar un perfil térmico estable en el horno.
- ii) Se abrió la puerta del horno y se colocó la termocupla en el lugar que se deseaba efectuar la medición. Con la tenaza, se dejó el cilindro de acero sobre la termocupla (a unos 5 cm de la punta) para evitar que ésta se moviera. Este procedimiento se efectuó lo más rápido posible, de modo que el tiempo transcurrido fuera similar al que se requiere para colocar un alambre al ser tratado térmicamente.
- iii) Se cerró la puerta del horno y se esperó por 20 segundos para simular la receta del tratamiento térmico.
- iv) Se registró la temperatura indicada por el medidor digital. Se abrió la puerta del horno y se retiró la termocupla.
- v) Se esperaron 10 minutos para que se estabilizara la temperatura y se repitió el procedimiento desde el paso (ii) hasta medir todos los puntos que se requirieron para el perfil (9).

La Figura 4-1 muestra un esquema con los 9 puntos que se midieron y los resultados obtenidos en la medición. La Figura 4-2 representa el perfil térmico del horno. En ella, el eje vertical representa la distancia a la puerta y el eje horizontal la distancia a la pared izquierda del horno. Se observa que el horno mantiene una temperatura uniforme en los dos tercios más alejados de la puerta. Debido a esta uniformidad, se optó por no emplear un recipiente de alúmina para efectuar los tratamientos térmicos.

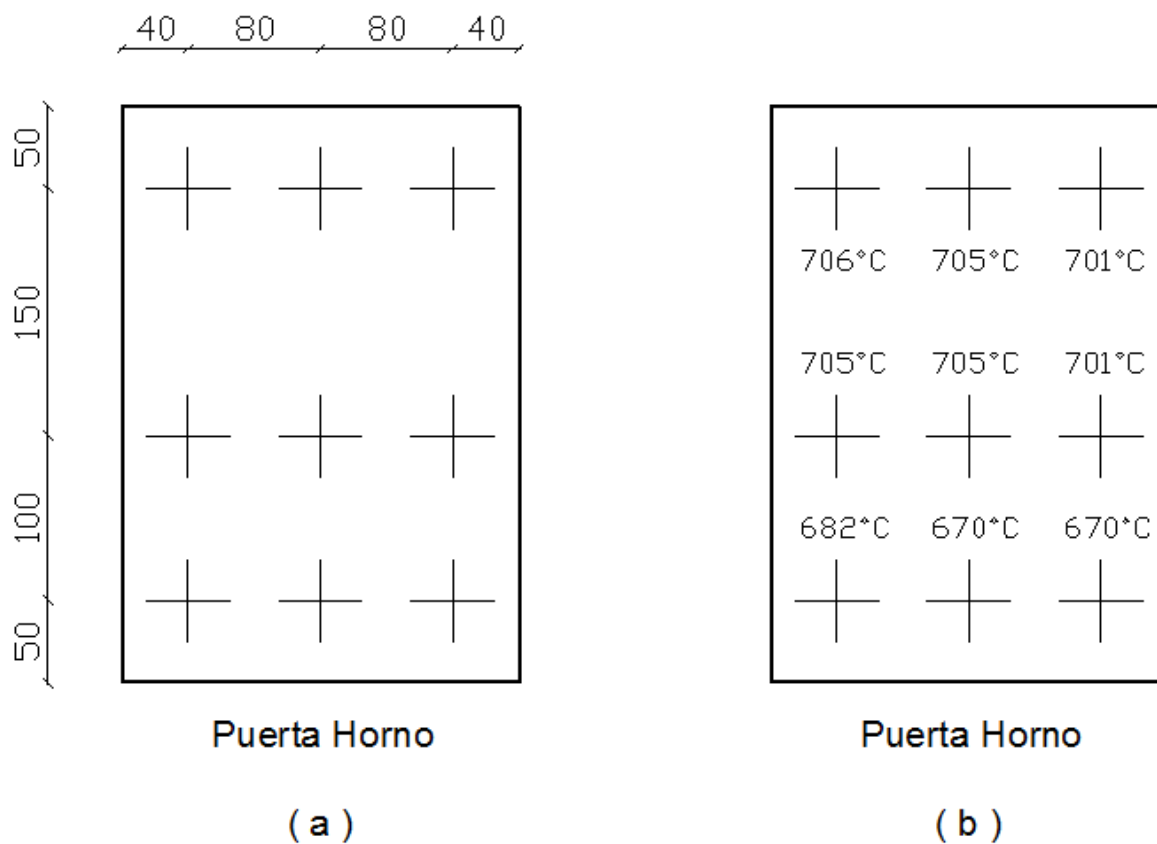


Figura 4-1 : (a) Puntos de medición y (b) resultados para el perfil térmico (dimensiones en milímetros)

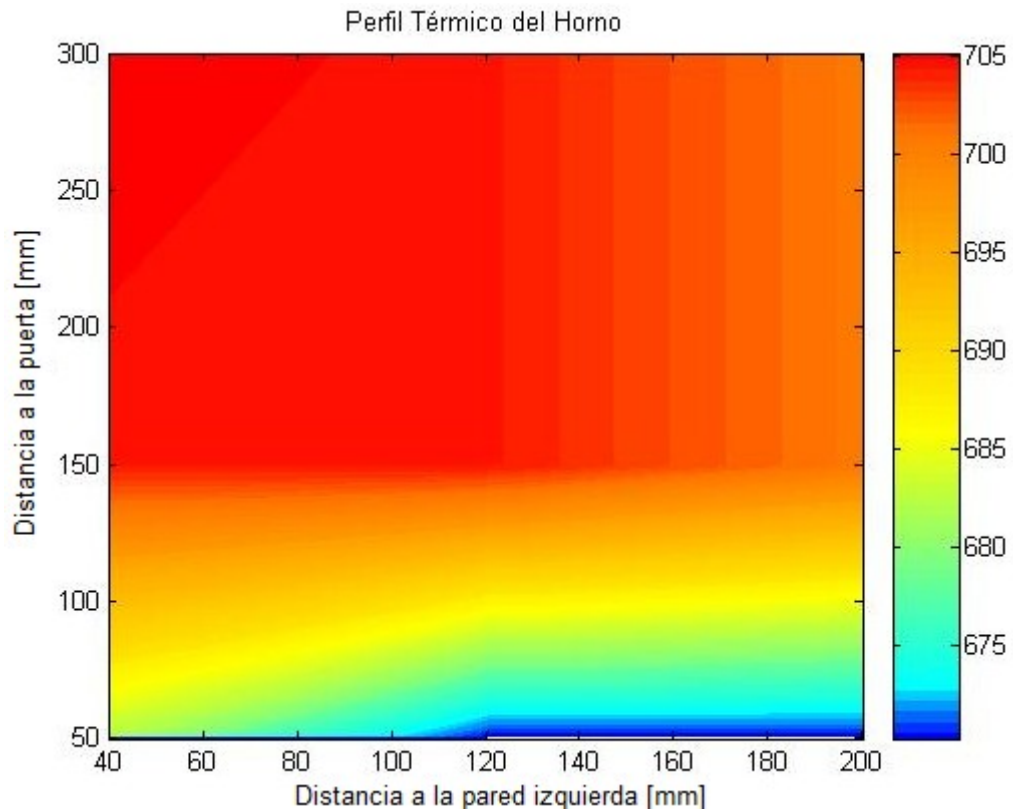


Figura 4-2 : Perfil térmico del horno

4.3.3. Tratamientos de Prueba y Metalografías

4.3.3.1. Metodología Empleada en los Tratamientos de Prueba

Para verificar la receta para obtener un tamaño de grano de 60 μm empleada en trabajos anteriores (Mir, 2005; Valdivieso, 2006; Marivil, 2007) se confeccionó una serie de 12 probetas de prueba de 2 cm de largo. Éstas fueron tratadas térmicamente con diferente tiempo de exposición al calor (0, 15, 20, 25, 30 y 35 segundos), de la manera siguiente:

- i) Se colocó la bandeja de ladrillo dentro del horno y luego éste se precalentó por 1.5 horas aproximadamente, hasta llegar a una temperatura estable de 700°C.
- ii) Se abrió la puerta del horno y, empleando las tenazas, se dejaron 2 probetas de prueba sobre la bandeja. Se dejó la bandeja nuevamente al fondo del horno (zona de temperatura estable) y se cerró la puerta.
- iii) Se dejaron las probetas en el horno por el tiempo requerido para la prueba

- iv) Una vez transcurrido el tiempo, se abrió la compuerta. Con las tenazas grandes de acero se retiró la bandeja de ladrillo y esta se vació sobre la palangana de agua con hielo
- v) Las probetas se dejaron en el agua con hielo por un minuto antes de ser retiradas y rotuladas

4.3.3.2. Metodología Empleada en las Metalografías

Luego de ser tratadas térmicamente, las probetas de prueba fueron embutidas en frío en bakelita de a pares, según su tiempo de permanencia en el horno. El embutido debe realizarse en frío para evitar distorsiones en el tamaño de grano de las probetas producto de un cambio abrupto en la temperatura. Una vez que endureció la bakelita, cada par de muestras fue rotulado con una marca en la bakelita indicando su tiempo de cocción.

Después del proceso de embutido, las muestras se pulieron en la pulidora eléctrica de disco pasándolas por una serie de lijas al agua (mallas 400, 600, 1000 y 1200) y luego pasando un paño con alúmina disuelta en agua destilada.

Finalmente, se realizó un ataque metalográfico para que los bordes de grano quedaran definidos en las metalografías. La composición del ataque fue la misma empleada en trabajos anteriores (Valdivieso, 2006) : Alcohol (50 ml), Ácido Clorhídrico (30 ml) y Cloruro Férrico (1.5 g).

4.3.3.3. Determinación del Tamaño de Grano

Para determinar el tamaño de grano se utilizó el método de la línea interceptada. Este consiste en trazar aleatoriamente numerosas rectas de una determinada longitud L conocida sobre la imagen de la metalografía en estudio. Luego, se cuenta el número n de granos interceptados por la recta, aquellos ubicados en los extremos de la recta se consideran o no dependiendo si se quiere sobreestimar o subestimar el tamaño de grano (en esta investigación sólo se consideraron si la recta cubría más del 50% de los granos extremos, o bien, se consideraba que los dos granos extremos contaban como uno solo). El tamaño de grano, para cada recta, está dado por la ecuación (4.1). Finalmente, se toma el promedio de los tamaños calculados para cada recta.

$$d_i = \frac{L_i}{n_i} \quad (4.1)$$

donde:

d_i : Tamaño de grano calculado a partir de la recta i -ésima

L_i : Recta i -ésima

n_i : Número de granos interceptados por la recta i -ésima

En este caso, se trazaron 6 rectas horizontales de 650 μm de largo para cada probeta. Como se disponía de 2 probetas por cada tiempo de cocción, se tuvieron 12 rectas para cada tiempo de prueba.

Una vez que se encontró el tiempo de recocido necesario para alcanzar un tamaño cercano a los 60 μm (20 segundos para probetas de 0.5 mm de diámetro) no fue necesario seguir calculando, por lo que sólo se listan en la Tabla 4.1 los datos obtenidos para los tiempos de 20 y 25 segundos. De todas formas, se ilustran las metalografías para todos los tiempos de cocción junto con una recta a escala de 100 μm , para que el lector interesado pueda calcular los tamaños de grano correspondientes (Figura 4-3 a Figura 4-14).

Tabla 4.1 : Determinación del tamaño de grano para tiempos de cocción de 20 s (izquierda) y 25 s (derecha)

Recta N°	n	L [μm]	di [μm]
1	9	650	72.2
2	10	650	65.0
3	9	650	72.2
4	10	650	65.0
5	10	650	65.0
6	9	650	72.2
7	9	650	72.2
8	10	650	65.0
9	11	650	59.1
10	9	650	72.2
11	10	650	65.0
12	10	650	65.0
		d	67.5

Recta N°	n	L [μm]	di [μm]
1	7	650	92.9
2	7	650	92.9
3	6	650	108.3
4	6	650	108.3
5	7	650	92.9
6	7	650	92.9
7	7	650	92.9
8	6	650	108.3
9	7	650	92.9
10	7	650	92.9
11	8	650	81.3
12	7	650	92.9
		d	95.8

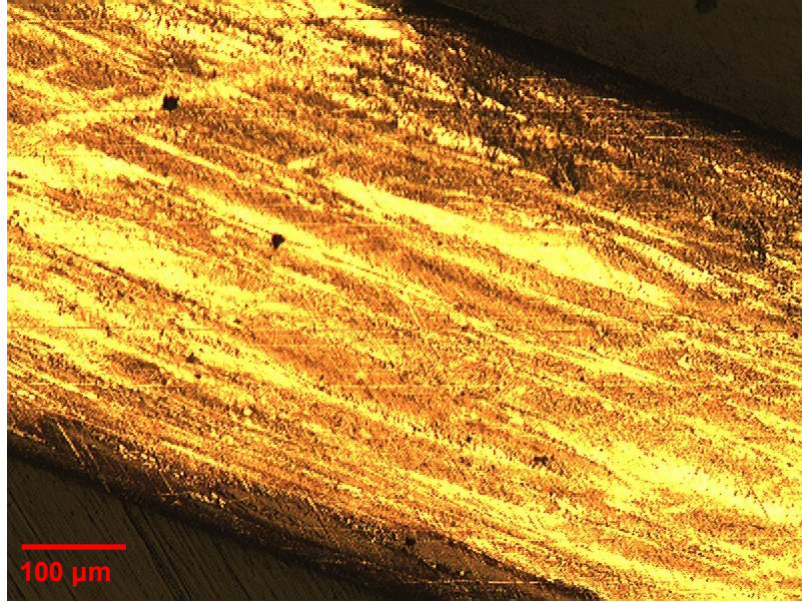


Figura 4-3 : Probeta de prueba 1, sin tratamiento

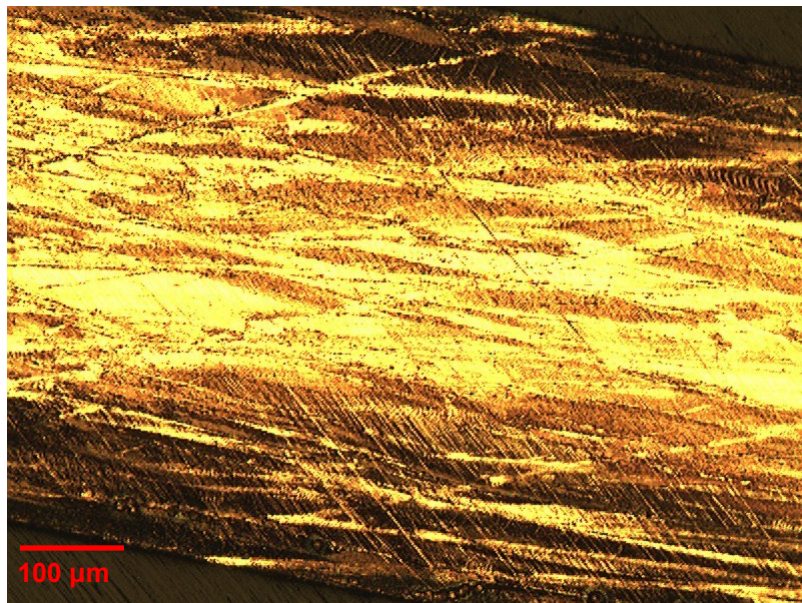


Figura 4-4 : Probeta de prueba 2, sin tratamiento

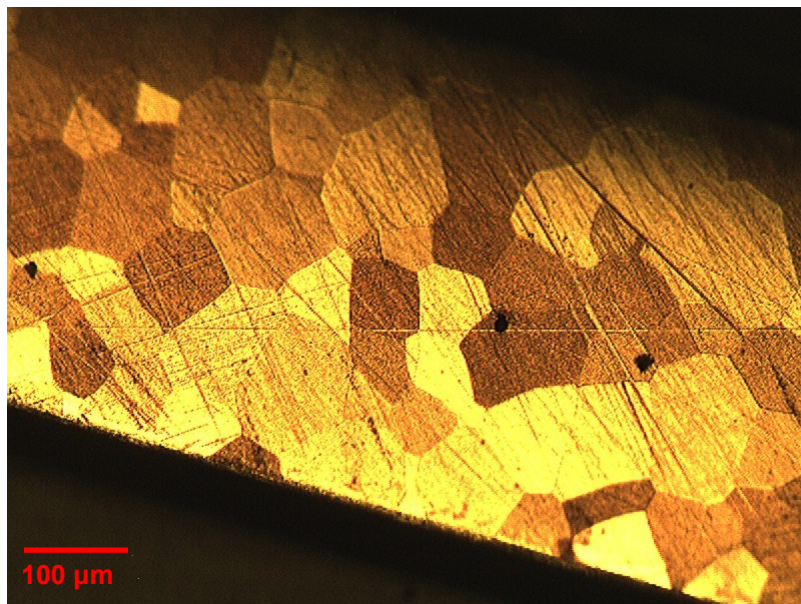


Figura 4-5 : Probeta de prueba 3, tratada por 15 segundos

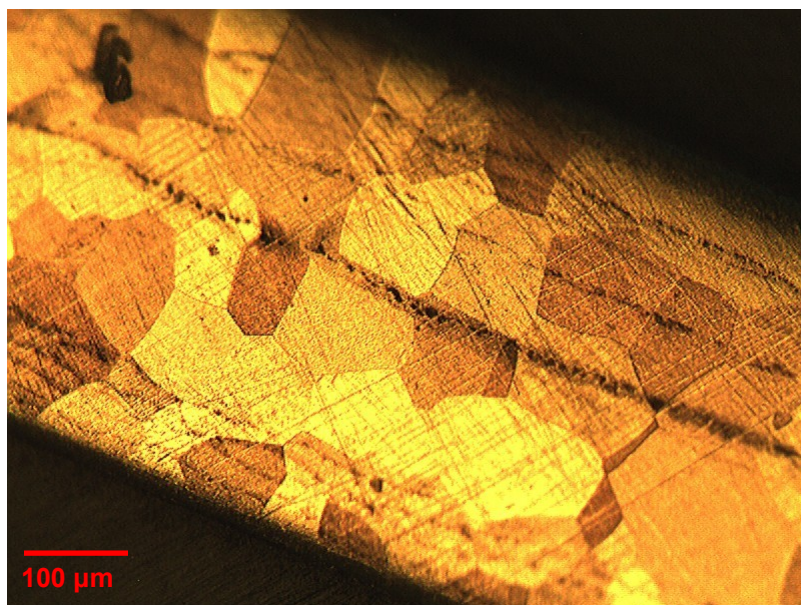


Figura 4-6 : Probeta de prueba 4, tratada por 15 segundos

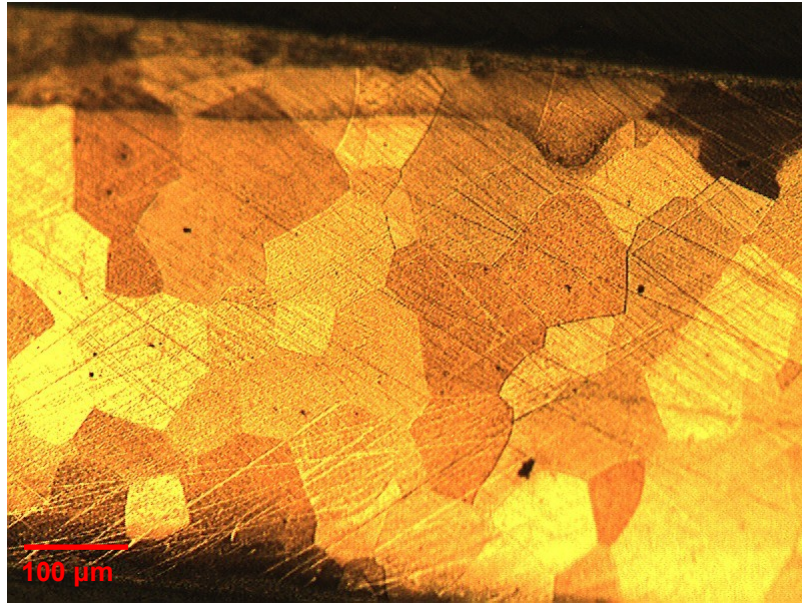


Figura 4-7 : Probeta de prueba 5, tratada por 20 segundos

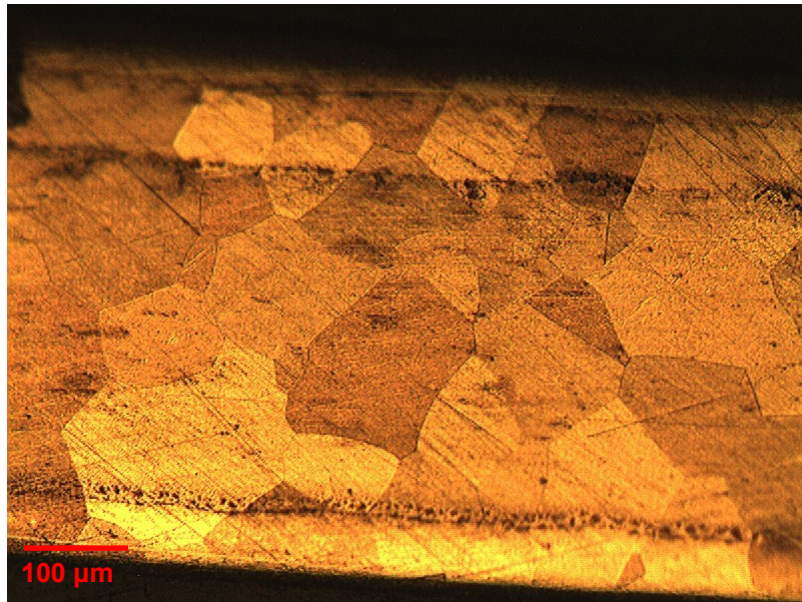


Figura 4-8 : Probeta de prueba 6, tratada por 20 segundos

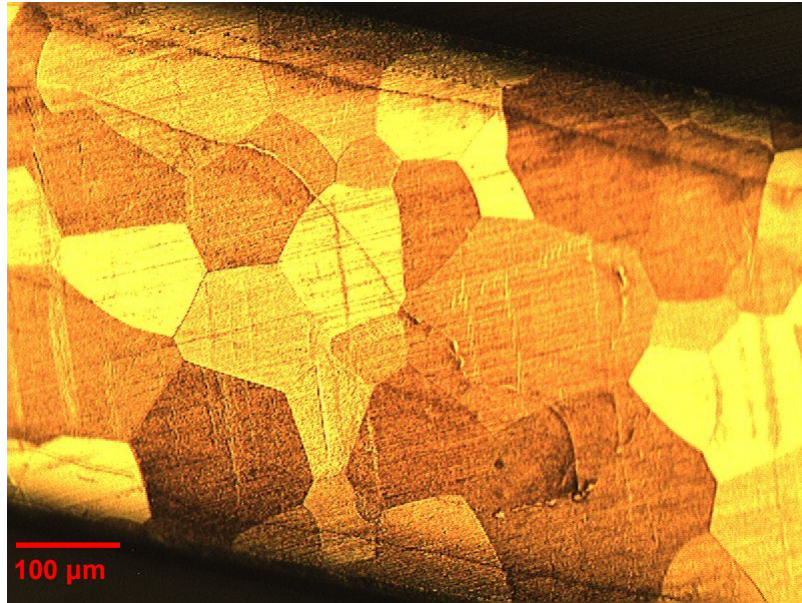


Figura 4-9 : Probeta de prueba 7, tratada por 25 segundos

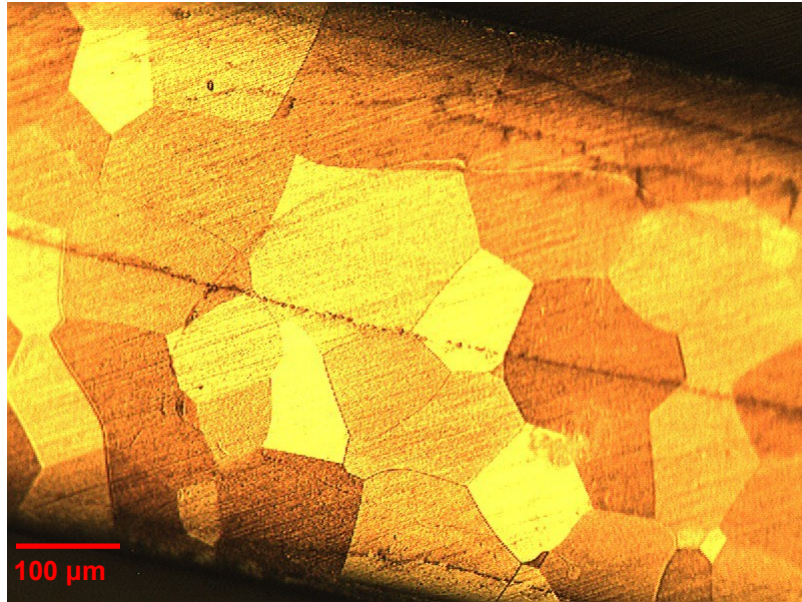


Figura 4-10 : Probeta de prueba 8, tratada por 25 segundos

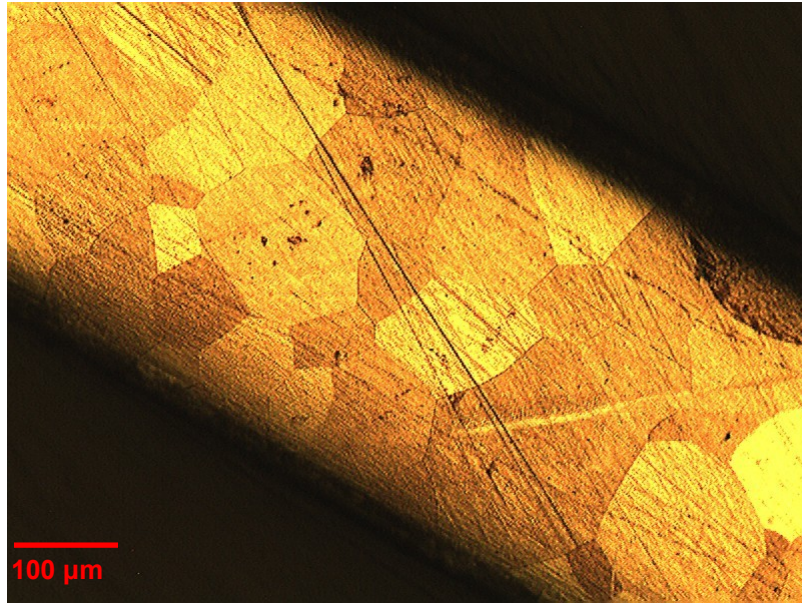


Figura 4-11 : Probeta de prueba 9, tratada por 30 segundos

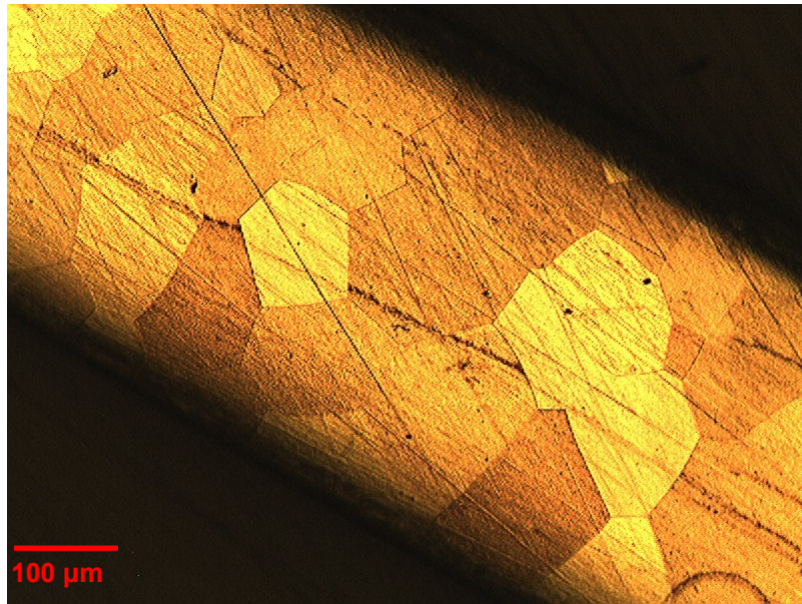


Figura 4-12 : Probeta de prueba 10, tratada por 30 segundos

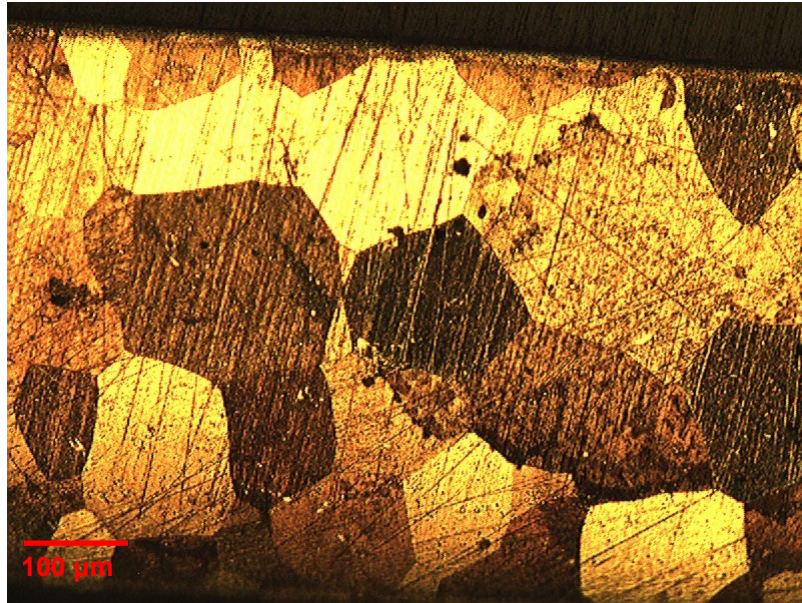


Figura 4-13 : Probeta de prueba 11, tratada por 35 segundos

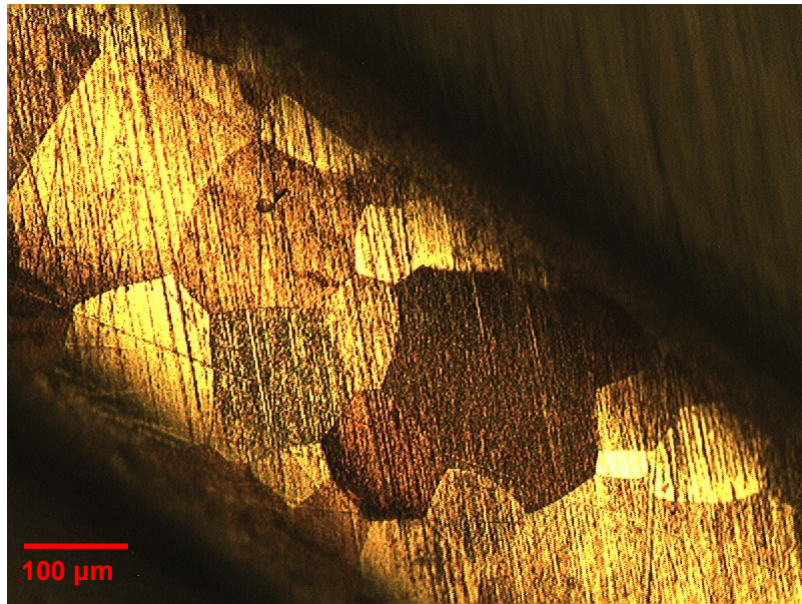


Figura 4-14 : Probeta de prueba 12, tratada por 35 segundos

4.3.3.4. Prueba de Efecto de Apantallamiento

Para los tratamientos térmicos se privilegió utilizar el horno que mantuviera el calor lo más uniformemente posible (Figura 4-18). Debido a sus dimensiones (30 x 41 cm), fue necesario enrollar los alambres para que éstos cupieran en su interior, ya que para aprovechar al máximo el material disponible, los alambres fueron cortados en trozos de 60 cm (Figura 4-19).

Como la receta de horneado fue obtenida cociendo probetas de sólo 2 cm, era posible que al tratar alambres enrollados de 60 cm se produjera un efecto de apantallamiento del calor: que los alambres de las capas superiores del rollo impidiesen que el calor llegara de manera uniforme a los alambres de las capas interiores. Para verificar si sucedía esto, se realizó una prueba enrollando un trozo de alambre de 60 cm de largo en pequeños círculos de 7 cm de diámetro, entrelazándolo sobre sí mismo para evitar que se desenrollara. El rollo de alambre fue tratado térmicamente siguiendo la metodología descrita en la sección 4.3.3.1. Una vez realizado el tratamiento, se extrajo una muestra de 2 cm de largo de un lugar aleatorio ubicado en el primer tercio del alambre, otra del tercio central y una última del tercio final. Se realizaron metalografías de las muestras y se midió su tamaño de grano empleando el método de la línea interceptada, utilizando 6 rectas horizontales de 600 μm de largo para cada caso. Los resultados obtenidos para el tamaño de grano se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 : Resultados prueba efecto de apantallamiento

Recta N°	L [μm]	Extremo 1		Centro		Extremo 2	
		n	di [μm]	n	di [μm]	n	di [μm]
1	600	9	66.7	10	60.0	10	60.0
2	600	10	60.0	10	60.0	9	66.7
3	600	11	54.5	9	66.7	11	54.5
4	600	10	60.0	8	75.0	9	66.7
5	600	9	66.7	12	50.0	9	66.7
6	600	11	54.5	9	66.7	12	50.0
		d	60.4	d	63.1	d	60.8

Como se puede observar en la Tabla 4.2, el tamaño de grano de las 3 muestras tomadas se encuentra cercano a los 60 μm , lo que indica que no existe efecto de apantallamiento y confirma la receta obtenida durante los tratamientos de prueba. El único inconveniente de este método de tratar los alambres es que los cables quedan con una curvatura permanente, sin embargo, esto se elimina con la pretensión que se ejerce al trenzar los alambres, pero se mantiene para el caso de alambres en paralelo. Las fotografías de las metalografías efectuadas se muestran desde la Figura 4-15 a la Figura 4-17.

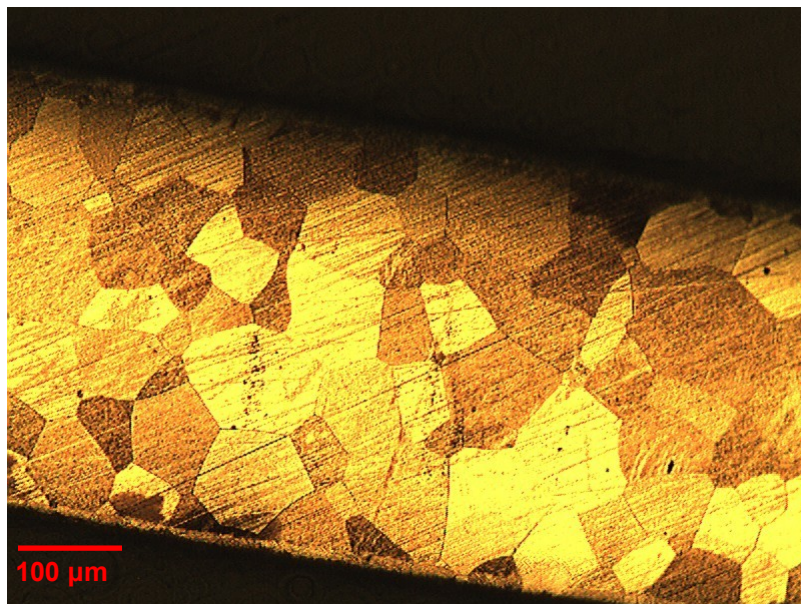


Figura 4-15 : Prueba de apantallamiento, extremo 1

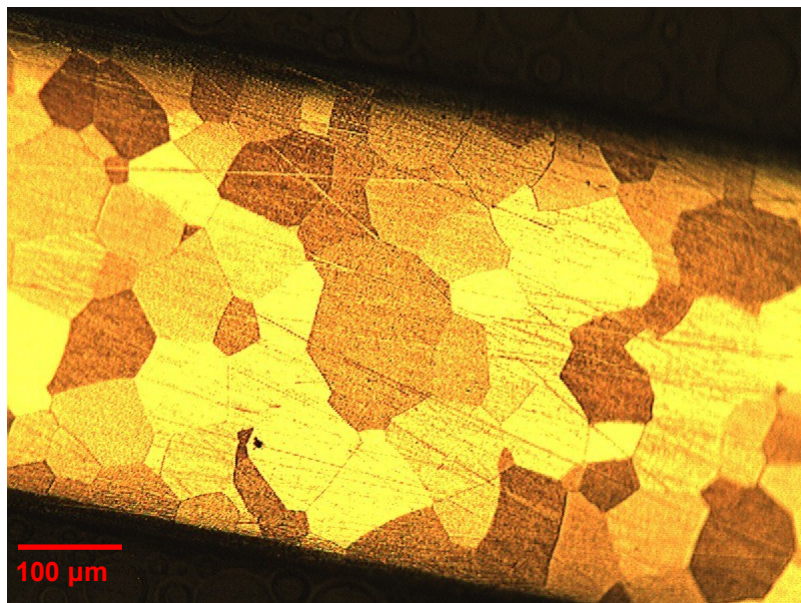


Figura 4-16 : Prueba de apantallamiento, tercio central

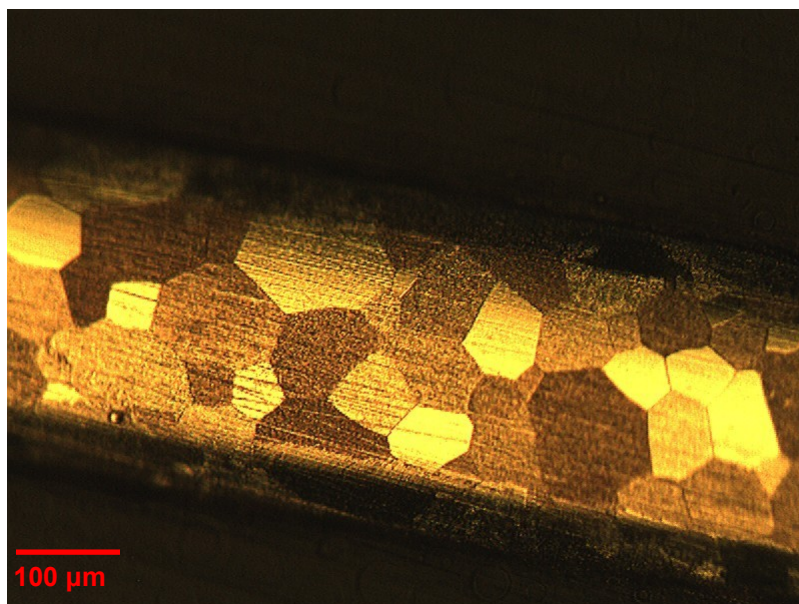


Figura 4-17 : Prueba de apantallamiento, extremo 2

4.3.4. Tratamiento de los Alambres

Los alambres se dispusieron en trozos de 60 cm de largo enrollados en círculos de 15 cm de diámetro, entrelazándolos sobre sí mismos para evitar que se desenrollaran. La metodología de tratamiento fue similar a la descrita en la sección 4.3.3.1, solo que esta vez se empleó la bandeja de acero con bordes abiertos con un pequeño ladrillo térmico en su interior para facilitar la manipulación de los alambres (ver Figura 4-19).



Figura 4-18 : Horno utilizado

Se requirieron 2 personas para efectuar los tratamientos, una para abrir la puerta del horno, acercar la bandeja a la puerta empleando las tenazas grandes, esperar a que se depositen los alambres, retornar la bandeja al fondo del horno y cerrar la puerta. La segunda persona empleaba las tenazas tipo tijera para depositar dos rollos de alambre (al mismo tiempo) sobre la bandeja, apoyados sobre el ladrillo, encender el cronómetro al cerrar la puerta, dar la señal cuando pasaran los 20 segundos, retirar los alambres de la bandeja y sumergirlos directamente en el agua con hielo.

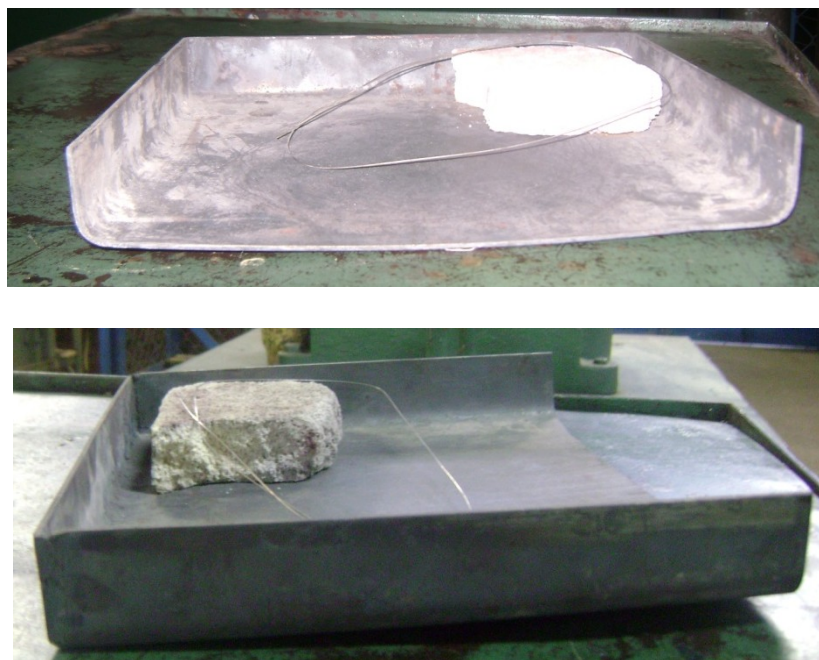


Figura 4-19 : Disposición de los alambres para el tratamiento térmico

4.4. Fabricación de las Probetas

Como sólo se disponía de 28 metros de alambre, se fabricaron dos probetas de cable trenzado y dos de alambres en paralelo, de 20 cm de largo cada una. Para el caso de las probetas de cable trenzado, el largo se refiere la longitud del cable en su conjunto y no a la de los alambres que lo componen.

4.4.1. Descripción de las Probetas de Cable Trenzado

La configuración escogida para los cables trenzados fue de un único torón formado por un núcleo central de un solo alambre sobre el cual se trenzaron dos capas. La primera consistió en 6 alambres enrollados helicoidalmente con un paso de 20 mm en arreglo derecho (sección A de la Figura 4-20). Sobre ésta se trenzó una segunda capa de 12 alambres con un paso de 20 mm en arreglo izquierdo (sección B de la Figura 4-20). Empleando la notación usada por Reedlunn y Shaw (2008), las probetas corresponden a cables tipo 1 x 19 x 0.5 mm, refiriéndose al número de torones, el número de alambres

por cada torón y al diámetro de los alambres respectivamente. La Figura 4-21 muestra una de las probetas fabricadas.

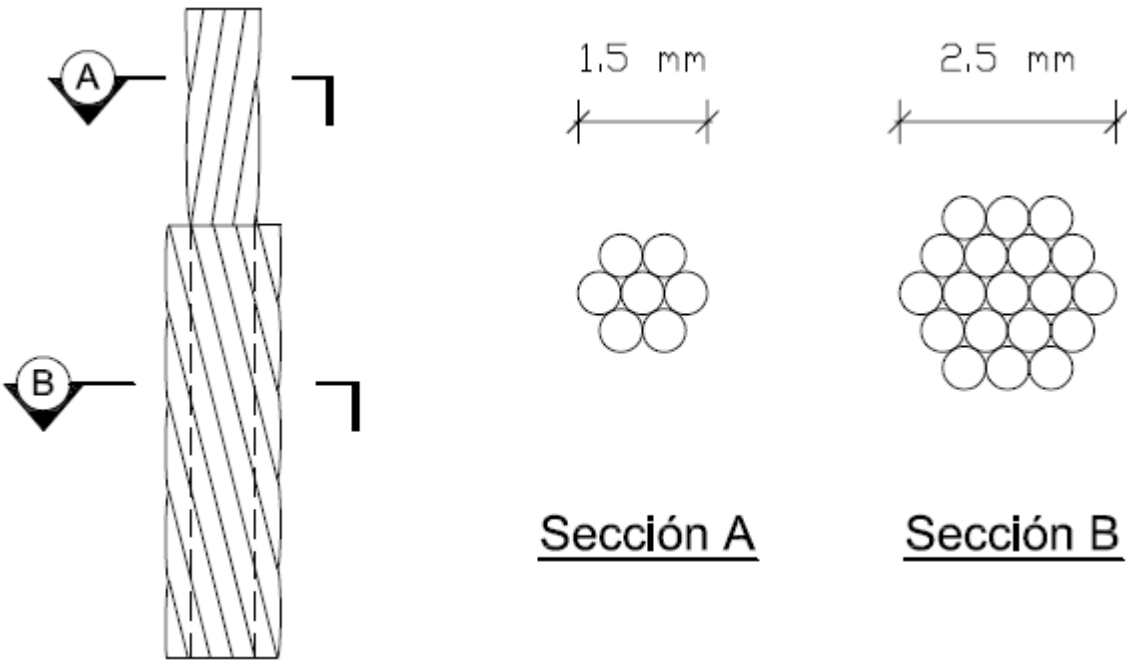


Figura 4-20 : Configuración de las probetas fabricadas

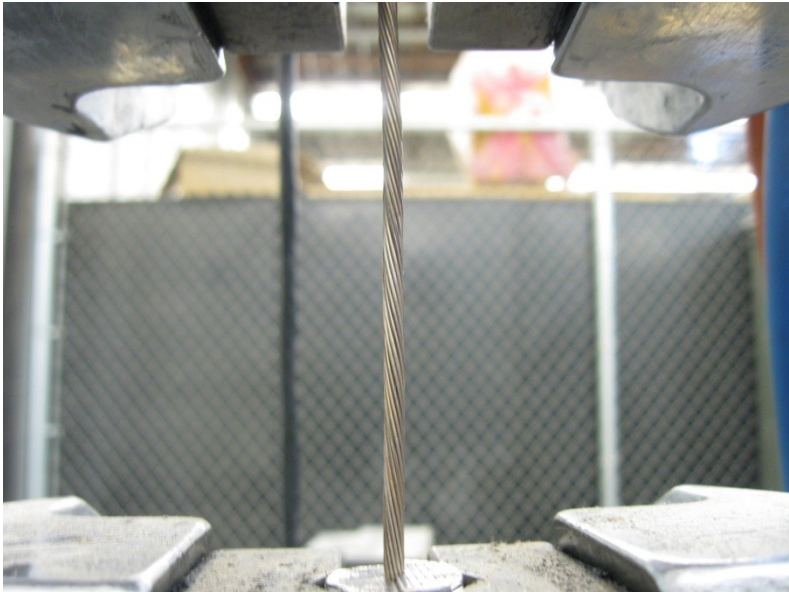


Figura 4-21 : Probeta de cable trenzado

4.4.2. Proceso de Trenzado

4.4.2.1. Idea General del Proceso

Para el proceso de trenzado de los cables se diseñó un mecanismo basado en tres discos paralelos y coaxiales alineados, montados sobre una fresadora. Los discos poseen una serie de perforaciones por donde pasan los alambres a trenzar, ubicadas a un mismo radio del centro y que dividen la circunferencia en partes iguales, según la capa del cable que se desea trenzar (6 para la primera, 12 para la segunda).

Debido al escaso material disponible, se realizaron trenzados de prueba con alambres de acero antes de fabricar los cables definitivos. Para ello, se efectuaron perforaciones a distintos radios para evaluar la mejor configuración posible para la fabricación (ver Figura 4-24).

El concepto de procedimiento de trenzado se presenta en la Figura 4-22. Se deben pasar los alambres por los discos I, II y III, manteniéndolos en paralelo (Figura 4-22a). Luego, se hace girar el disco II de la figura, al mismo tiempo que éste se mueve hacia atrás según el paso escogido. Para evitar que se enreden los alambres, se emplea un tercer disco (disco I) que gira solidariamente con el disco II (Figura 4-22b). Como los alambres de las capas superiores se enrollan en torno al núcleo, su longitud es mayor a la del alambre central. En consecuencia, el disco I debe avanzar, pero dejando fijo el alambre central (Figura 4-22b). El proceso se continúa hasta que el cable trenzado entre los discos II y III tenga la longitud deseada. Para trenzar la segunda capa, basta con cambiar el set de discos A por el B, pasar el núcleo ya trenzado por la perforación central y repetir el proceso con el avance del paso en sentido inverso.

El detalle del procedimiento anterior se explica en la sección 4.4.2.3

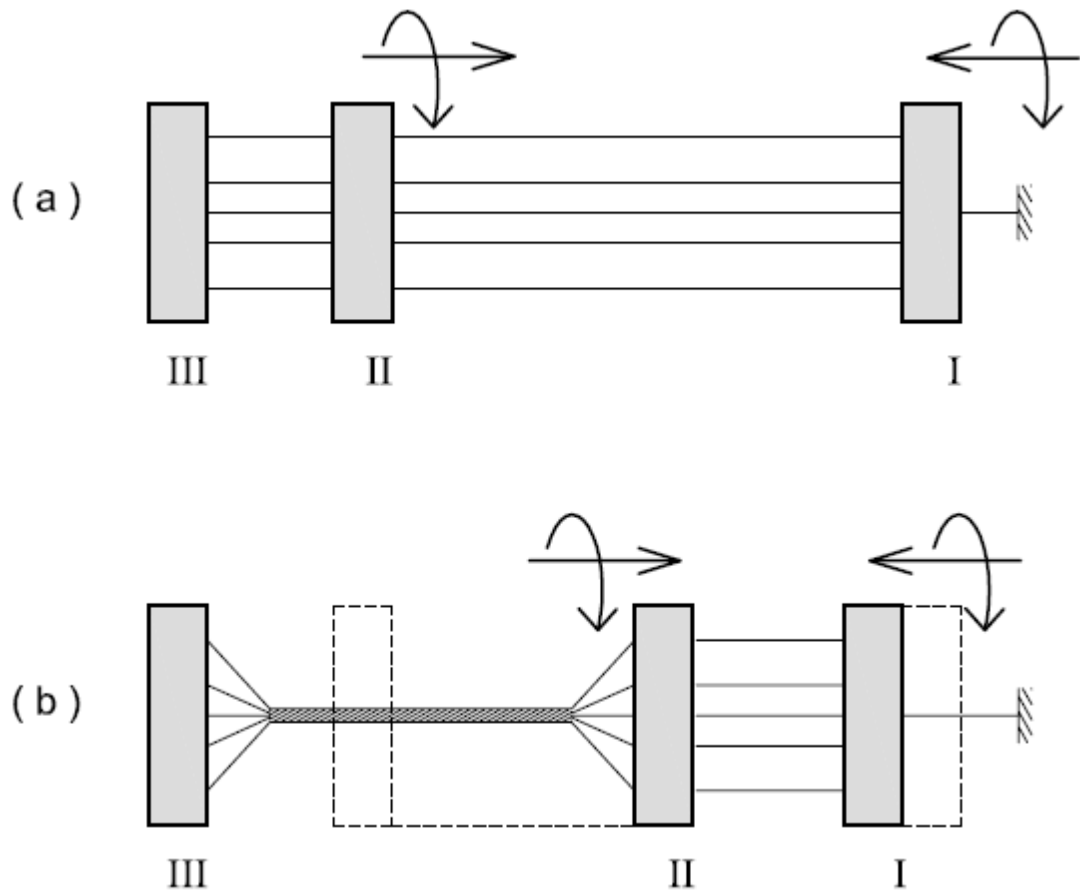


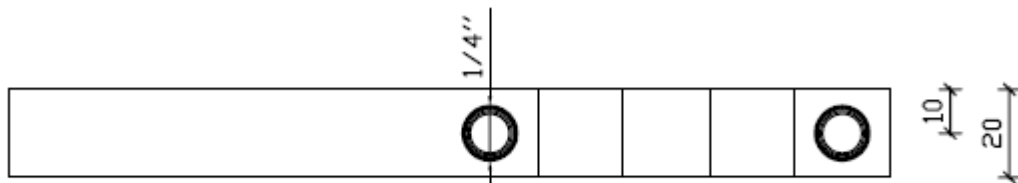
Figura 4-22 : Esquema de trenzado de los cables

4.4.2.2. Equipo Utilizado

Para todas las capas:

- Soldadura de plata al 50%
- Equipo de soldadura al oxígeno
- Masilla epóxica
- Lija para metal de malla fina
- Fresadora H. Ernault Somua, modelo ZHV1, con el set de engranajes necesario para establecer un paso de 20 mm
- Pieza de acero hecha a medida para fijar disco III (Figura 4-23)

Vista en Planta



Perfil Longitudinal

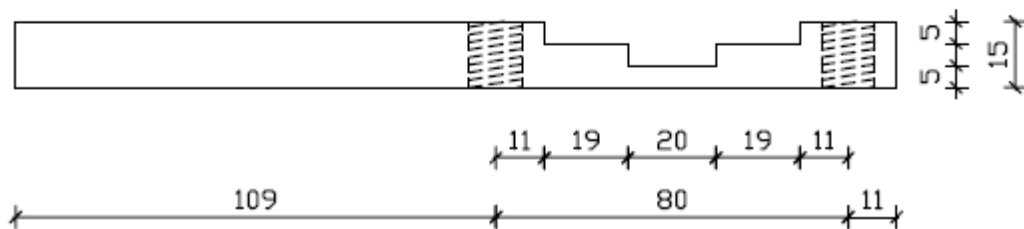


Figura 4-23 : Planos pieza para fijar disco III al cabezal de la fresadora (medidas en milímetros)

Para la primera capa:

- 7 alambres de CuAlBe de 60 cm de largo y 0.5 mm de diámetro, tratados térmicamente
- 7 alambres de acero de 5 cm largo y 0.5 mm de diámetro
- 7 alambres de acero de 30 cm de largo y 0.5 mm de diámetro
- 3 separadores hechos de círculos de cartón corrugado de 15 mm de diámetro con 6 perforaciones que siguen el patrón de los cables (similar al de los discos, sólo que se emplea una única circunferencia de 1 cm de diámetro) y una perforación central
- Discos I, II y III tipo A (Figura 4-24)

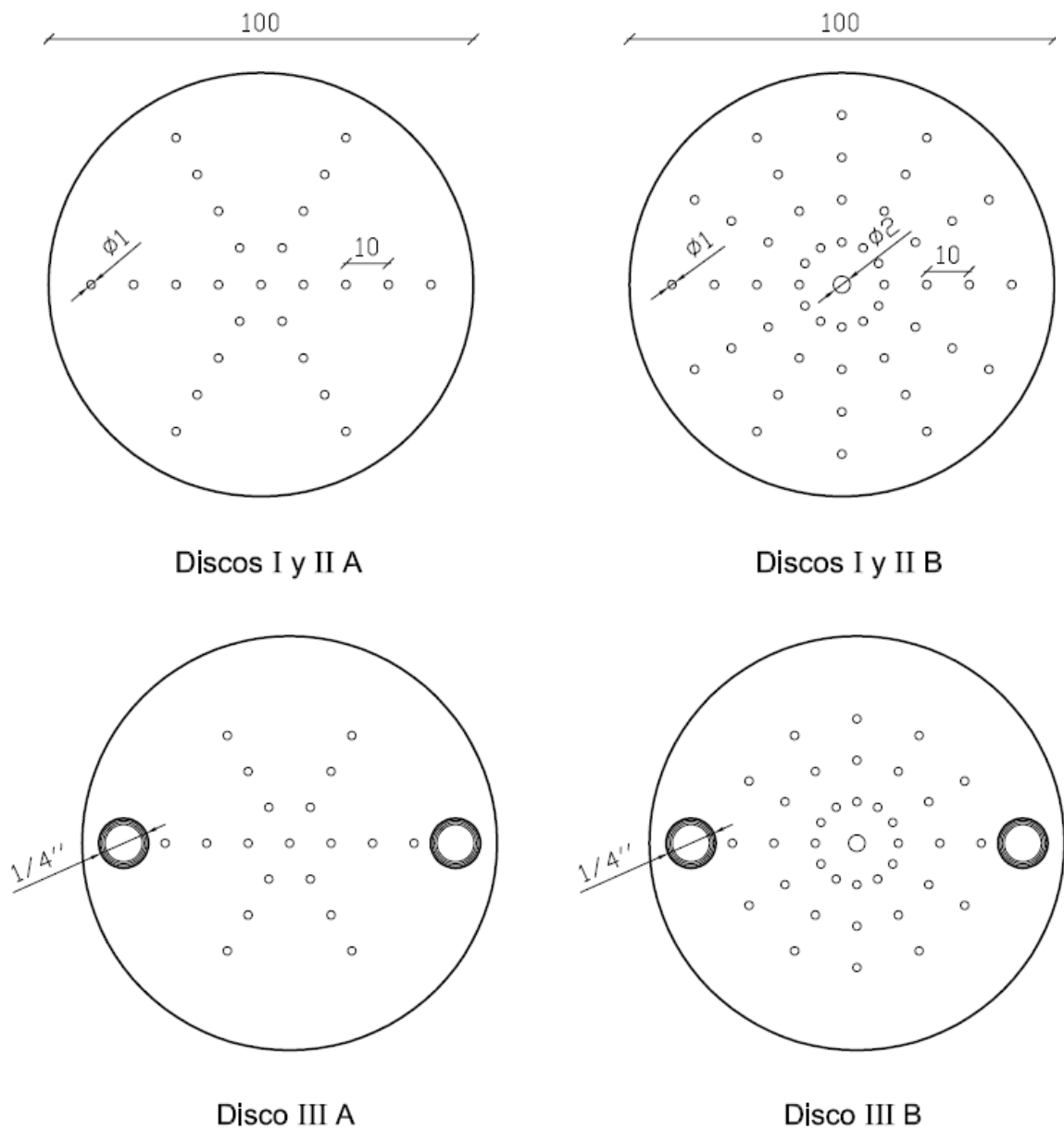


Figura 4-24 : Planos de los discos empleados para la fabricación de los cables (medidas en milímetros)

Para la fabricación definitiva de los cables de aleación CuAlBe, solo se emplearon las perforaciones del círculo más próximo al centro del disco.

Para la segunda capa:

- 12 alambres de CuAlBe de 60 cm de largo y 0.5 mm de diámetro, previamente tratados térmicamente
- 12 alambres de acero de 5 cm largo y 0.5 mm de diámetro
- 12 alambres de acero de 30 cm de largo y 0.5 mm de diámetro
- Núcleo de 1 x 7 x 0.5 mm de CuAlBe fabricado anteriormente (primera capa)
- Discos I, II y III tipo B
- 3 separadores hechos de círculos de cartón corrugado de 15 mm de diámetro con 12 perforaciones que siguen el patrón de los cables (similar al de los discos, sólo que se emplea una única circunferencia de 1 cm de diámetro) y una perforación central

4.4.2.3. Metodología

El mecanismo antes descrito se implementó sobre una fresadora en el Laboratorio de Termofluidos y Procesos Mecánicos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, siguiendo el procedimiento descrito a continuación.

Para la primera capa:

- i) Con la soldadura de plata, se soldaron alambres de acero de 5 cm de largo a un extremo de cada alambre de CuAlBe. Esto se realizó para poder fijar fácilmente los alambres al disco III doblando los alambres de acero. No se puede hacer empleando directamente los alambres de CuAlBe porque son frágiles y se rompen si se doblan fuertemente.
- ii) Una vez soldados a los alambres de CuAlBe, se pasaron los alambres de acero por el disco III. Se cortaron hasta quedar de 3 cm aproximadamente y se fijaron doblando dos veces la punta del alambre (ver Figura 4-25 y Figura 4-26)
- iii) Se pasó el extremo libre de los alambres de CuAlBe por la perforación correspondiente del disco II, de modo que los alambres entre ambos discos quedaran paralelos entre sí
- iv) Se pasaron 2 separadores de cartón por el extremo libre de los alambres de CuAlBe, estos mantienen los alambres en paralelo y evitan que se enreden

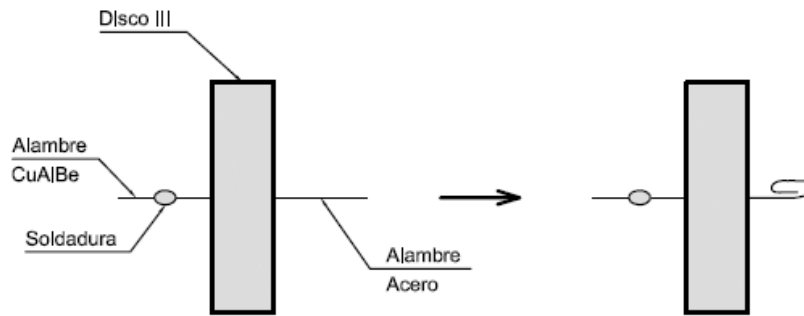


Figura 4-25 : Modo de fijar los alambres al disco III

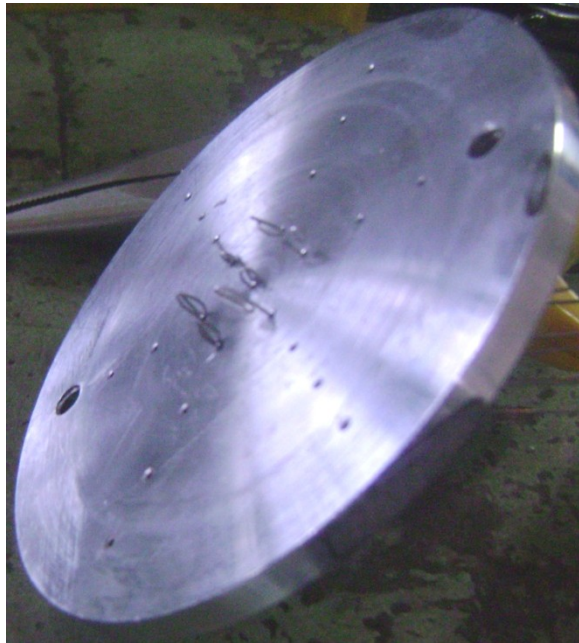


Figura 4-26 : Alambres fijos al disco III

- v) Se soldaron alambres de acero de 30 cm de largo al extremo libre de los de CuAlBe para emplearlos como extensiones y facilitar su manipulación en la fresadora
- vi) Se pasó un separador de cartón por el extremo libre de las extensiones de 30 cm de acero para evitar que se enredaran
- vii) Se instaló la pieza para fijar el disco III (Figura 4-23) en el cabezal de la fresadora y se apernó el disco contra ella
- viii) Se desplazaron los separadores de cartón de modo de dividir los alambres en largos iguales

- ix) Se pasaron los alambres por el túnel de paso y se instaló el disco II al rotor apretando las mordazas correspondientes (ver Figura 4-27 y esquema en la Figura 4-28)

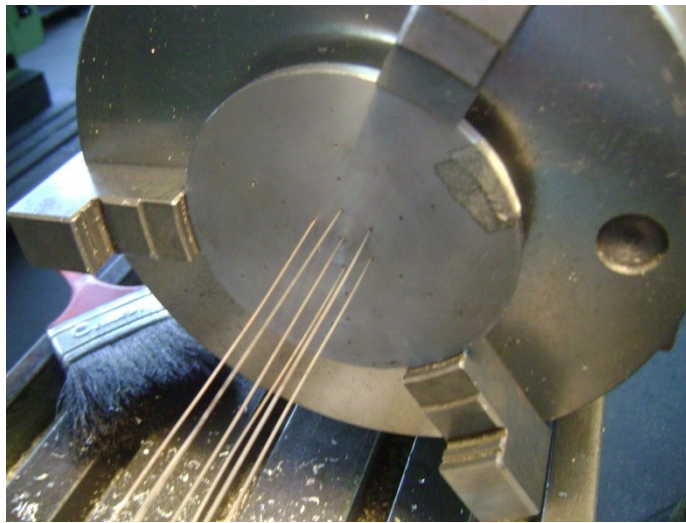


Figura 4-27 : Disco II instalado en el rotor de la fresadora

- x) Se pasaron los alambres (extensiones de acero) por el disco I y, salvo el alambre central, se fijaron en la forma expuesta en la Figura 4-25. El alambre central se fija manualmente con un alicate. Se debe procurar tensar todos los alambres similarmente (Figura 4-29 y Figura 4-30).

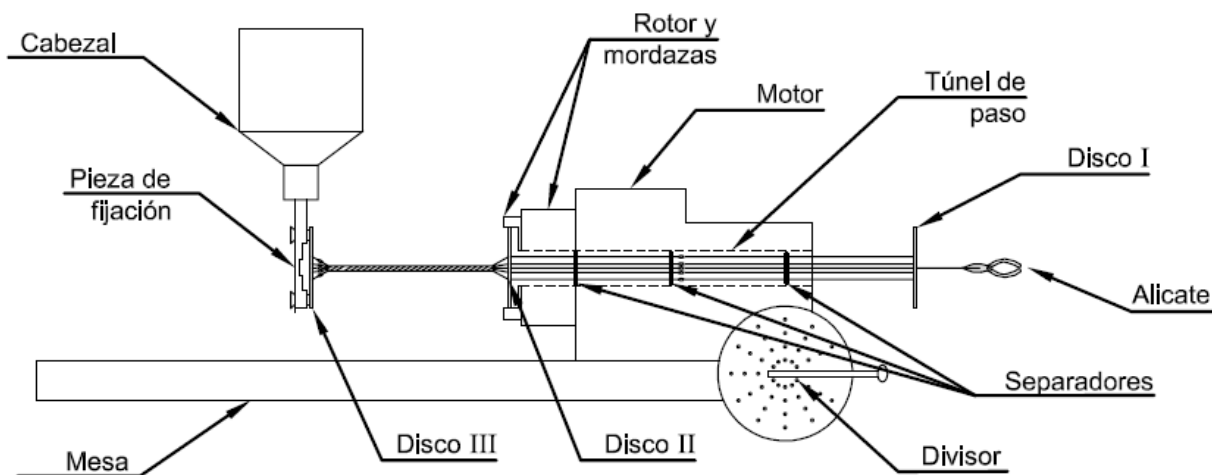


Figura 4-28 : Esquema equipo montado sobre la fresadora

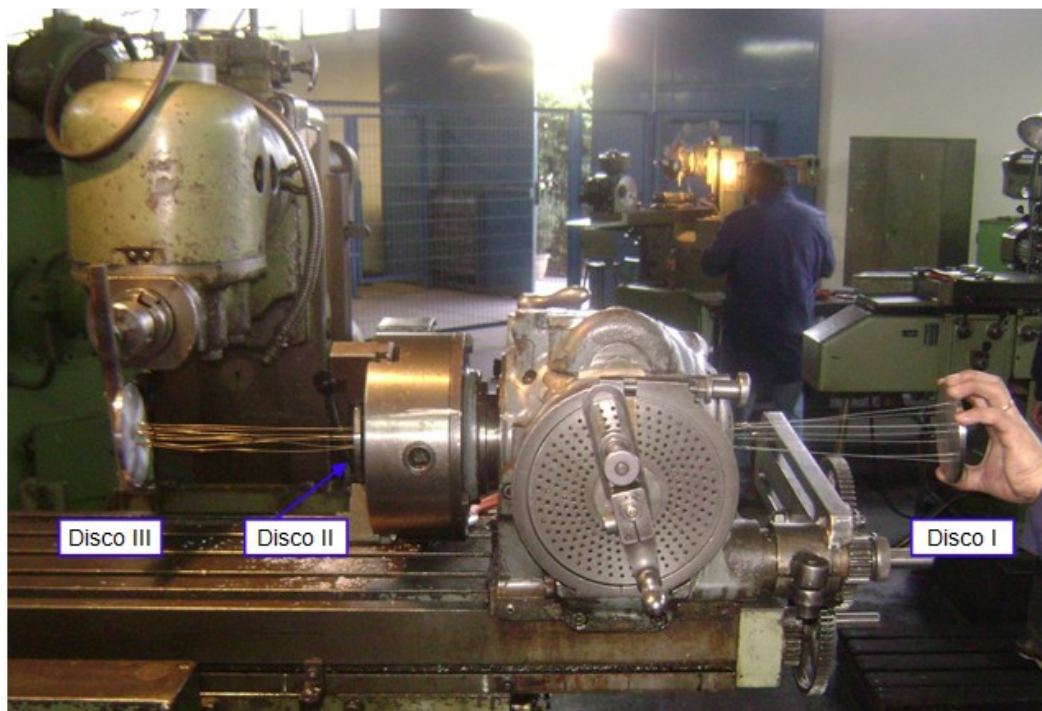


Figura 4-29 : Mecanismo de trenzado

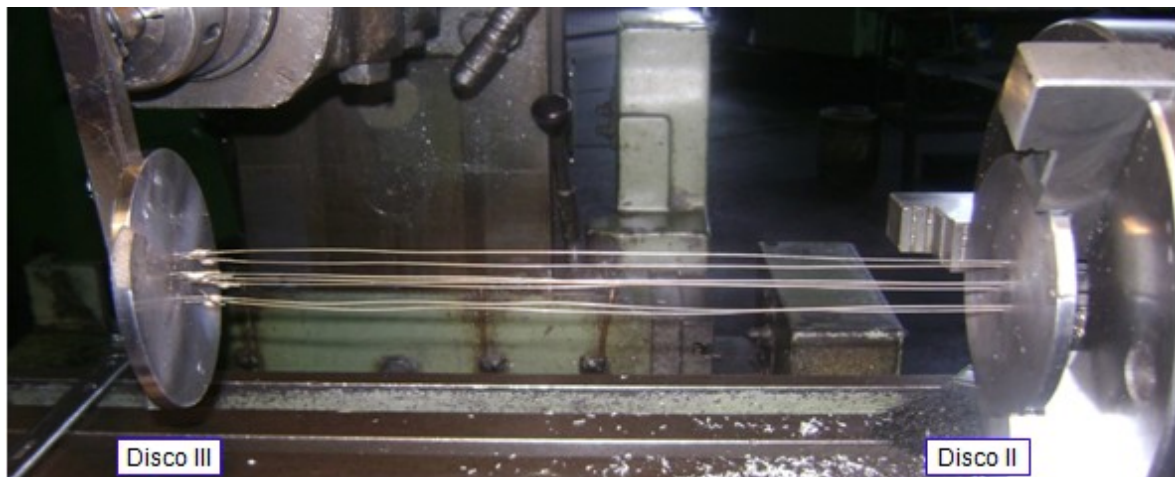


Figura 4-30 : Mecanismo de trenzado - Discos II y III

- xi) Una vez instalados todos los discos, se movió la mesa hasta que los discos II y III se encontraron a una distancia de 3 cm entre sí (medidos como el largo libre entre caras enfrentadas). Para poder hacer esto es necesario que los engranajes que controlan el paso no estén conectados aún con la mesa
- xii) Con tiza, se marcaron 30 cm sobre la mesa para controlar el avance longitudinal y saber cuándo detener el proceso

- xiii) Se conectaron los engranajes que relacionan el movimiento del divisor con el avance de la mesa, de esta forma se liga el giro del rotor con el avance longitudinal de la mesa
- xiv) Un operador giró el divisor para iniciar el proceso, un segundo operador se encargó de ir rotando manualmente el disco I para evitar el enredo de los alambres dentro del túnel de paso y de mantener fijo el alambre central con un alicate. El proceso de fabricación es extremadamente lento, por lo que no representa ningún peligro para la persona que gira el disco I
- xv) Una vez que se alcanzaron los 30 cm de avance longitudinal se detuvo el proceso (Figura 4-31)

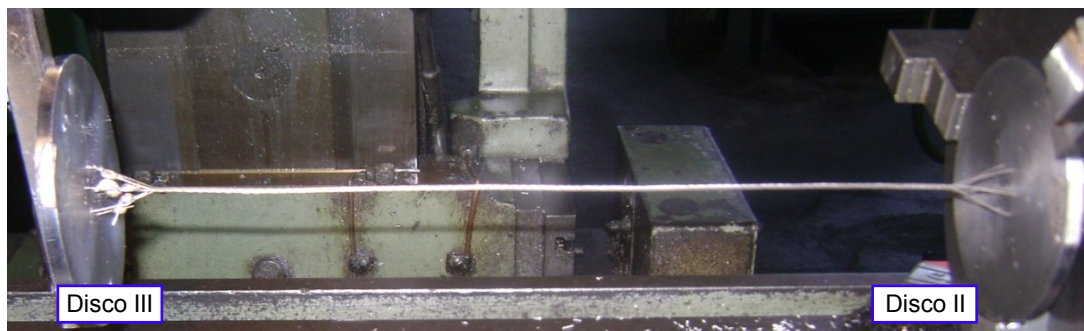


Figura 4-31 : Cable trenzado al finalizar el proceso

- xvi) El extremo del cable cercano al disco II se fijó con masilla epóxica para evitar que los alambres se destrenzaran al retirar el cable del aparato. El extremo cercano al disco III se apretó con un set de prensas fabricadas con dos placas y pernos (ver Figura 4-32), de modo de poder retirarlas para luego pasar el núcleo por los discos tipo B. Se esperaron 30 minutos y se cortaron todos los alambres que fijaban el cable a los discos, salvo el del núcleo, que se empleó como alambre central en el trenzado de la segunda capa

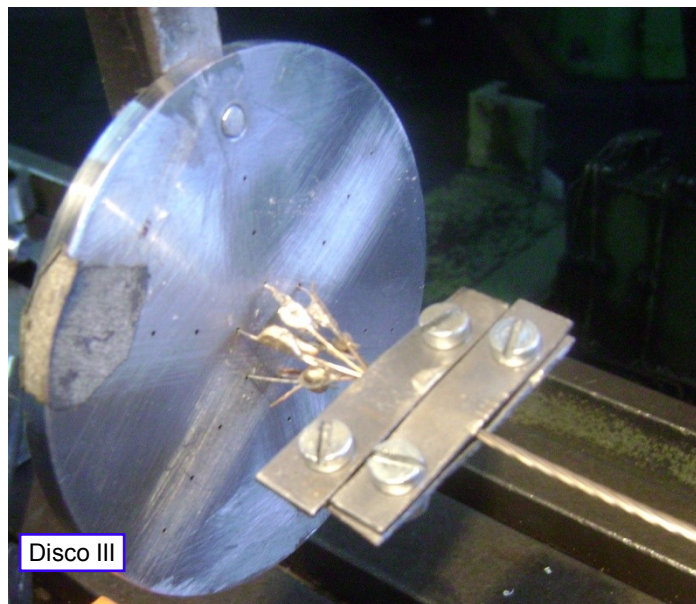


Figura 4-32 : Prensas empleadas para fijar el trenzado de la primera capa

Para la segunda capa:

El proceso de trenzado de la segunda capa de alambres fue similar al de la capa anterior, solo que se emplearon los discos tipo B para poder trenzar de a 12 alambres a la vez. La única gran diferencia entre ambos procesos es que se debió pasar el cable con la primera capa trenzada por la perforación central de los discos II y III. Para esto, primero se pasaron los discos por los alambres libres que en el proceso de fabricación de la primera capa estaban fijos al disco III. Luego, éstos se sujetaron con un caimán y se retiraron las mordazas empleadas para fijar el trenzado. Rápidamente, se pasaron los discos por el cable, se volvieron a colocar las mordazas y se fijó el cable al orificio central del disco III empleando masilla epóxica. Se esperaron 24 horas antes de utilizar el mecanismo para garantizar que la masilla se hubiera endurecido por completo.

Luego de repetir los pasos explicados para el trenzado de la primera capa, el cable finalmente trenzado por completo se fijó con masilla epóxica en sus dos extremos. Se esperó por 1 hora y se cortaron los alambres restantes.

4.4.3. Probetas de Alambres en Paralelo

Para la fabricación de las probetas en paralelo se emplearon trozos de 20 cm de alambre, en su mayoría restos del proceso de fabricación de las muestras de cable trenzado. Un extremo de la probeta se fijó con masilla epóxica, el otro con bandas de goma. Como el tratamiento térmico del material se realizó enrollando los alambres, éstos quedaron con una curvatura permanente. En consecuencia, los

elementos de la probeta no quedaron completamente paralelos y poseían largos levemente diferentes. Para aminorar este efecto, se agregaron 2 anillos de aluminio que mantenían los alambres en una posición relativamente paralela (ver Figura 4-33).

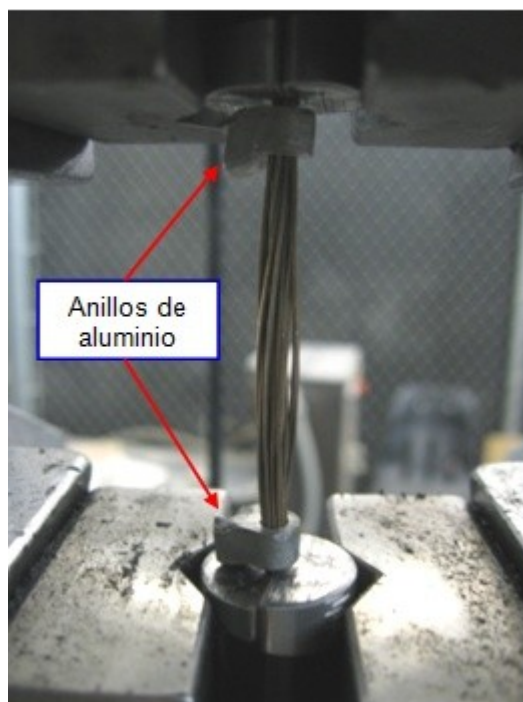


Figura 4-33 : Probeta de alambre en paralelo

4.5. Ensayos

Para el proyecto resultaba fundamental obtener datos empíricos sobre comportamiento de los cables fabricados al ser sometidos a ciclos de carga y descarga. Específicamente, se requería de ensayos a tracción cíclica controlados por la deformación de la probeta, sin que ésta última entrase en compresión. Para ello, era necesario contar con máquinas que permitieran controlar el ensayo mediante la deformación aplicada a la probeta, pero que además fueran capaces de limitar la carrera según la fuerza que se ejerce sobre el cable. Desafortunadamente, esta clase de equipos no estaba disponible en nuestro país. Sin embargo, el acuerdo de cooperación con el profesor Reginald DesRoches del Georgia Institute of Technology (Georgia Tech) para el proyecto FONDECYT N°1070370 “Cu – based Shape Memory Alloy Connections for Structures” permitió realizar estos ensayos en su casa de estudios. De esta forma, todos los experimentos realizados para esta tesis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras e Investigación de Materiales de dicha universidad, en la ciudad de Atlanta, Georgia, EE.UU.

4.5.1. Equipo Utilizado

Todos los ensayos fueron realizados empleando una máquina universal hidráulica MTS 810 de 250 kN de capacidad máxima, equipada con mordazas hidráulicas tipo cuña MTS 647.25. Además, para el agarre de los cables, en el taller mecánico de la Escuela de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Georgia Tech, se fabricaron mordazas cilíndricas (ver Figura 4-34). El control de la máquina de ensayo se realizó mediante un controlador MTS TestStar empleando el software *TestWare*. En cada ensayo, se registró la temperatura empleando un termómetro de ambiente digital MTS. Los datos fueron recopilados empleando una interfaz de adquisición de datos equipada con el software *LabView*. Una vista general de los equipos se muestra en la Figura 4-35.

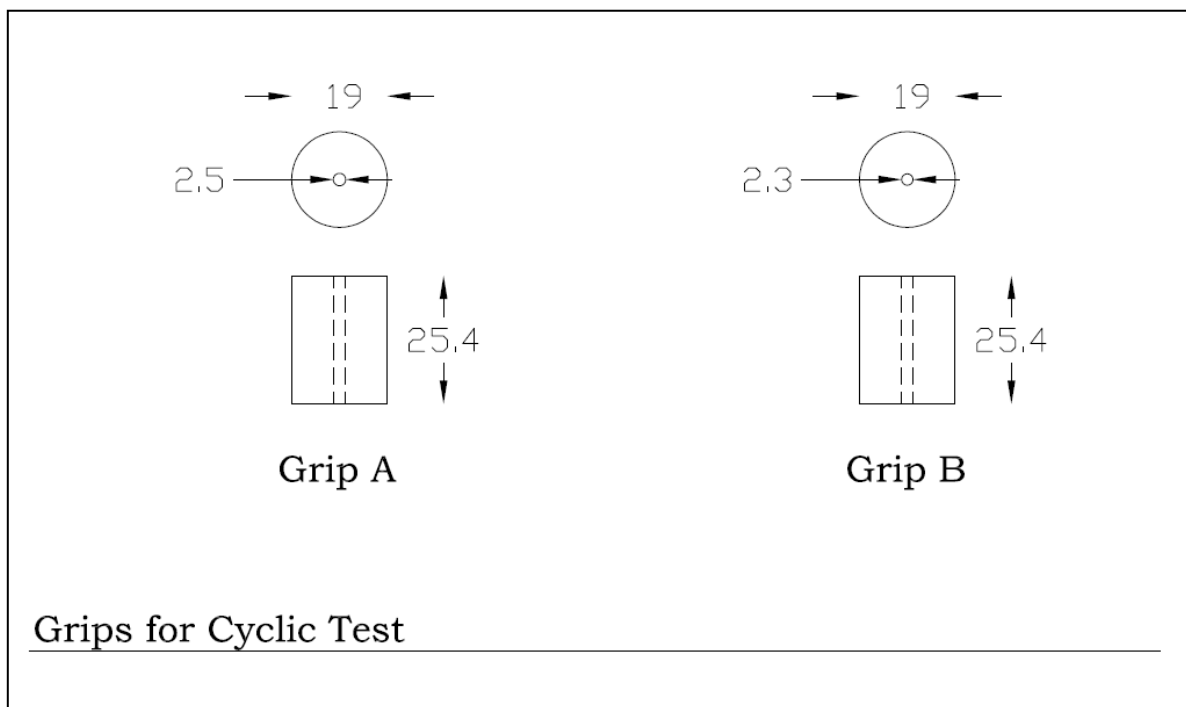


Figura 4-34 : Planos mordazas cilíndricas (dimensiones en milímetros)

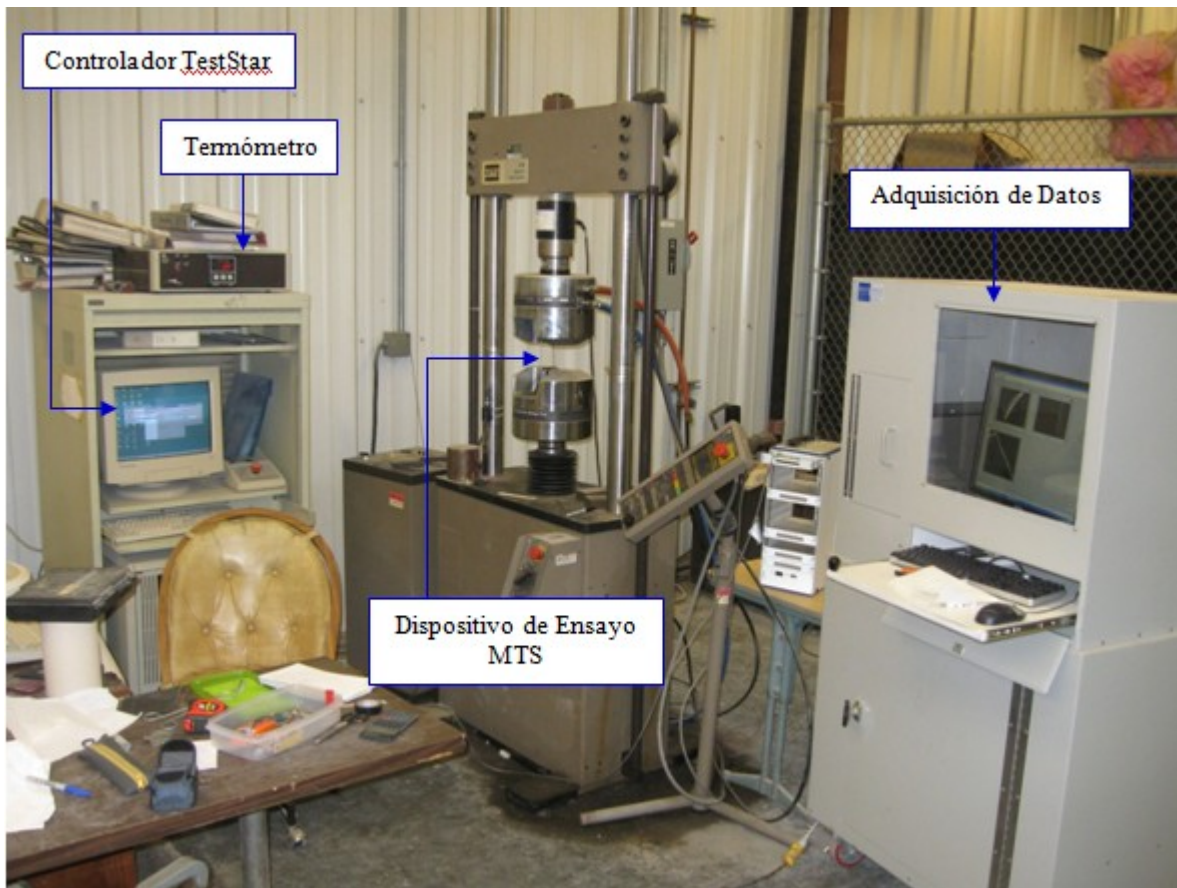


Figura 4-35 : Equipo Utilizado

4.5.2. Metodología de Ensayo

Todas las probetas fueron ensayadas siguiendo el siguiente protocolo:

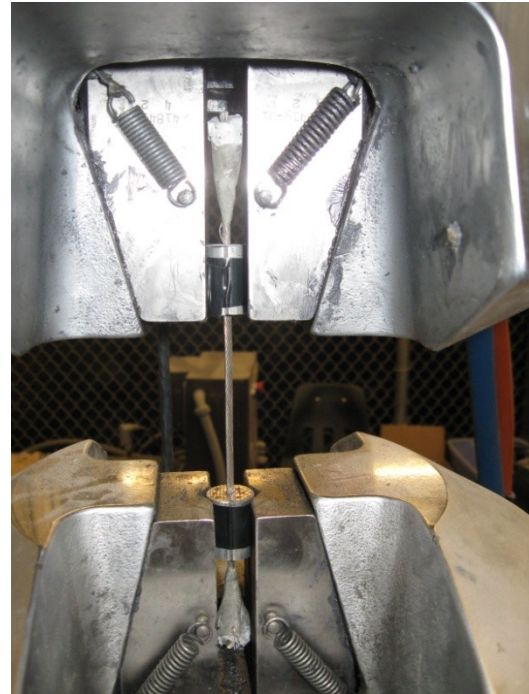
- i) Dar la llave de agua para iniciar el equipo que daba presión a los componentes hidráulicos del sistema
- ii) Encender el controlador y el termómetro
- iii) Encender el sistema de adquisición de datos
- iv) Presionar el botón que da baja presión al movimiento de la mordaza inferior y luego dar baja presión a la mordaza superior

- v) Esperar 15 segundos y apretar el botón de alta presión para el movimiento de las mordazas, primero la inferior y luego la superior
- vi) Poner el dispositivo MTS bajo desplazamiento controlado y ajustar la altura de la mordaza superior, de modo de que la inferior pudiese desplazarse lo requerido para el ensayo
- vii) Verificar la presión de agarre que aplicarán las mordazas sobre las probetas. Emplear el mínimo
- viii) Ajustar en cero la fuerza del sistema
- ix) Instalar la probeta en la mordaza superior. Cerrar la mordaza
- x) Poner el dispositivo MTS bajo fuerza controlada
- xi) Instalar la probeta en la mordaza inferior. Cerrar la mordaza
- xii) Ajustar en cero el desplazamiento del sistema
- xiii) Poner el dispositivo MTS bajo desplazamiento controlado
- xiv) Con un pie de metro, medir la distancia entre mordazas y calcular los porcentajes de deformación deseados para la secuencia del ensayo
- xv) Actualizar los porcentajes de deformación en la rutina de ensayo programada en el controlador
- xvi) Comenzar a grabar en el dispositivo de adquisición de datos
- xvii) Ejecutar la secuencia programada para el ensayo
- xviii) Una vez finalizado el ensayo, dejar de grabar
- xix) Abrir la mordaza inferior y luego moverla hacia abajo
- xx) Sujetando la probeta, abrir la mordaza superior y retirar la probeta

La Figura 4-36 muestra una probeta de cable trenzado montada sobre la máquina de ensayo, la Figura 4-38 lo hace para una probeta de alambres en paralelo. Cada muestra fue sometida a dos rutinas de ensayo. La primera rutina consistió en ensayos cíclicos de deformación al 2%. La segunda rutina, en ciclos de carga a deformación máxima variable entre el 0.5% y 8%, siguiendo el patrón descrito a continuación.



(a) Vista general



(b) Detalle de la Probeta

Figura 4-36 : Probeta de cable trenzado montada en la máquina de ensayo

Rutina 1: Deformación al 2%

Consistió en 20 ciclos de deformación hasta el 2%. Los ciclos de deformación se aplican en forma de rampas lineales, a una velocidad de 0.1 mm/s. Cada ciclo termina cuando la deformación o la fuerza vuelvan a cero, lo que ocurra primero. De esta forma se evita que la probeta entre en compresión. Todas las muestras fueron sometidas a esta rutina, salvo una probeta de alambres en paralelo, donde ésta se modificó para aplicar una deformación del 2.2% en vez del 2% original.

Rutina 2: Amplitud variable hasta alcanzar el 8%

Consiste en :

- i) 3 ciclos al 0.5%
- ii) 1 ciclo al 0.8%
- iii) 1 ciclo al 1.0%
- iv) 1 ciclo al 1.5%
- v) 5 ciclos al 2.2%
- vi) 1 ciclo al 2.5%
- vii) 1 ciclo al 3.0%
- viii) 1 ciclo al 3.5%
- ix) 1 ciclo al 4.0%
- x) 1 ciclo al 4.5%
- xi) 5 ciclos al 5.0%
- xii) 1 ciclo al 8.0%

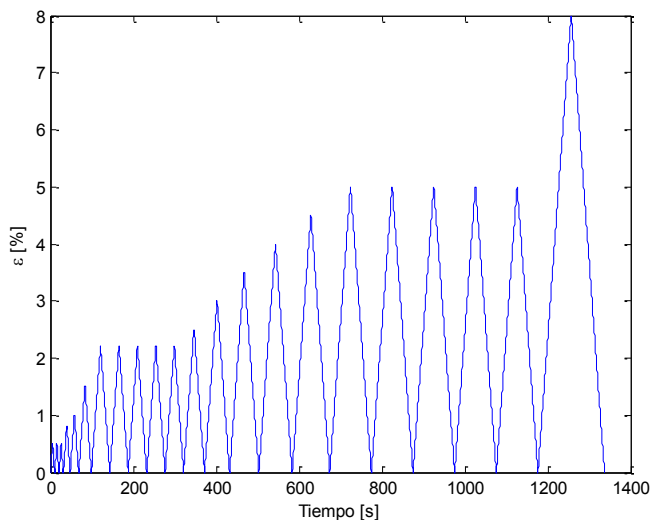


Figura 4-37 : Deformación vs Tiempo para Ensayo de Rutina 2, con Probeta de 10 cm de Largo

Los ciclos de deformación se aplican en forma de rampas lineales (Figura 4-37), a una velocidad de 0.1 mm/s. Cada ciclo termina cuando la deformación o la fuerza vuelvan a cero, lo que ocurra primero. Debido a que esta rutina deforma los elementos más allá de su límite superelástico (2.2%), las probetas quedan con deformaciones permanentes. En consecuencia, la rutina 2 debe aplicarse después haber aplicado la rutina 1 sobre la probeta. La Figura 4-37 muestra, a modo de ejemplo, el gráfico de deformación – tiempo que se aplicaría para una probeta de 10 cm de largo libre entre mordazas.

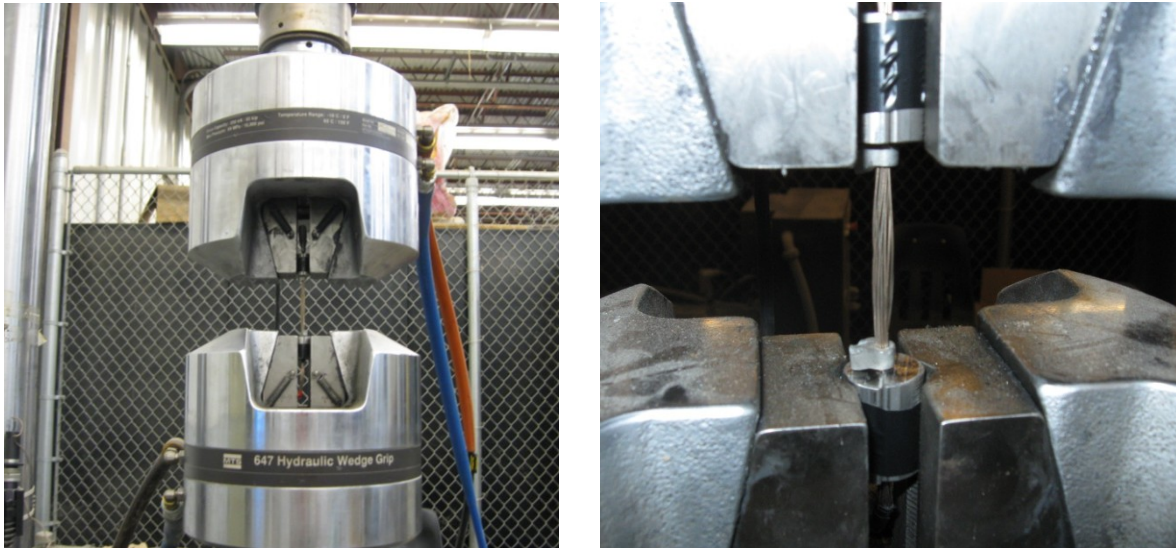


Figura 4-38 : Probeta de alambres en paralelo montada sobre la máquina de ensayo

Por recomendación del equipo de investigación que dirige el profesor DesRoches, no se utilizó un extensómetro para registrar la deformación de la probeta. Esto debido a que las capas exteriores del cable se deforman de manera diferente a la deformación global del mismo. Además, debido a que se trata de múltiples elementos entrelazados, es posible que no todos los alambres sufran la misma deformación al mismo tiempo. En consecuencia, el extensómetro registrará valores incorrectos. Para verificar esto, se ensayó una de las probetas de acero, fabricadas para probar el mecanismo de trenzado, registrando la deformación con un extensómetro. Los resultados de la prueba confirmaron el supuesto antes mencionado y se descartó el uso de extensómetros. De esta forma, todos los ensayos se realizaron controlando la deformación global del cable mediante el desplazamiento relativo entre mordazas, registrada por el controlador de la máquina.

Lamentablemente, lo anterior implica que cualquier deslizamiento del cable dentro de las mordazas se confundirá con deformación en el registro del experimento. Sin embargo, se realizaron pruebas con los cables de acero, fabricados para probar el proceso de trenzado, para determinar a qué nivel de fuerza deslizaban notablemente las mordazas. En todas las pruebas estos valores se mantuvieron sobre los 4.5 kN (1000 lbf). Los ensayos realizados en los cables de CuAlBe nunca sobrepasaron este nivel de fuerza.

Otro problema asociado a no haber utilizado un extensómetro es que la deformación que sufre la máquina durante el ensayo se suma al registro de deformación de la probeta. De acuerdo con el catálogo de MTS, la rigidez de la máquina es de 4.3×10^8 N/m. La carga máxima aplicada en los ensayos fue inferior a 2 kN y 3 kN para las rutinas 1 y 2, respectivamente. Si se considera la máquina como un resorte simple, el desplazamiento máximo alcanzado durante la rutina 1 fue de 4.65×10^{-3} mm, y de 6.98×10^{-3} mm para la rutina 2. En las probetas, esto significa que las deformaciones máxima adicionadas por este

efecto son inferiores al $6.73 \times 10^{-5} \%$ para la rutina 1 y al 0.0001% para la rutina 2. En consecuencia, la deformación de la máquina es despreciada en los resultados.

El problema anterior se repite para la deformación que sufren las mordazas. De acuerdo con el catálogo de MTS, en su punto más débil, la carga es sostenida por una barra de acero de 38.1 mm (1.5 in) de diámetro y 30.5 cm (12 in) de largo. El catálogo no estipula el tipo de acero empleado, por lo que se asumió un valor para el módulo de elasticidad de 210 GPa, común en acero estructural. Para estos valores, la barra posee una rigidez de 7.855×10^5 kN/m. Considerando que toda la carga la toma la barra, se tiene que ésta se deforma 3.8×10^{-3} mm para una carga de 3kN. En consecuencia, la deformación de las mordazas también fue despreciada en los cálculos.

4.5.3. Datos de montaje de cada ensayo

La Tabla 4.3 muestra el largo libre entre mordazas y la temperatura ambiental de cada ensayo realizado.

Tabla 4.3 : Largo libre y temperatura de ensayo

Probeta	Largo Libre ΔL [mm]		Temperatura [°C]		Área [mm ²]
	Rutina 1	Rutina 2	Rutina 1	Rutina 2	
Trenzado I	71.5	71.5	29.0	28.0	3.7
Trenzado II	94.9	86.5	29.0	28.0	3.7
Paralelo I	54.0	54.0	28.0	28.0	3.7
Paralelo II	69.1	69.1	28.0	28.0	3.7

En todos los casos, se tenía que la fuerza en la posición inicial oscilaba entre 0 y 0.2 kN (5 lbf) aproximadamente. Esto induciría hasta 6 MPa de tensión en las probetas, lo que fue despreciado en los cálculos.

4.5.4. Formato y Proceso de los Registros

De cada uno de los ensayos se obtuvo un archivo de texto con los datos, en voltaje, de la celda de carga y el desplazamiento de las mordazas. Para el proceso de los datos se empleó el programa *Matlab v.7.0.1* con el cual se convirtieron los datos de volts a sus unidades correspondientes de acuerdo a los valores de la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 : Datos de calibración MTS

Celda de Carga	1 Volt equivale a:
Celda de Carga	500 lbf
Desplazamiento	0.5 in

Se cortaron los registros de modo que sólo quedaran los datos válidos, ya que se tenía una gran cantidad de datos irrelevantes desde el instante en que se empezó a grabar hasta que comenzó el ensayo, y entre su término y la detención del registro de información. Luego, se aplicó una rutina que calcula las curvas de tensión vs deformación y manipula los datos para obtener arreglos de los registros en unidades del S.I (en este caso, kN para la fuerza y MPa para la tensión). Finalmente se corrió una segunda rutina que separa la información de los registros en los distintos ciclos de carga y, para cada uno de ellos, calcula los parámetros que se describen en el capítulo siguiente.

Capítulo 5: Resultados Experimentales

5.1. Parámetros Calculados

La Figura 5-1 muestra un esquema de los parámetros que se calcularon para cada uno de los ciclos de carga obtenidos en los ensayos.

- **Módulo de Elasticidad Austenítico E :**

Corresponde a la pendiente del tramo inicial lineal de cada ciclo. En esta etapa, el material se encuentra en fase austenítica y se deforma lineal y elásticamente. Se determinó mediante una regresión lineal. El rango elástico fue determinado por inspección visual, sin embargo, el número de puntos considerados para la regresión fue el máximo número que permitiera obtener un índice de correlación r^2 mayor que 0.99.

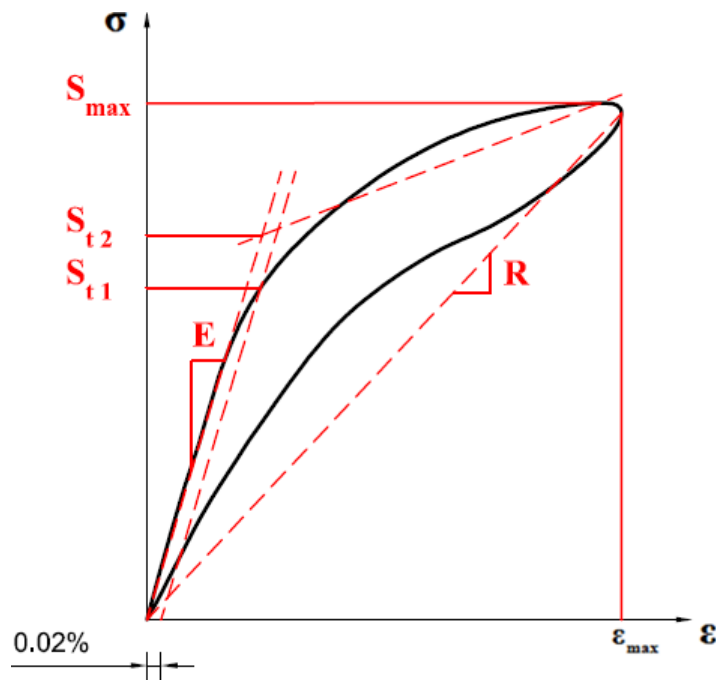


Figura 5-1 : Parámetros calculados

- **Esfuerzo de Transformación S_t :**

Es el valor de la tensión en la que se inicia la transformación martensítica inducida por esfuerzos. Se calculó de dos maneras distintas: el método de la recta desplazada y el método bilineal. El primero consiste en encontrar la intersección entre la curva de esfuerzo – deformación y una recta paralela a la del módulo de elasticidad, desplazada en 0.02% (S_{t1} en la Figura 5-1). El segundo consiste en modelar

el tramo creciente de la curva con dos rectas, el valor del esfuerzo de transformación estará dado por la intersección entre ellas (S_{t2} en la Figura 5-1). La primera recta tiene como pendiente el valor del módulo de elasticidad, la segunda recta se obtiene haciendo una regresión lineal, desde el punto de intersección entre la curva y una recta desplazada en 0.05%, similar a la utilizada en el primer método, hasta el punto de máximo esfuerzo.

- **Rigidez Secante R :**

Corresponde a la pendiente de la recta que une el origen con el punto de máxima deformación de la curva.

- **Deformación Máxima Efectiva ε_{max} :**

Es el valor máximo efectivo alcanzado por la deformación.

- **Tensión Máxima Efectiva S_{max} :**

Es el valor máximo alcanzado por la tensión.

- **Factor de Amortiguamiento Viscoso Equivalente ξ_{eq} :**

Corresponde a la razón de amortiguamiento crítico de la probeta para el ciclo en estudio al ser modelada como un sistema de un grado de libertad con un disipador viscoelástico. Su valor se calcula empleando las áreas esquematizadas en la Figura 5-2 de la siguiente forma (Chopra, 2001):

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{4\pi \cdot E_s} \quad (5.1)$$

En caso de que existan deformaciones remanentes, el origen del sistema de referencia empleado para el cálculo de las áreas se traslada al punto de mínima deformación de la curva en estudio.

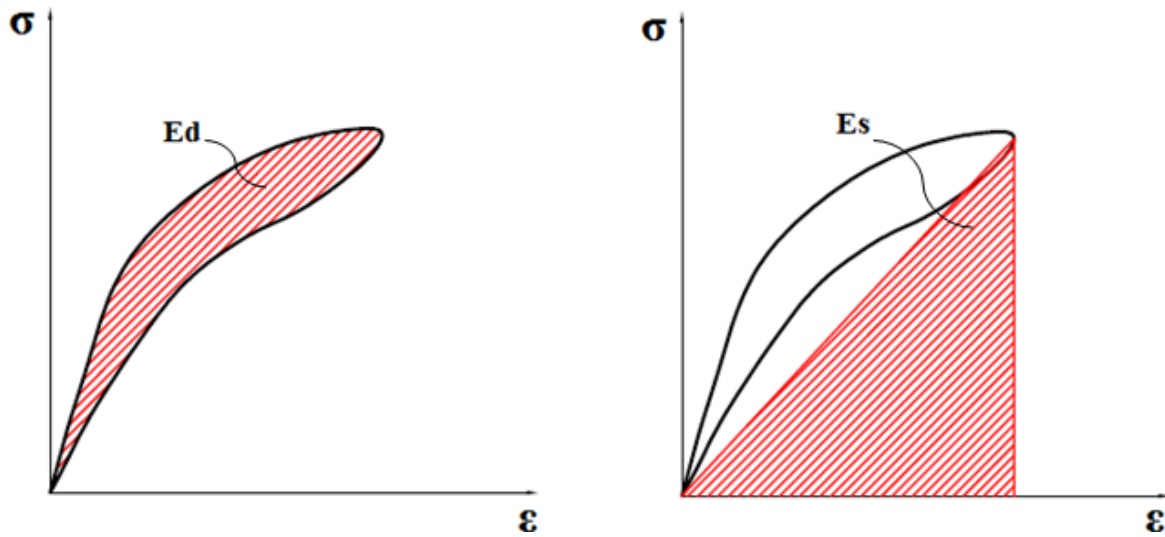


Figura 5-2 : Áreas que se emplean para calcular el factor de amortiguamiento viscoso equivalente

- **Deformación Remanente Acumulada ε_R y Deformación Remanente Relativa δ_ε :**

La deformación remanente acumulada corresponde a la deformación permanente total en la probeta luego de cada ciclo de carga (B en Figura 5-3). La deformación remanente relativa corresponde al aumento en la deformación permanente respecto al ciclo anterior (B – A en Figura 5-3).

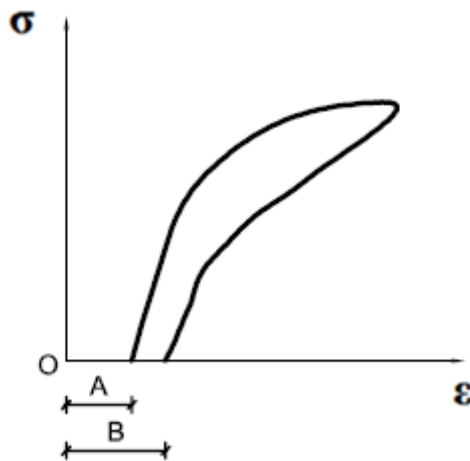


Figura 5-3 : Deformaciones remanentes

5.2. Ensayos Cíclicos a Amplitud Constante

Se incluyen a continuación los resultados obtenidos para los ensayos a amplitud constante, correspondientes a la rutina 1 de ensayo, descrita en la sección 4.5.2. Se presentan las curvas de tensión vs deformación y los parámetros calculados para cada ciclo. Al final de cada sección se incluye una tabla con el resumen de los valores de las propiedades calculadas para cada ciclo del ensayo.

5.2.1. Ensayos de Probetas de Alambres Trenzados

5.2.1.1. Gráficos de Tensión vs Deformación

A continuación se muestran las curvas de tensión vs deformación obtenidas para las probetas 1 y 2 (Figura 5-4 y Figura 5-5, respectivamente). Se observa un comportamiento similar al obtenido por Marivil (2007) al ensayar alambres individuales de 0.5 mm de diámetro.

En ambos gráficos el primer ciclo de la curva difiere considerablemente del resto. Esto es consistente con los registros de trabajos anteriores con aleaciones de CuAlBe (Montecinos et al., 2005; Marivil, 2007; Zhang et al. 2008). Usualmente este ciclo no se considera en el cálculo de las propiedades del material. También se observa que los primeros ciclos no se cierran por completo debido a una deformación permanente en el material, lo que hace que las curvas de histéresis se desplacen hacia la derecha hasta estabilizarse entre los ciclos 5 y 10. Esto es común en las aleaciones con memoria de forma y se conoce como efecto de entrenamiento (Dolce & Cardone, 2001; Sepúlveda et al., 2008).

Otro efecto, también denominado efecto de entrenamiento, ocurre en cables trenzados, independiente del tipo de material. En este caso, las variaciones en las propiedades mecánicas durante los primeros ciclos de carga se deben al reacomodo de los elementos que conforman el cable. Para evitar confusiones, el efecto de entrenamiento debido al reacomodo de los elementos será denominado *efecto de reacomodo*.

En la Figura 5-6 se superponen las curvas obtenidas para ambas probetas para verificar que los ensayos sean reproducibles. Se observa que en la curva de la probeta 2 las tensiones máximas son levemente menores, así como la rigidez de la probeta. Esta diferencia se atribuye a imperfecciones en el trenzado del cable, específicamente, una disminución en el ángulo de trenzado de la primera capa de la probeta 1 al momento de pasarla por los discos para trenzar la segunda capa.

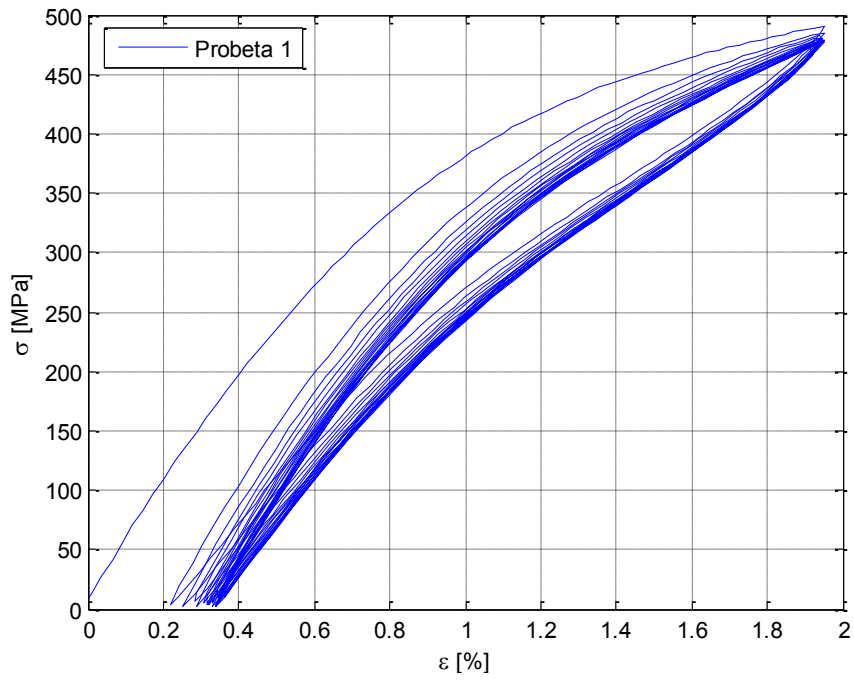


Figura 5-4 : Tensión vs deformación, probeta 1, rutina 1, cables trenzados

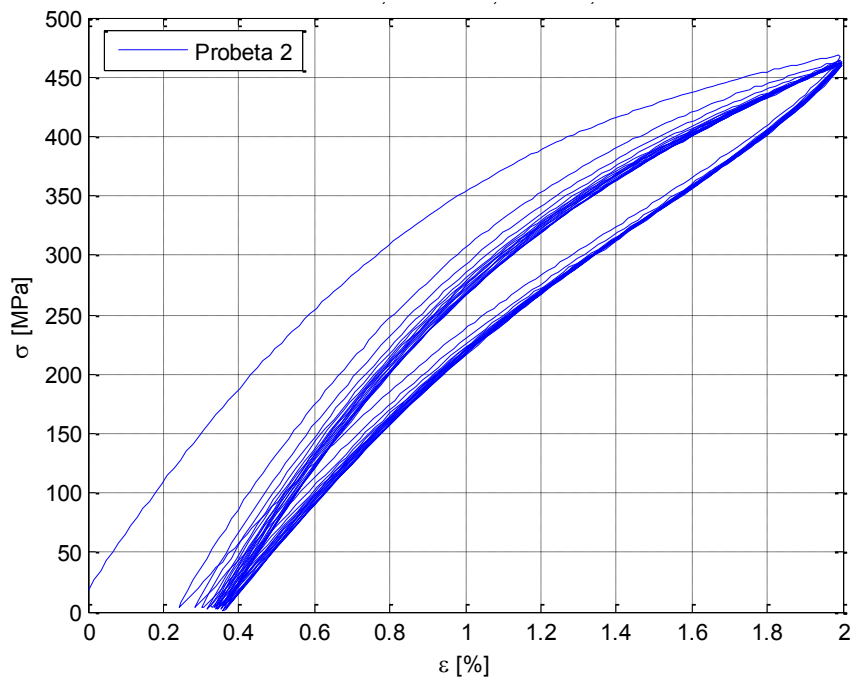


Figura 5-5 : Tensión vs deformación, probeta 2, rutina 1, cables trenzados

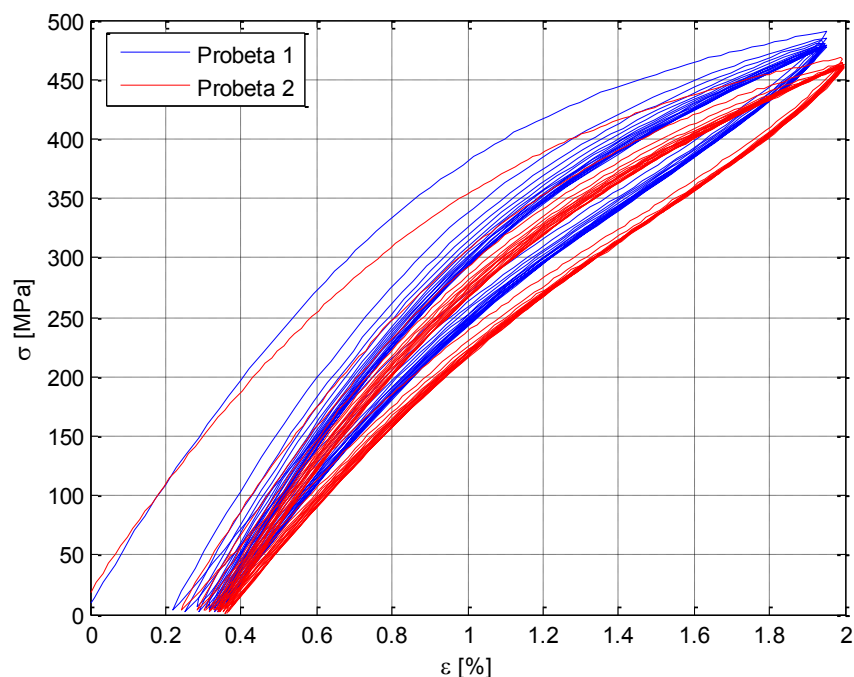


Figura 5-6 : Tensión vs deformación, probetas 1 y 2 superpuestas, rutina 1, cables trenzados

5.2.1.2. Módulos de Elasticidad

El módulo de elasticidad del cable en ambas probetas es próximo a 52 GPa (Figura 5-7). Se observa que se mantiene constante con el número de ciclos (exceptuando el primero), lo que sugiere que no hay degradación o daño por fatiga en el material. La variación del primer ciclo se explica por los efectos de entrenamiento y reacomodo que sufre la probeta.

Por otra parte, en los estudios en alambres realizados por Mir (2005) y Marivil (2007) se listan los valores obtenidos para el módulo de elasticidad para el segundo ciclo de carga. Para una temperatura de 25°C y un tamaño de grano nominal de 60 μm , Mir (2005) obtuvo valores entre los 68 y 80 GPa, mientras que Marivil (2005) obtuvo 52 GPa. Al comparar dichos resultados con los que se indican en la Figura 5-7, se observa que el módulo de elasticidad de los cables trenzados decae entre un 24% y un 35% respecto de los valores obtenidos por Mir (2005), y que no hay variación con lo obtenido por Marivil (2007). El decaimiento se explica por la variación en la rigidez del elemento al aumentar el ángulo de trenzado. El que no haya variación con respecto a los resultados de Marivil (2007) sugiere que pueden haber variaciones en la microestructura del material ensayado, o bien, que existen errores en el método de cálculo del módulo de elasticidad. En el estudio realizado por Araya (2009) se menciona la gran dispersión que tienen los módulos de elasticidad en los trabajos antes mencionados. En él, la dispersión se asocia a que al inicio del ensayo se generan distorsiones en los datos producto del acomodo de las mordazas.

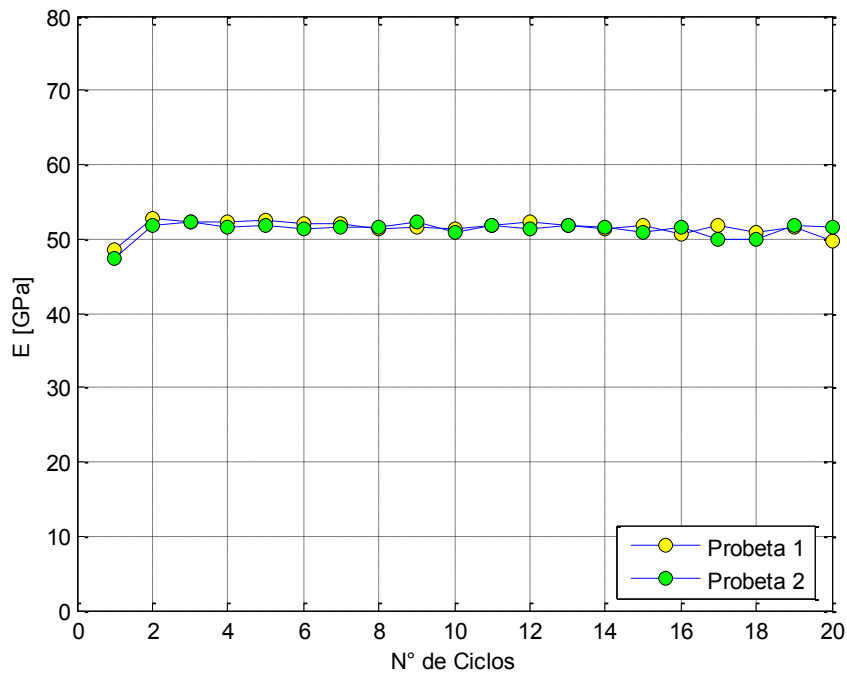


Figura 5-7 : Módulos de elasticidad, rutina 1, cables trenzados

5.2.1.3. Esfuerzos de Transformación

La Figura 5-8 muestra la variación del esfuerzo de transformación para ambas probetas, utilizando los dos métodos descritos en la sección 5.1. Dependiendo del método empleado, los efectos de entrenamiento y reacomodo se manifiestan de distinta forma. Para el caso del método de la recta paralela, se observa que sólo el primer ciclo varía respecto al resto. El método bilineal, en cambio, indica que los valores se estabilizan a partir del quinto ciclo.

Se observa además que los valores obtenidos para las probetas 1 y 2 difieren en cerca de 50 MPa. Estas diferencias se explican por imperfecciones en el hilado del cable.

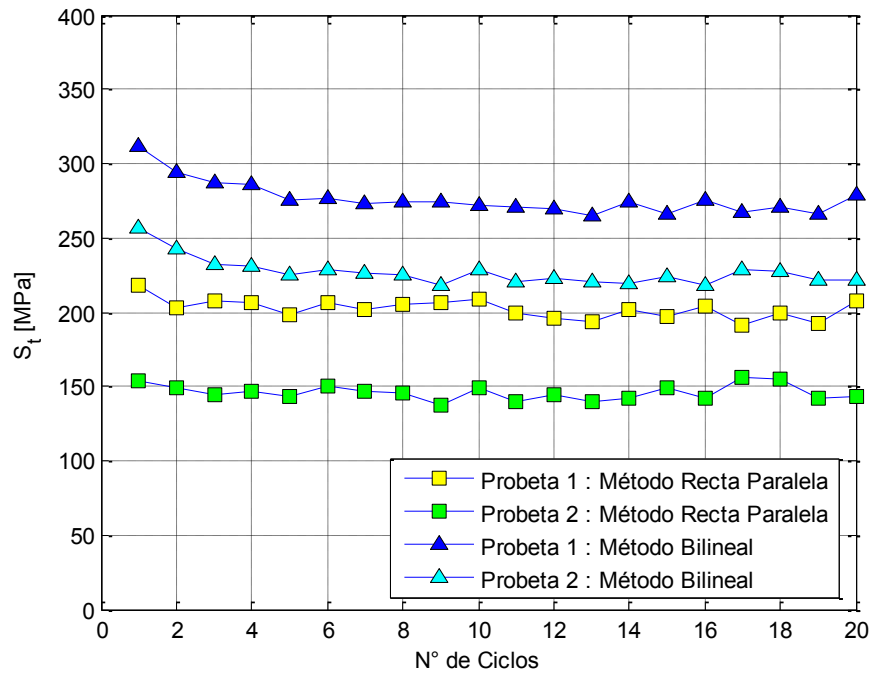


Figura 5-8 : Esfuerzos de Transformación, rutina 1, cables trenzados

5.2.1.4. Rigidez Secante

Los valores obtenidos para la rigidez secante se ilustran en la Figura 5-9. Se observa que éstos se mantienen relativamente constantes, con un valor cercano a los 25 y 23 GPa, para las probetas 1 y 2, respectivamente. Lo anterior indica que la tensión máxima en la probeta no varía significativamente. Más importante, se observa que no hay degradación con el número de ciclos, lo que indica que no hay desgaste en el material debido a fatiga.

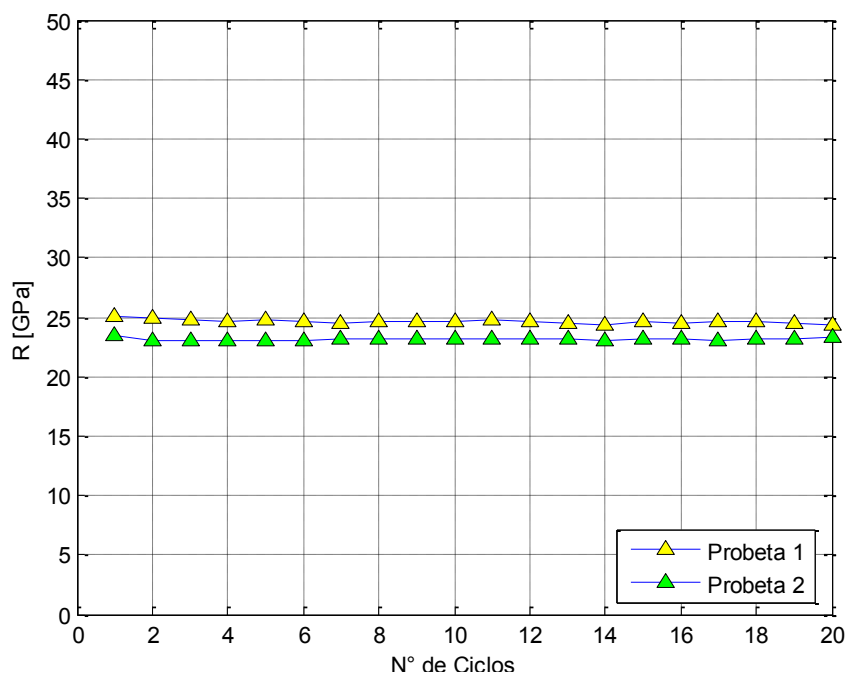


Figura 5-9 : Rigidez secante, rutina 1, cables trenzados

5.2.1.5. Deformaciones y Tensiones Máximas

La deformación nominal impuesta en la rutina 1 de ensayo fue del 2%. Debido a que el ensayo fue controlado por la deformación global del cable, fue necesario medir la distancia inicial entre mordazas y luego calcular el 2% de la deformación. En este proceso es probable que haya habido errores de medición así como pérdidas de precisión por efectos de redondeo. En consecuencia, la deformación real difiere de la nominal. Para el caso de la probeta 1, se observa que las deformaciones reales máximas alcanzadas son cercanas al 1.95% mientras que en la probeta 2 las deformaciones se mantienen alrededor del 2%.

Con respecto a los esfuerzos máximos alcanzados, en la Figura 5-11 se observa que estos están en torno a los 480 MPa para la probeta 1 y 460 MPa para la probeta 2. El hecho de que la probeta con menores deformaciones máximas efectivas alcance esfuerzos máximos mayores sugiere que puede haber existido un leve deslizamiento de las mordazas durante el ensayo de la segunda probeta, sin embargo, las curvas de tensión – deformación (Figura 5-4 y Figura 5-5) no muestran indicios de ello. También es posible que esto se haya debido a que los cables poseían una leve curvatura producto del proceso de tratamiento térmico de los alambres, con lo cual la posición original sin deformar correspondería a una deformación real levemente superior al 0%. No obstante, esto es poco probable debido a que este efecto se eliminaría con la carga oscilante entre 0 y 0.02 kN de la máquina en su posición original (suficientes para inducir hasta 5.4 MPa de tensión en la probeta). Otra opción más probable es que existan leves diferencias en el trenzado de los alambres que incidan en su comportamiento global. Si bien el proceso de trenzado es el mismo para ambas probetas, la curvatura

con que quedaron los alambres después de los tratamientos térmicos pudo haber generado pequeñas imperfecciones en el trenzado del cable.

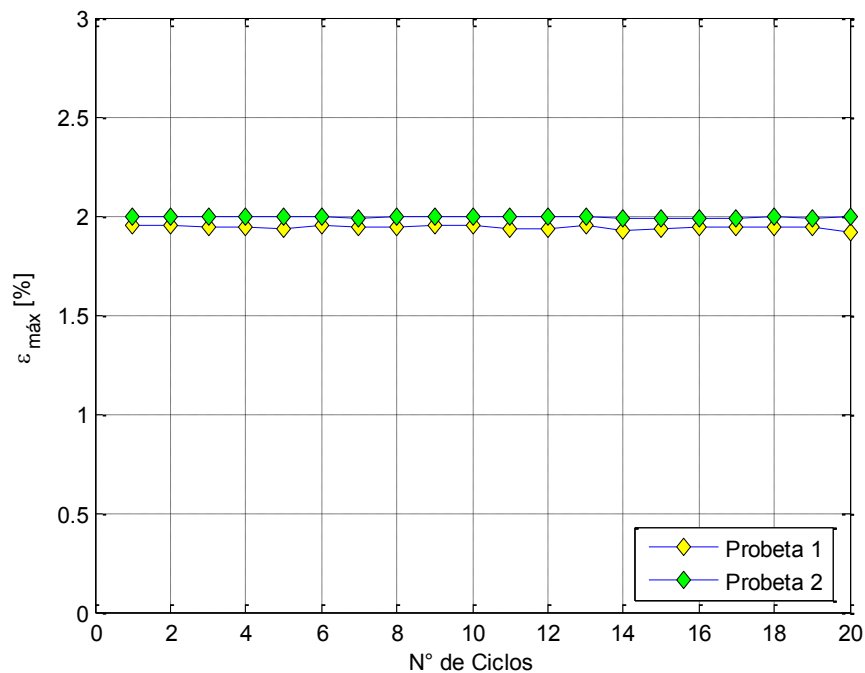


Figura 5-10 : Deformaciones máximas efectivas, rutina 1, cables trenzados

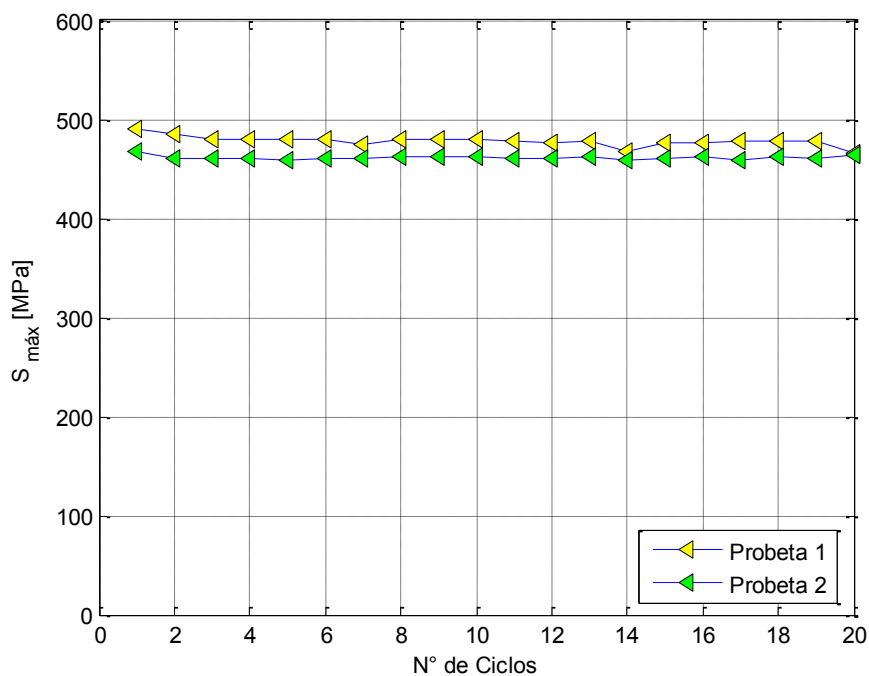


Figura 5-11 : Esfuerzos máximos, rutina 1, cables trenzados

5.2.1.6. Factores de Amortiguamiento Equivalente

En la Figura 5-12 se muestra la evolución de los factores de amortiguamiento viscoso equivalente con el número de ciclos. En ella se nota que éstos oscilan entre un 1.5% y un 2% una vez concluido el efecto de entrenamiento de los 5 primeros ciclos.

Los valores obtenidos para el amortiguamiento son bajos en comparación con los valores típicos de otros elementos estructurales como el acero (3%) o el hormigón armado (5%).

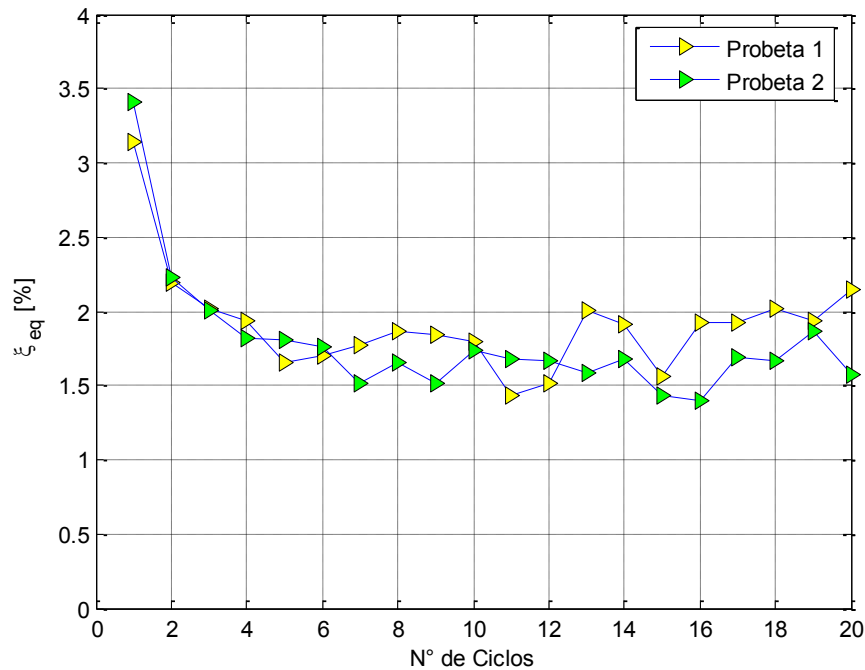


Figura 5-12 : Factores de amortiguamiento equivalente, rutina 1, cables trenzados

5.2.1.7. Deformaciones Remanentes

La Figura 5-13 muestra la evolución de la deformación remanente acumulada. Se nota que la tasa de crecimiento de ésta disminuye y tiende a estabilizarse con el número de ciclos. De esta forma, la deformación remanente relativa disminuye con cada ciclo de carga hasta alcanzar valores despreciables. Este fenómeno se ha registrado en numerosos trabajos con aleaciones con memoria de forma, tanto en Nitinol como en aleaciones basadas en cobre (Dolce & Cardone, 2001b; Marivil 2007; Araya, 2009; entre otros). Lo anterior se explica porque el efecto de entrenamiento es ocasionado por un *fenómeno de estabilización de la martensita*, que actúa progresivamente con los ciclos de carga (Araya, 2009). El concepto de estabilización de la martensita corresponde a una variación en las temperaturas críticas de cambio de fase del material que puede ser generado por diversos mecanismos químicos, mecánicos o estructurales. No se ahondará en los principios teóricos de dicho efecto ya que escapa del objeto de estudio de esta investigación. No obstante, el lector interesado puede consultar el trabajo de Araya (2009) para tener una idea general de este fenómeno.

Es importante mencionar que las fluctuaciones que se observan en los ciclos finales se deben a la resolución empleada en la digitalización de las curvas y no a un acortamiento de las probetas.

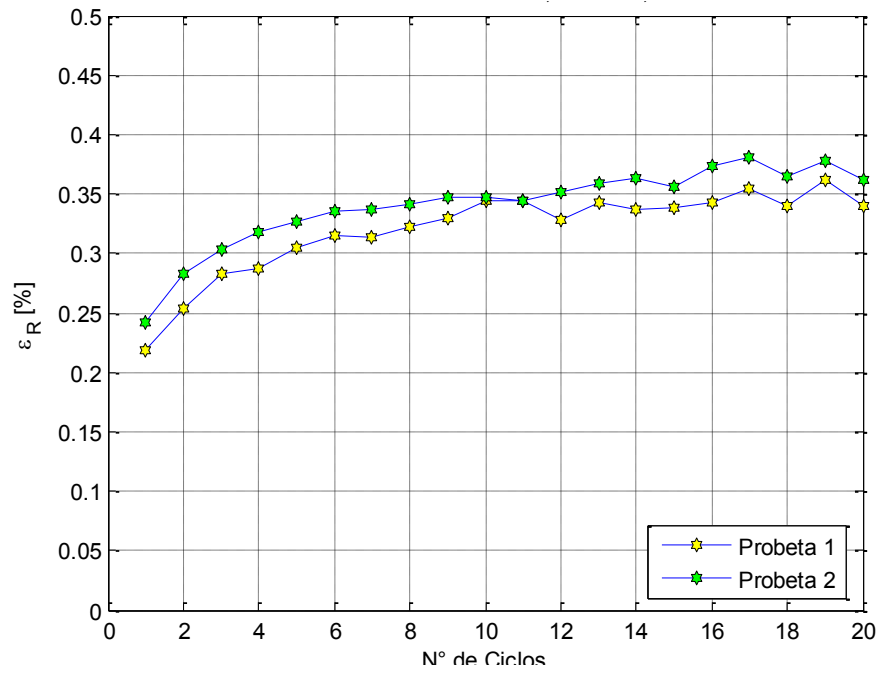


Figura 5-13 : Deformación remanente acumulada, rutina 1, cables trenzados

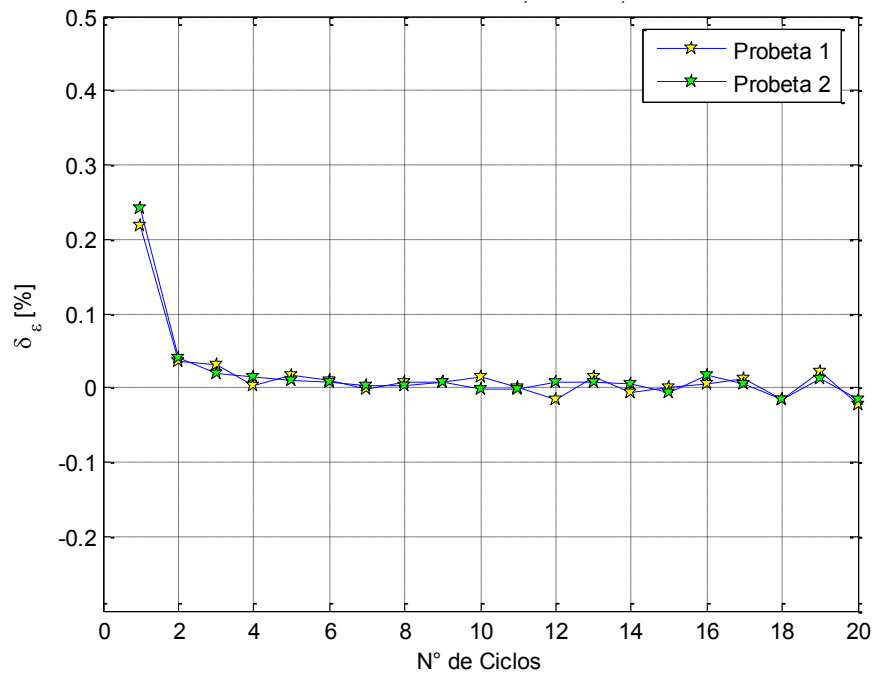


Figura 5-14 : Deformación remanente relativa, rutina 1, cables trenzados

En la Tabla 5.1 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 5.1 : Resumen de parámetros calculados, rutina 1, cables trenzados

Ciclo	E1 [GPa]	E2 [GPa]	S _{t1} 1 [MPa]	S _{t1} 2 [MPa]	S _{t2} 1 [MPa]	S _{t2} 2 [MPa]	R1 [GPa]	R2 [GPa]	ε _{max} 1 [%]	ε _{max} 2 [%]	S _{max} 1 [MPa]	S _{max} 2 [MPa]	ξ _{eq} 1 [%]	ξ _{eq} 2 [%]	ε _R 1 [%]	ε _R 2 [%]
1	48.5	47.4	217.9	153.8	287.5	235.8	25.1	23.4	1.952	1.995	490.0	467.2	3.140	3.409	0.218	0.242
2	52.7	51.9	203.1	149.3	272.1	219.8	24.9	23.1	1.950	1.993	484.8	460.4	2.196	2.228	0.253	0.283
3	52.2	52.3	207.1	144.4	264.6	211.1	24.7	23.1	1.944	1.997	480.4	460.3	2.023	2.010	0.283	0.303
4	52.2	51.5	205.9	146.3	263.6	208.9	24.7	23.1	1.946	1.995	480.3	460.4	1.940	1.819	0.287	0.317
5	52.4	51.8	198.0	143.8	257.3	204.9	24.8	23.0	1.937	1.994	480.4	458.6	1.657	1.806	0.305	0.327
6	52.2	51.4	206.6	150.1	258.5	208.0	24.6	23.1	1.948	1.995	480.1	460.5	1.703	1.764	0.315	0.335
7	52.1	51.5	201.5	147.3	254.0	206.2	24.5	23.1	1.940	1.991	475.3	460.4	1.777	1.519	0.313	0.337
8	51.3	51.7	205.4	145.6	254.3	203.7	24.6	23.1	1.947	1.997	479.1	461.5	1.867	1.656	0.322	0.341
9	51.6	52.3	206.4	137.1	253.7	198.9	24.6	23.2	1.950	1.992	479.0	461.9	1.846	1.517	0.329	0.347
10	51.4	50.8	208.3	149.0	257.1	205.8	24.6	23.1	1.948	1.996	479.2	461.9	1.798	1.737	0.344	0.347
11	51.8	51.8	199.9	139.5	255.5	200.8	24.7	23.1	1.933	1.994	477.7	461.2	1.433	1.676	0.344	0.344
12	52.3	51.3	195.8	144.9	245.2	203.6	24.6	23.1	1.934	1.992	476.3	460.1	1.516	1.668	0.328	0.352
13	51.8	51.8	193.9	140.3	248.3	199.3	24.5	23.2	1.949	1.996	477.8	462.9	2.002	1.582	0.342	0.359
14	51.3	51.5	202.0	141.9	257.4	203.1	24.3	23.0	1.926	1.990	468.0	458.4	1.916	1.683	0.337	0.363
15	51.9	50.9	197.3	148.8	248.5	202.1	24.6	23.2	1.938	1.983	476.6	460.2	1.565	1.437	0.338	0.356
16	50.8	51.6	203.7	141.8	257.9	199.9	24.5	23.2	1.947	1.988	476.9	461.6	1.926	1.401	0.343	0.374
17	51.8	50.0	191.0	156.5	248.3	210.7	24.6	23.1	1.943	1.988	477.8	458.7	1.919	1.691	0.355	0.380
18	51.0	50.0	199.1	155.3	252.0	208.7	24.6	23.2	1.947	1.996	478.7	462.8	2.022	1.665	0.340	0.365
19	51.5	51.8	192.4	142.5	246.4	200.5	24.5	23.1	1.947	1.988	477.5	459.9	1.935	1.862	0.361	0.377
20	49.8	51.7	207.4	143.2	260.5	200.5	24.3	23.3	1.916	1.993	466.1	464.3	2.145	1.576	0.340	0.361

5.2.2. Ensayos de Probetas de Alambres en Paralelo

5.2.2.1. Gráficos de Tensión vs Deformación

Al igual que en el caso de los cables trenzados, en la Figura 5-15 y en la Figura 5-16 se ve que en los alambres en paralelo también se produce el efecto de entrenamiento y que el desplazamiento de las curvas con los ciclos de carga comienza a estabilizarse entre los ciclos 5 y 10 de cada ensayo. Al inicio del primer ciclo, en la Figura 5-15, se observa una caída abrupta en la tensión al sobrepasar los 350 MPa debido a que uno de los alambres se cortó en la zona de las mordazas. Al cortarse el alambre, la fuerza necesaria para llegar al 2% de deformación es menor que lo se requiere para la probeta 1. El corte implica que desde ese punto en adelante se corrija el área empleada para calcular la tensión. La Figura 5-17 corresponde al mismo gráfico con el área corregida desde ese punto en adelante.

Otros aspectos inciden en el comportamiento general de las muestras de alambres en paralelo. El efecto más importante es la diferencia entre los largos de los alambres individuales producto de las diferentes curvaturas adoptadas luego de los tratamientos térmicos. Como se mencionó en la sección 4.3, al calentar los alambres enrollados y luego templarlos estos quedan con una curvatura permanente. Lo anterior implica que las probetas de alambres en paralelo sean en realidad un conjunto de alambres que describen leves longitudes de arco distintas entre sí, efecto que disminuye al acortar el largo de la probeta. Esto genera que los alambres no trabajen todos de la misma forma ni al mismo tiempo, por lo que el área de la probeta que efectivamente trabaja es desconocida. Este efecto genera que las curvas de tensión - deformación posean una curvatura inicial antes de alcanzar la pendiente típica del rango lineal – elástico. No obstante, el efecto se pierde para cargas mayores (50 MPa en adelante, aproximadamente), cuando todos los alambres trabajan de la misma forma.

Por otra parte, si se comparan las curvas con las obtenidas para las probetas de cable trenzado (Figura 5-4 y Figura 5-5) se observa que los alambres trenzados alcanzan esfuerzos máximos y módulos de elasticidad menores a los obtenidos para los alambres en paralelo. Esto se debe a que la deformación unitaria que experimentan los elementos de las capas exteriores del cable es menor a la que sufre el núcleo, por lo que la fuerza necesaria para alcanzar una deformación global determinada es menor en el caso del cable trenzado.

En la Figura 5-18 se superponen las curvas obtenidas para ambas probetas para verificar que los ensayos sean reproducibles. Se observa que ambas probetas siguen trayectorias similares, por lo que se concluye que los ensayos son reproducibles.

Es importante destacar que el estado tensional al que están sometidos los cables trenzados es diferente del que presentan los alambres en paralelo. En el primer caso, los elementos del cable, debido a su orientación angular, poseen componentes torsionales que inducen momentos que no se presentan en los alambres en paralelo.

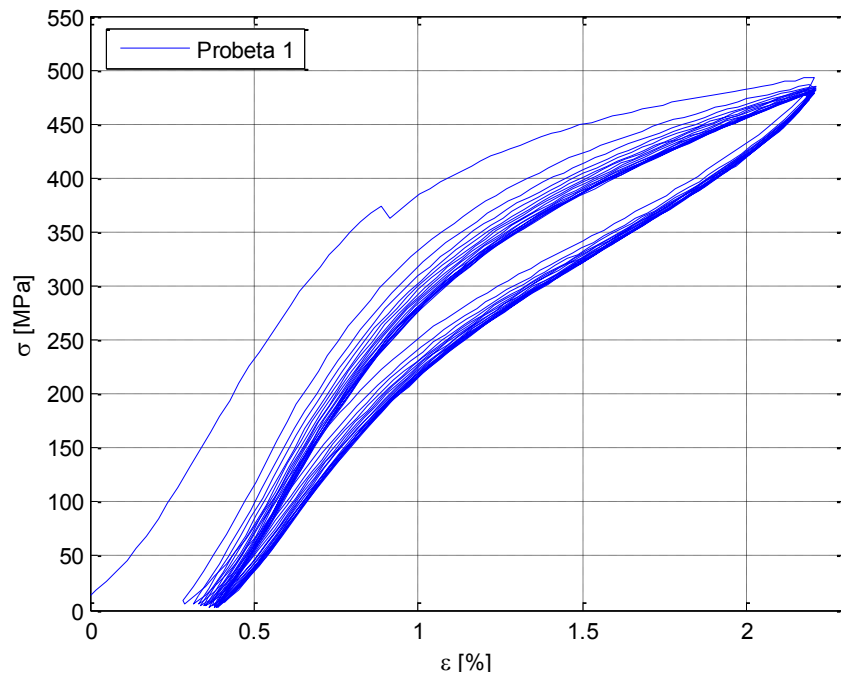


Figura 5-15 : Tensión vs deformación, probeta 1, rutina 1, alambres en paralelo

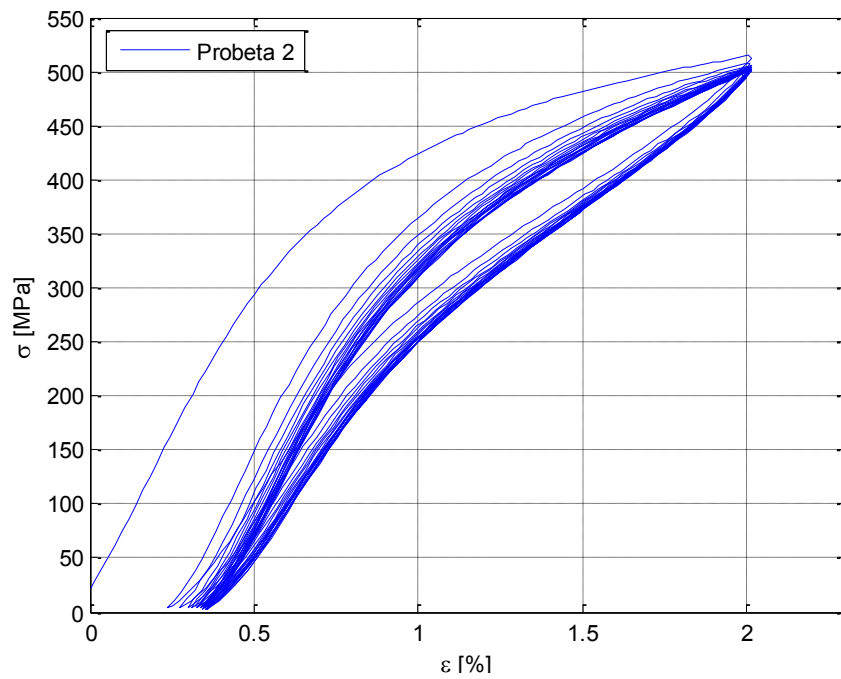


Figura 5-16 : Tensión vs deformación, probeta 2, rutina 1, alambres en paralelo

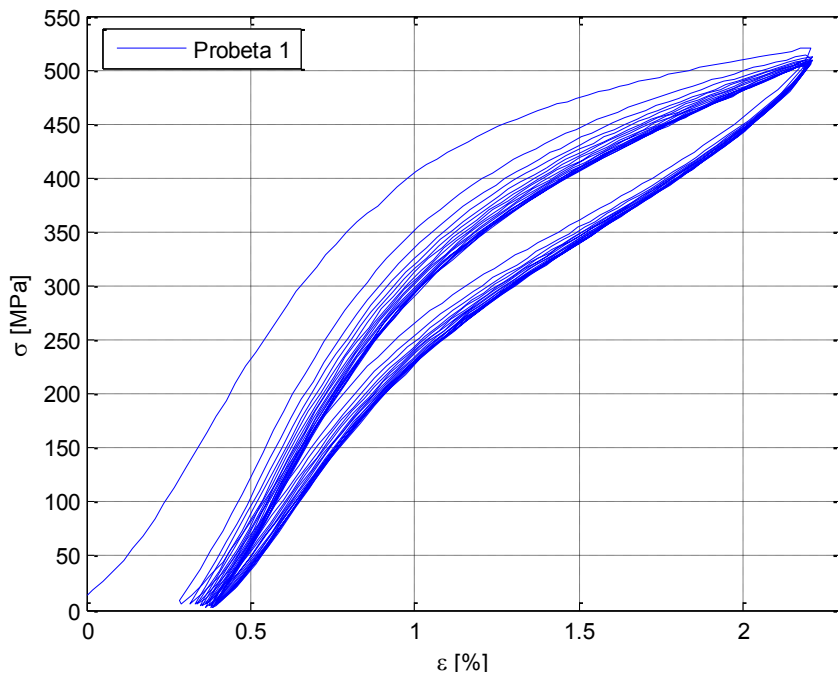


Figura 5-17 : Tensión vs deformación de la probeta 1 con el área corregida (Rutina 1, alambres en paralelo)

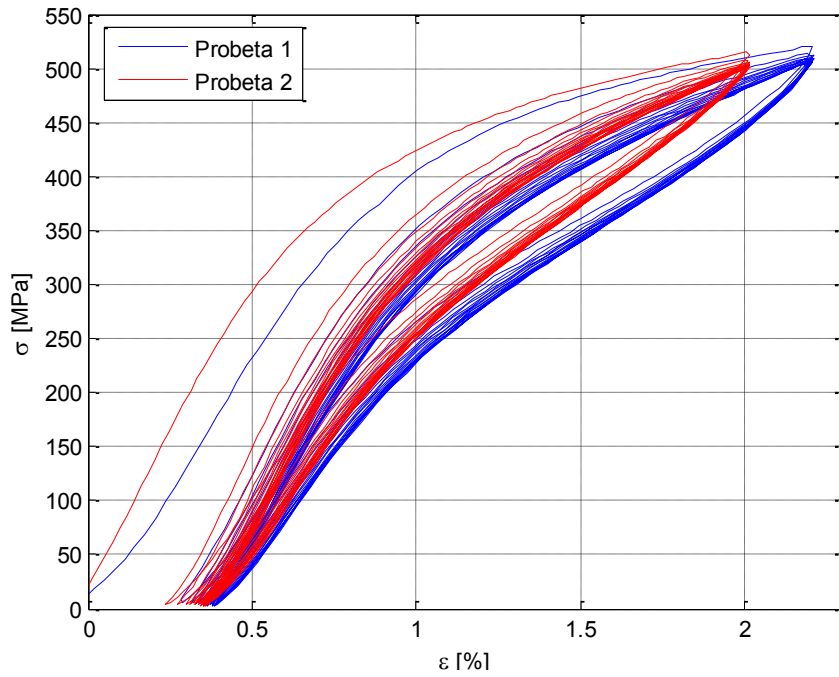


Figura 5-18 : Tensión vs deformación, probetas 1 y 2 superpuestas, rutina 1, alambres en paralelo

5.2.2.2. Módulos de Elasticidad

Debido al efecto causado por la curvatura de los alambres explicado en la sección anterior, los módulos de elasticidad fueron calculados mediante una regresión lineal para los tramos de las curvas comprendidos entre los 50 y 150 MPa (salvo para el primer ciclo de la probeta 1, donde se comenzó en 70 MPa)

Al igual que para el caso de los cables trenzados, los módulos de elasticidad obtenidos para las probetas de alambres en paralelo no fluctúan de forma significativa con el número de ciclos y los valores resultan similares a los resultados de Mir (2005) y Marivil (2007) para un alambres individual. No obstante, la probeta 1 presenta una leve tendencia a la baja en los primeros 10 ciclos, para luego estabilizarse en torno a los 56 GPa. Al comparar los valores con lo obtenido para las muestras de cable trenzado, se observa un aumento de entre un 8 y 15% en los módulos de elasticidad de alambres en paralelo. Lo anterior es consistente con la teoría desarrollada en el Capítulo 3 y se explica porque los alambres de los cables, al poseer un ángulo de trenzado, tienen un largo efectivo mayor que el de las probetas de alambres en paralelo, por lo que sufren una deformación unitaria menor. De esta manera, la tensión inducida en los alambres trenzados es menor que si éstos estuvieran dispuestos en forma paralela.

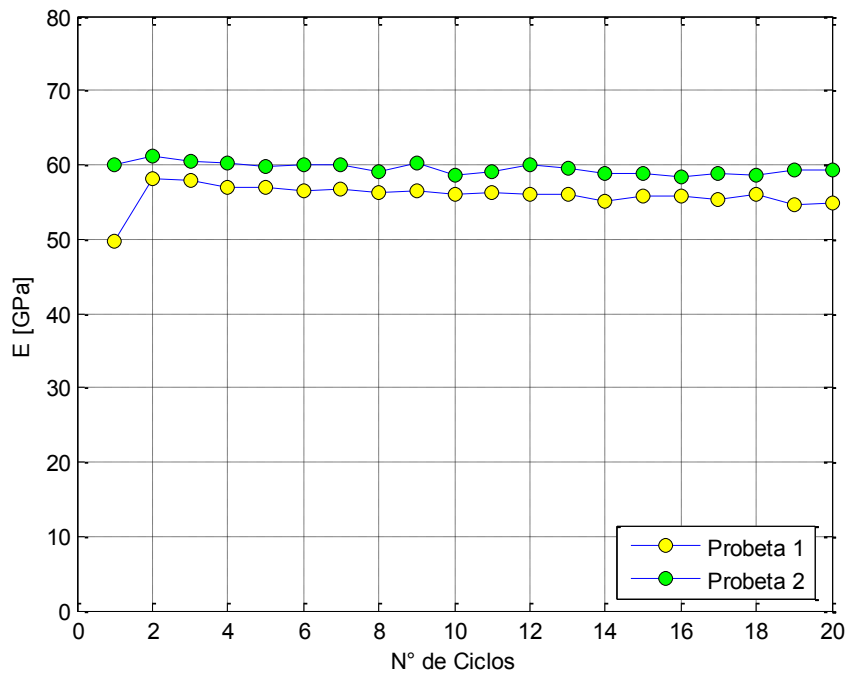


Figura 5-19 : Módulos de elasticidad, rutina 1, alambres en paralelo

5.2.2.3. Esfuerzos de Transformación

La Figura 5-20 muestra que la evolución del esfuerzo de transformación para alambres en paralelo es similar al obtenido para las probetas de cable trenzado (ver Figura 5-8); sin embargo, los valores en los que se estabilizan las curvas son mayores para los alambres sin trenzar. Al igual que en el caso de los cables trenzados, el efecto de entrenamiento se manifiesta de manera más significativa en los resultados obtenidos empleando el método bilineal que en los que se obtuvieron con el método de la recta paralela.

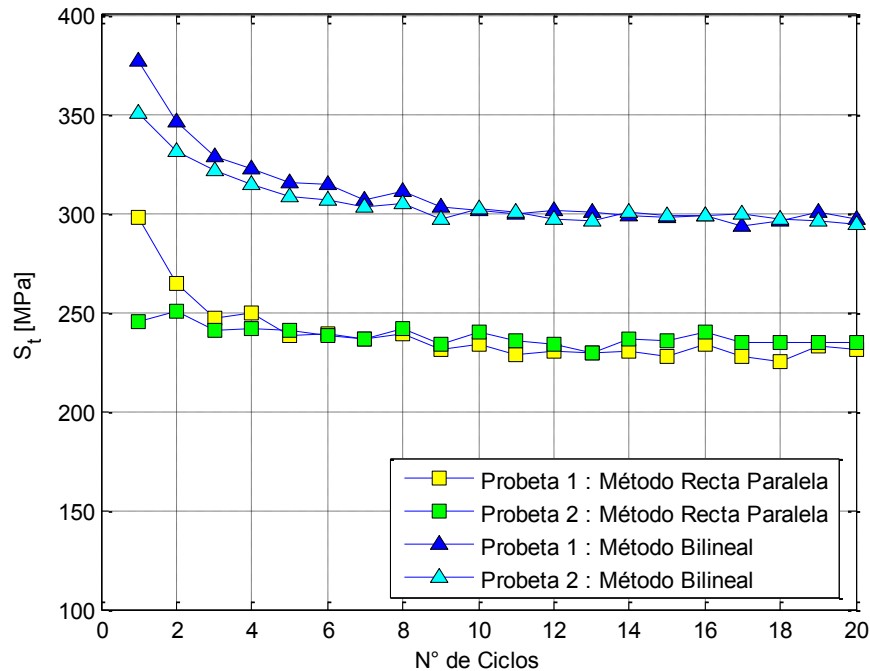


Figura 5-20 : Esfuerzos de transformación, rutina 1, alambres en paralelo

5.2.2.4. Rigidez Secante

En la Figura 5-21 se grafica la rigidez secante en función del número de ciclos. Se obtienen valores que se mantienen en torno a los 23 y 25 GPa, para las probetas 1 y 2, respectivamente. Al comparar estos resultados con los calculados para las probetas de cable trenzados (Figura 5-9), se observa que las curvas son similares y que no presentan diferencias significativas.

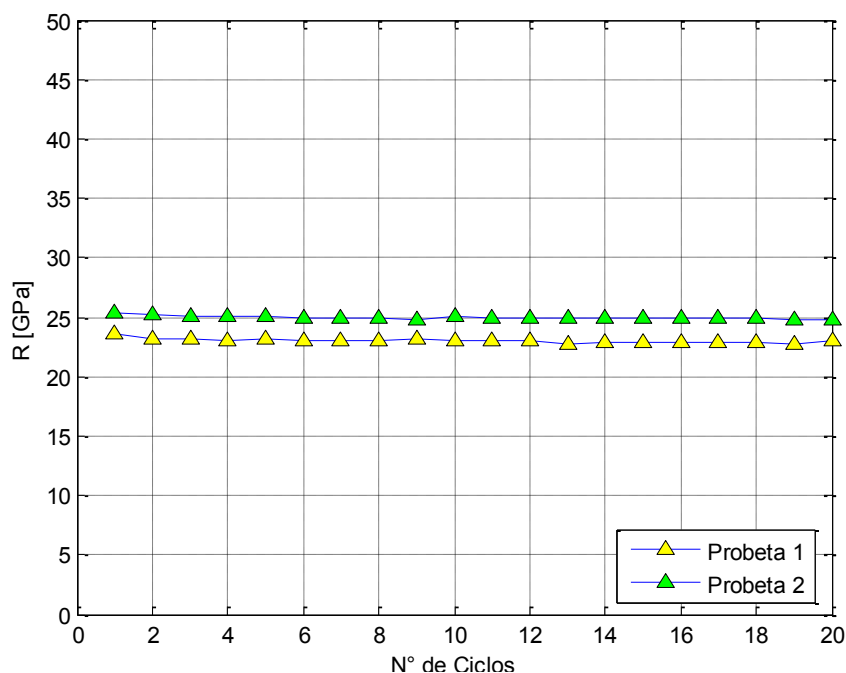


Figura 5-21 : Rigidez secante, rutina 1, alambres en paralelo

5.2.2.5. Deformaciones y Tensiones Máximas

Las deformaciones efectivas son próximas a las deformaciones nominales programadas para el ensayo (2.2% para la probeta 1 y 2% para la probeta 2). Los esfuerzos máximos alcanzados en cada ciclo se mantienen relativamente estables desde el ciclo 8 en adelante. Si se observa la Figura 5-23 se nota que el comportamiento de los esfuerzos máximos obtenidos para ambas muestras es similar y describen curvas muy parecidas, donde la correspondiente a la probeta 1 va por encima de la curva de la probeta 2 al alcanzar una mayor deformación máxima.

Al comparar las tensiones máximas alcanzadas (ver Figura 5-11 y Figura 5-23), se observa que las probetas de alambres en paralelo alcanzan valores superiores a las de cable trenzado.

En el trabajo de Marivil (2007) se exponen los resultados de un ensayo cíclico sobre una probeta de alambre de las mismas características que el empleado (aleación, tamaño de grano y diámetro). En dicha investigación, para un tamaño de grano de 60 μm , se obtuvo un valor de 546 MPa para la tensión máxima cuando la probeta fue deformada en un 2.4%. En el mismo trabajo, se observa que la tensión máxima en la probeta es sensible al tamaño de grano del material. En consecuencia, la similitud entre las tensiones máximas alcanzadas en el trabajo de Marivil (2007) y las obtenidas en esta investigación, confirma el tamaño de grano de 60 μm y corrobora la validez de los tratamientos térmicos realizados.

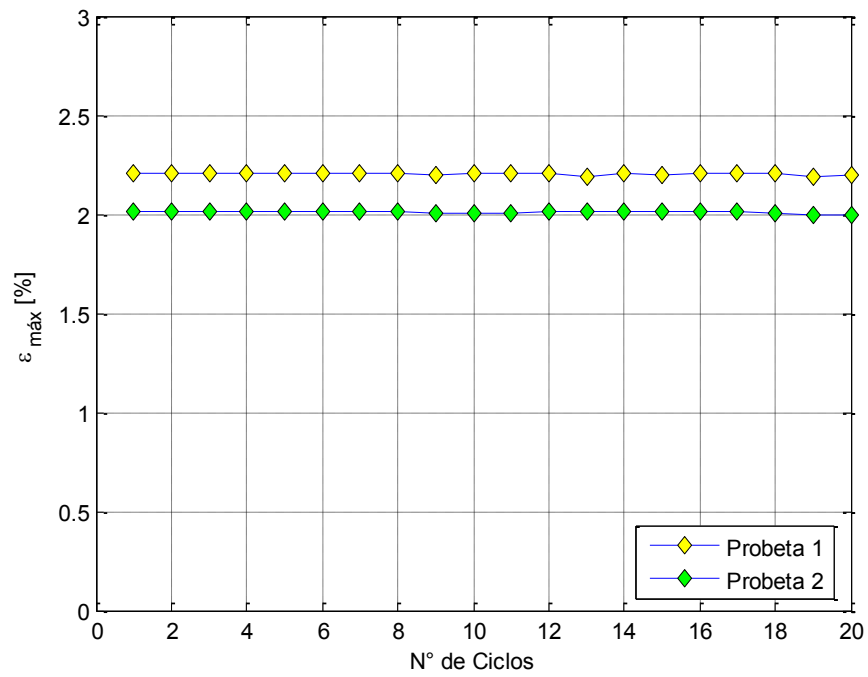


Figura 5-22 : Deformaciones máximas efectivas, rutina 1, alambres en paralelo

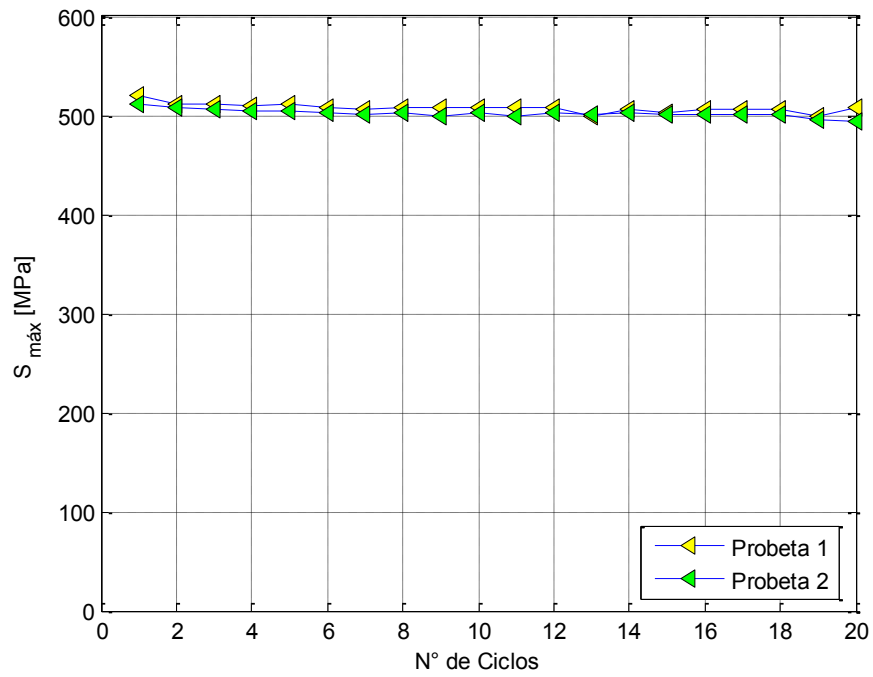


Figura 5-23 : Esfuerzos máximos, rutina 1, alambres en paralelo

5.2.2.6. Factores de Amortiguamiento Equivalente

La Figura 5-24 indica la evolución del factor de amortiguamiento viscoso equivalente con el número de ciclos. Se observa que luego del efecto de entrenamiento (ciclo 10 en adelante aproximadamente) los valores se estabilizan y oscilan en torno al 2.10% y 1.75% para las muestras 1 y 2 respectivamente. La probeta 1 presenta un mayor nivel de amortiguamiento debido a que fue sometida a deformaciones mayores.

Al comparar estos resultados con los obtenidos para las probetas de cable trenzados se observa que la capacidad disipativa de los alambres en paralelo es ligeramente superior (0.3% aproximadamente).

Se observa, además, que los resultados son próximos al valor de 1.6% determinado por Marivil (2007) para alambres de 0.5 mm de diámetro y tamaño de grano de 60 μm .

Se observa además que el factor de amortiguamiento equivalente, tanto en cables trenzados como en alambres en paralelo, es bajo en comparación con los valores comúnmente utilizados para otros materiales de construcción como el acero (3%) o el hormigón armado (5%).

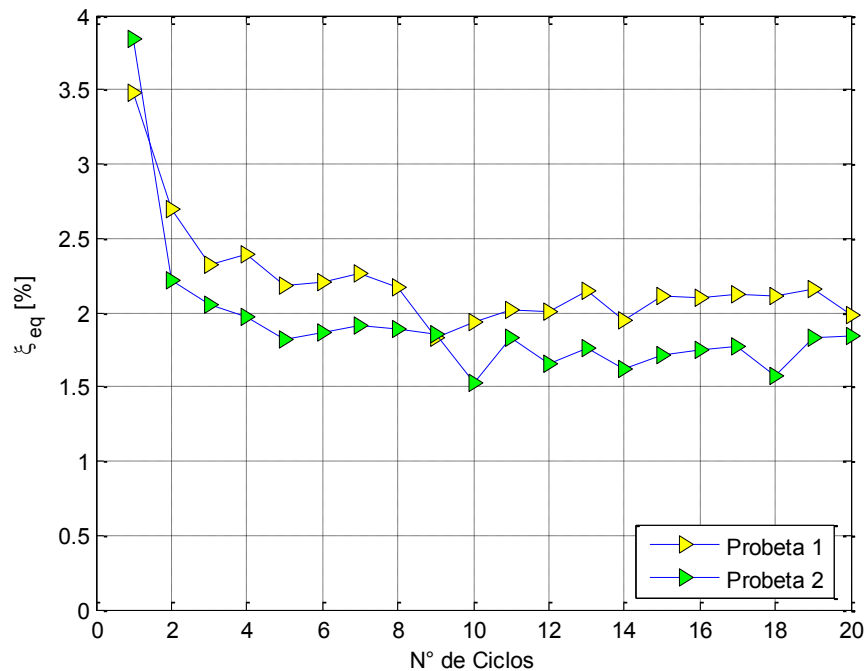


Figura 5-24 : Factores de amortiguamiento equivalente, rutina 1, alambres en paralelo

5.2.2.7. Deformaciones Remanentes

La Figura 5-25 muestra las deformaciones remanentes en la probeta luego de cada ciclo de carga. Al igual que para el caso de los cables trenzados, éstas crecen a tasa decreciente, para llegar en forma asintótica a valores entre el 0.35% y 0.4%. En consecuencia, las deformaciones relativas tienden rápidamente a valores cercanos a cero (Figura 5-26).

Al comparar los resultados para alambres en paralelo con los obtenidos para las probetas de cable trenzado se observa que las diferencias son inferiores a aquellas que se presentan entre probetas del mismo tipo (cable trenzado o alambre en paralelo). En consecuencia, no es posible determinar la influencia del trenzado en las deformaciones remanentes.

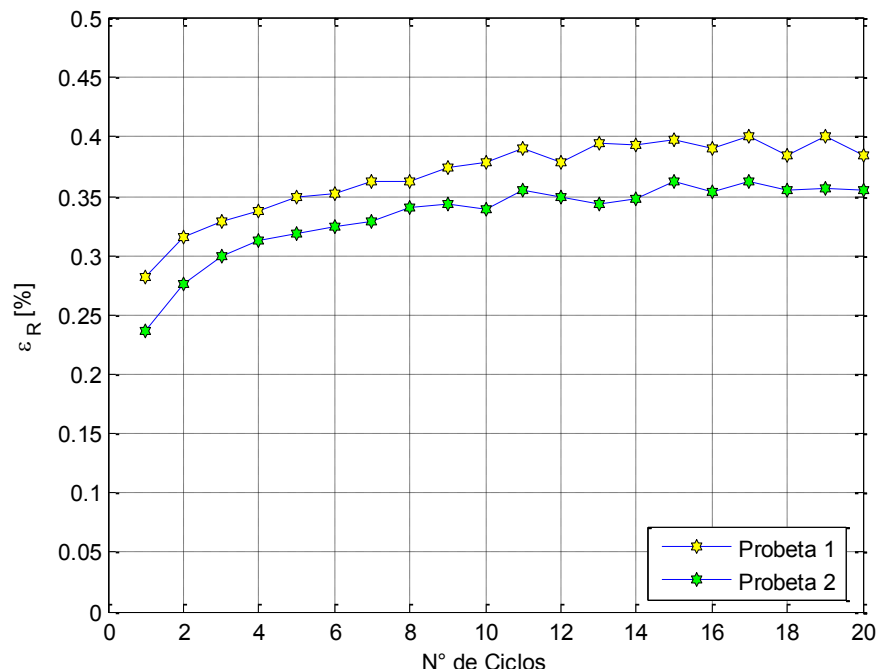


Figura 5-25 : Deformaciones remanentes, rutina 1, alambres en paralelo

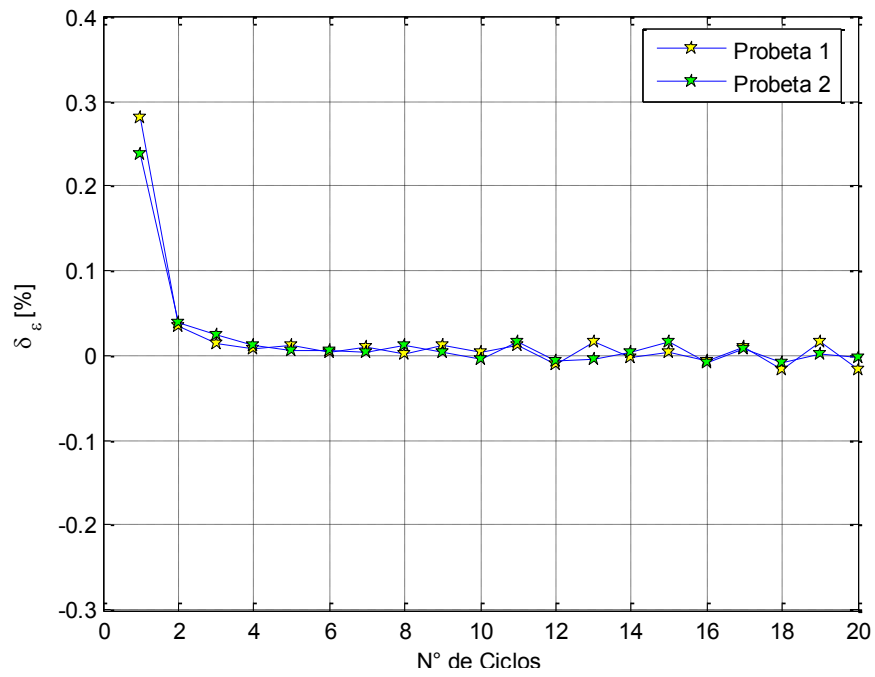


Figura 5-26 : Deformaciones remanentes relativas, rutina 1, alambres en paralelo

En la Tabla 5.2 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 5.2 : Resumen de parámetros calculados, rutina 1, alambres en paralelo

Ciclo	E1 [GPa]	E2 [GPa]	S _{t1} 1 [MPa]	S _{t1} 2 [MPa]	S _{t2} 1 [MPa]	S _{t2} 2 [MPa]	R1 [GPa]	R2 [GPa]	ε _{max} 1 [%]	ε _{max} 2 [%]	S _{max} 1 [MPa]	S _{max} 2 [MPa]	ξ _{eq} 1 [%]	ξ _{eq} 2 [%]	ε _R 1 [%]	ε _R 2 [%]
1	49.6	60.1	298.2	245.1	357.2	332.1	23.6	25.4	2.208	2.014	520.9	512.1	3.341	3.838	0.282	0.237
2	58.2	61.2	264.6	250.3	331.0	312.4	23.1	25.2	2.208	2.013	510.7	508.0	2.698	2.220	0.316	0.275
3	57.9	60.4	246.9	241.2	312.8	302.2	23.2	25.1	2.210	2.015	512.0	505.4	2.316	2.055	0.329	0.300
4	57.0	60.1	249.4	242.0	306.7	298.3	23.0	25.0	2.210	2.016	509.4	504.1	2.386	1.972	0.338	0.312
5	56.9	59.7	238.4	241.0	299.6	291.0	23.1	25.0	2.209	2.014	510.7	504.3	2.180	1.820	0.349	0.319
6	56.4	59.9	238.8	237.7	298.7	290.5	23.0	25.0	2.207	2.013	507.9	502.3	2.200	1.869	0.353	0.324
7	56.8	59.9	236.6	236.5	295.1	289.9	23.0	24.9	2.204	2.011	506.0	500.6	2.264	1.915	0.362	0.329
8	56.2	59.1	238.7	241.3	295.0	290.3	23.0	24.9	2.210	2.015	508.2	502.8	2.165	1.893	0.363	0.340
9	56.4	60.1	231.0	233.7	286.6	283.7	23.1	24.8	2.193	2.006	507.4	498.3	1.832	1.858	0.375	0.344
10	56.0	58.5	234.2	240.1	284.2	282.9	23.0	25.0	2.205	2.006	507.9	502.0	1.935	1.522	0.379	0.339
11	56.2	59.1	228.9	235.3	281.1	285.2	23.0	24.9	2.208	2.005	507.7	498.5	2.012	1.830	0.390	0.355
12	56.0	60.1	230.6	233.6	283.6	282.1	23.0	25.0	2.207	2.011	507.6	502.2	2.010	1.654	0.378	0.349
13	55.9	59.6	229.7	229.6	282.4	279.8	22.7	24.9	2.192	2.011	498.6	500.2	2.141	1.764	0.395	0.344
14	55.2	58.8	230.2	236.4	280.7	284.7	22.9	25.0	2.209	2.011	506.3	502.2	1.951	1.618	0.393	0.347
15	55.9	58.9	228.1	235.7	279.2	282.6	22.8	24.9	2.199	2.014	502.2	501.4	2.106	1.717	0.397	0.363
16	55.7	58.3	233.7	240.2	287.7	282.8	22.9	24.9	2.208	2.012	505.7	500.5	2.105	1.748	0.390	0.354
17	55.3	58.8	227.7	234.9	281.0	283.3	22.9	24.9	2.208	2.013	506.0	500.4	2.125	1.777	0.401	0.363
18	56.1	58.6	225.0	234.7	283.5	278.9	22.9	24.9	2.207	2.008	505.5	500.6	2.111	1.572	0.384	0.355
19	54.6	59.3	232.6	234.9	287.9	278.4	22.8	24.8	2.189	1.998	498.7	494.8	2.162	1.831	0.400	0.357
20	54.8	59.3	231.5	234.4	284.6	281.5	23.1	24.7	2.200	2.000	507.9	494.6	1.984	1.839	0.384	0.356

5.3. Ensayos Cíclicos a Amplitud Variable

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para los ensayos a amplitud variable, correspondientes a la rutina de ensayo 2. Al igual que en los ensayos a amplitud constante, en esta sección se incluyen los gráficos de la evolución con el número de ciclos de los distintos parámetros calculados, descritos en la sección 5.1. Al final del listado de propiedades de cada ensayo se publica una tabla resumen con los valores de todos los parámetros calculados para cada ciclo de carga.

5.3.1. Ensayos de Probetas de Alambres Trenzados

5.3.1.1. Gráficos de Tensión vs Deformación

En la Figura 5-27, se observa que la envolvente de los ciclos se ajusta a la curva de tracción monotónica encontrada por Marivil (2007) para alambres singulares de 0.5 mm de diámetro, tamaño de grano de 60 μm y bajo una temperatura de 20°C. En la probeta 1 (Figura 5-27) se notan caídas abruptas en la tensión desde el inicio de los ciclos al 5% de deformación producto del corte de numerosos alambres de la capa exterior del cable (ciclo 16 en adelante), a la altura de las mordazas. No se calcularon los parámetros descritos en la sección 5.1 para los ciclos posteriores al corte de los alambres.

A diferencia de los ensayos a amplitud constante, en esta secuencia de ensayo no se manifiestan los efectos de entrenamiento ni de reacomodo en los primeros ciclos debido a que las probetas fueron previamente cicladas aplicando la rutina 1. Sin embargo, para deformaciones mayores al 2% impuesto en el ensayo anterior sí se observa este efecto.

La Figura 5-28 muestra el ensayo de la probeta 2, donde no hubo cortes de alambres. Si se analizan los ciclos de deformación al 5% (ciclos 17 al 21), se observa que las deformaciones remanentes son del orden del 0.25% para el ciclo 17 (ver Figura 5-29), pero que el incremento de éstas se va reduciendo considerablemente en los ciclos posteriores. La Figura 5-29 muestra en detalle esta parte de la rutina para la probeta 2. En ella, se nota que los ciclos 18 a 21 tienen cada vez menos deformaciones permanentes y que el comportamiento de las curvas tiende a estabilizarse, de hecho, la deformación remanente que se produce entre los ciclos 20 y 21 es inferior al 0.05%. Es decir, se produce una suerte de efecto de entrenamiento en la serie de ciclos al 5%. Esto implica que, a pesar de haber superado el valor del límite superelástico de un 2.2% calculado y empleado en trabajos anteriores (Montecinos et al., 2005; Mir, 2005; Marivil, 2007), el material continúa exhibiendo propiedades superelásticas debido a que existe un porcentaje de martensita que no ha sido deformada plásticamente aún.

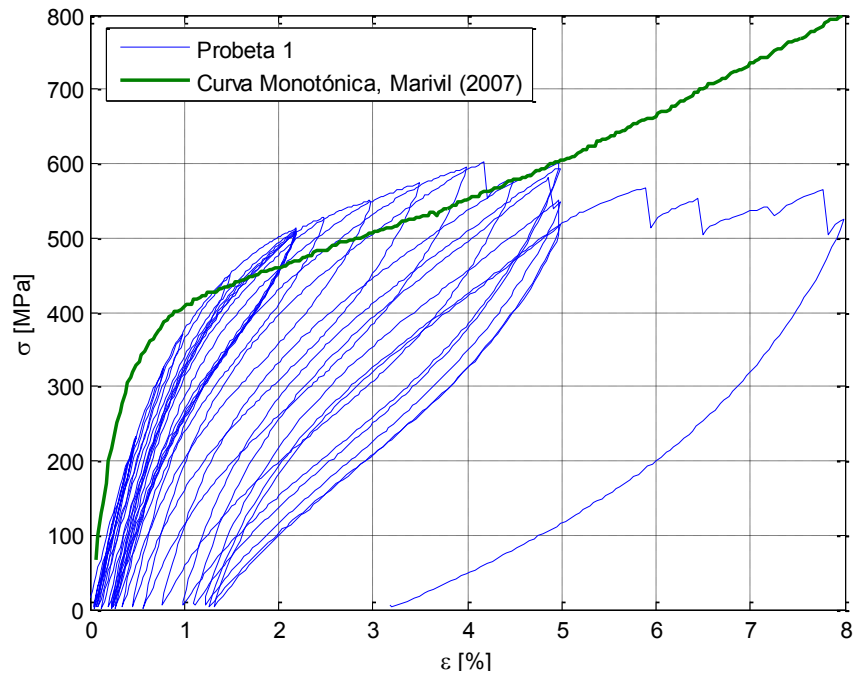


Figura 5-27 : Tensión vs deformación, probeta 1, rutina 2, cables trenzados

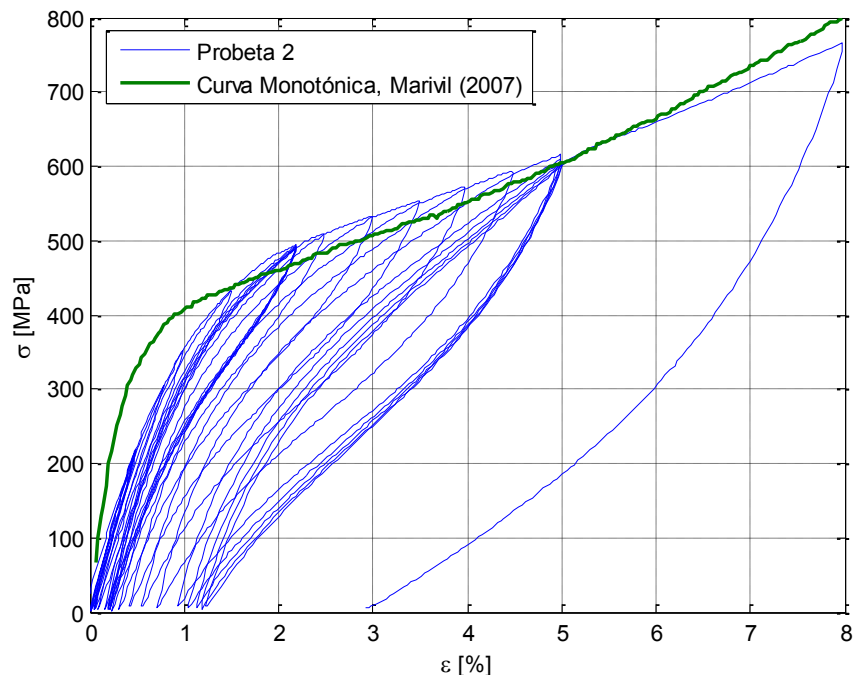


Figura 5-28 : Tensión vs deformación, probeta 2, rutina 2, cables trenzados

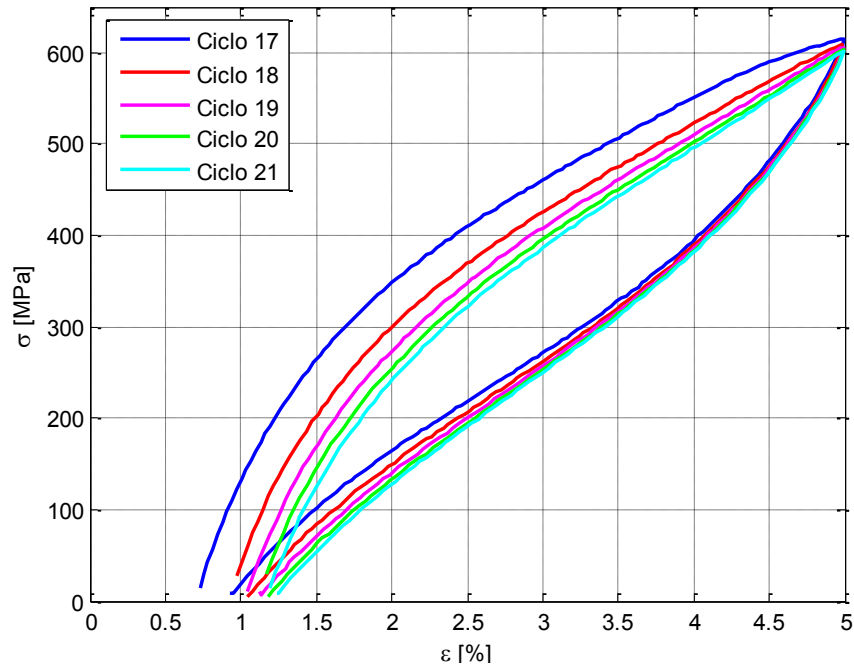


Figura 5-29 : Tensión vs deformación, serie de 5 ciclos al 5% (ciclos 17 a 21 de la rutina 2), probeta 2, cables trenzados

5.3.1.2. Módulos de Elasticidad

En la Figura 5-30, se identifica un valor constante para los ciclos 2 al 11, correspondientes a la serie de ciclos que alcanza hasta un 2.2% de deformación (el primer ciclo se descarta por efecto de entrenamiento). A partir del ciclo 14 en adelante se observa un decaimiento en el módulo de elasticidad. Este cambio se produce por la retención de martensita deformada plásticamente, luego de haber estirado el material por sobre su límite superelástico. Esto es consistente con el trabajo de Araya (2009), donde se plantea que la martensita deformada en forma plástica posee un módulo de elasticidad cuyo valor se encuentra entre los módulos de elasticidad del material en su fase austenítica y martensítica.

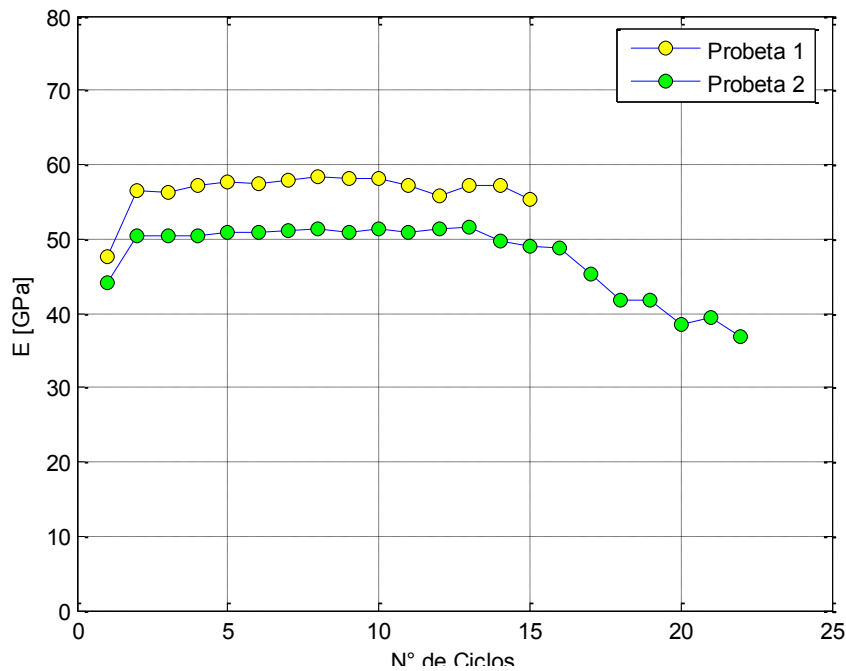


Figura 5-30 : Módulos de elasticidad, rutina 2, cables trenzados

5.3.1.3. Esfuerzos de Transformación

En la Figura 5-31 se muestra la evolución del esfuerzo de transformación con el número de ciclos. Los primeros 6 ciclos no fueron calculados mediante el método bilineal debido a que, para el nivel de deformación máxima alcanzado en cada ciclo, el plateau no se desarrolla de manera suficiente como para realizar una regresión lineal representativa. Nuevamente se observa una diferencia significativa (67%) entre los valores obtenidos por los distintos métodos.

La pendiente del plateau de las curvas varía considerablemente una vez que el material comienza a tener deformaciones plásticas. Esto causa que la variación en el esfuerzo de transformación calculado mediante el método bilineal sea mayor a la que se obtiene con el método de la recta paralela. Lo anterior explica las diferencias en el comportamiento de esta propiedad para los distintos métodos de cálculo entre los ciclos 11 y 15 de la Figura 5-31.

Al igual que para el caso del módulo de elasticidad, una vez que se tienen deformaciones plásticas, el valor del esfuerzo de transformación comienza a declinar. La disminución tiene su origen en el acortamiento del rango elástico producto de la retención en el material de martensita deformada plásticamente.

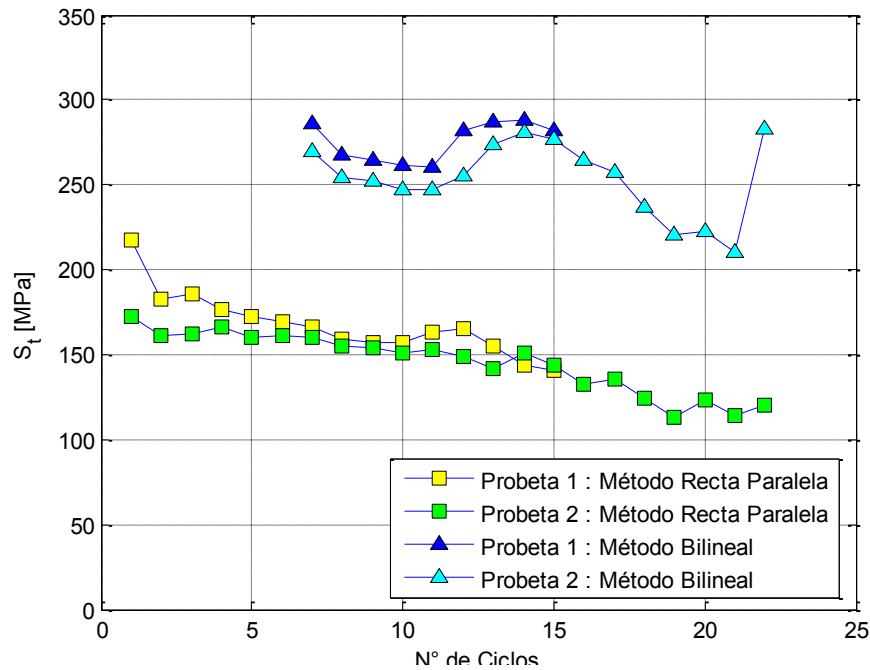


Figura 5-31 : Esfuerzos de transformación, rutina 2, cables trenzados

5.3.1.4. Rigidez Secante

La Figura 5-32 da cuenta de la variación de la rigidez secante con el número de ciclos. En ella se identifica cómo varía la relación entre el esfuerzo máximo y la deformación máxima alcanzada en cada ciclo. Durante los tres primeros ciclos (deformación al 0.5%), el material se mantiene dentro del rango elástico – lineal, por lo que el valor de la rigidez secante coincide con el del módulo de elasticidad para dichos ciclos. Cuando las deformaciones máximas crecen hasta un 0.8% y 2.2% (ciclos 4 a 7) se observa un decaimiento abrupto en el valor de la rigidez secante, lo que da cuenta de que el material ya no se encuentra en el rango lineal. Para los ciclos posteriores, debido a que la envolvente de las tensiones máximas sigue la curva de carga monotónica, la rigidez secante disminuye con el aumento en las deformaciones máximas hasta, eventualmente, converger a un valor asintótico. Esto se refleja mejor en la Figura 5-33, donde se grafica la rigidez secante en función de la amplitud de cada ciclo.

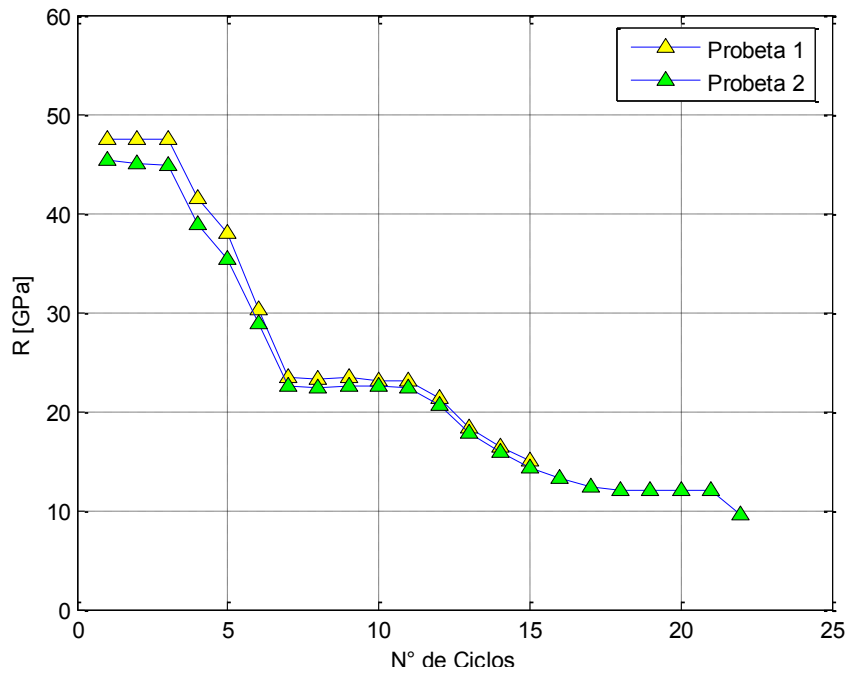


Figura 5-32 : Rigidez secante vs N° de ciclos, rutina 2, cables trenzados

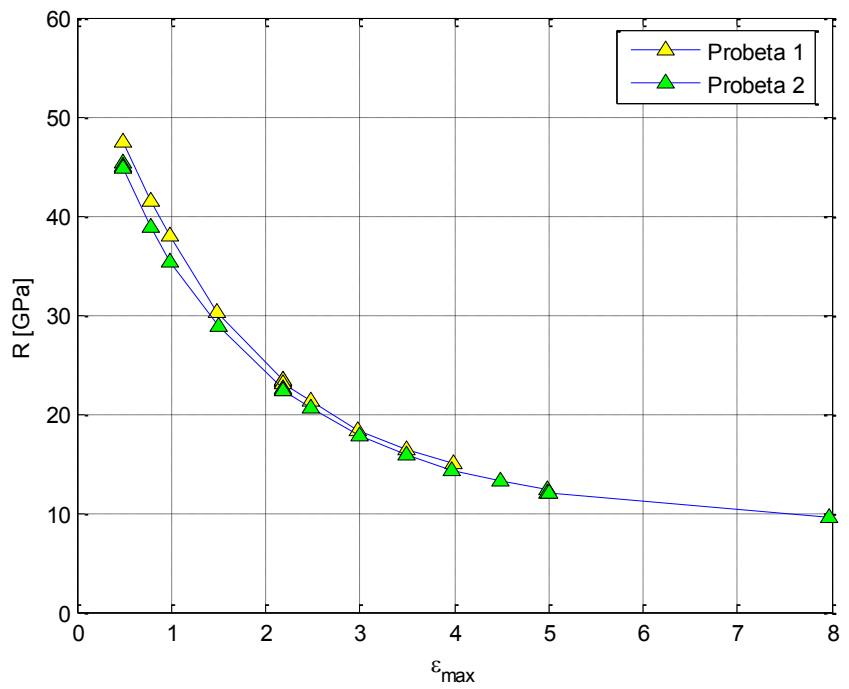


Figura 5-33 : Rigidez secante vs amplitud de ciclo, rutina 2, cables trenzados

5.3.1.5. Deformaciones y Tensiones Máximas

En la Figura 5-34 se indica la amplitud de cada ciclo de carga. Ambas curvas siguen el mismo comportamiento, por lo que se superponen.

Como se mencionó anteriormente, la evolución del esfuerzo máximo alcanzado sigue la curva de carga monotónica. En la Figura 5-35 se nota cómo en los tres primeros ciclos este valor es constante (pese al efecto de entrenamiento, que para ciclos a baja deformación parece no afectar en la tensión máxima). Los ciclos 3 a 7 muestran un crecimiento que sigue la parte abrupta de la curva monotónica (rango lineal – elástico e inicio de la transformación martensítica), luego el esfuerzo máximo se mantiene constante para el ciclado a 2.2%. Los ciclos siguientes (11 a 17) muestran un nuevo crecimiento del esfuerzo máximo, esta vez, la tasa de crecimiento es menor debido a que ya se ha completado la transformación martensítica y se ha superado el rango superelástico (los valores de la probeta 1 se comportan irregularmente debido al corte de los alambres de la capa superior). Finalmente, los ciclos 17 a 21 mantienen un valor constante producto de la amplitud constante al 5% para luego aumentar considerablemente al llegar al 8% de deformación máxima.

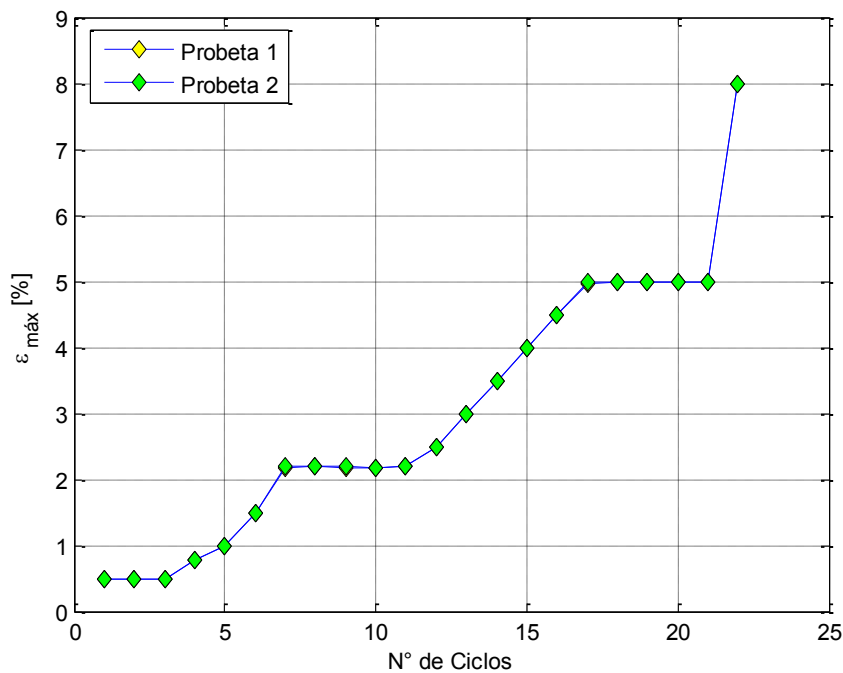


Figura 5-34 : Deformaciones máximas efectivas, rutina 2, cables trenzados

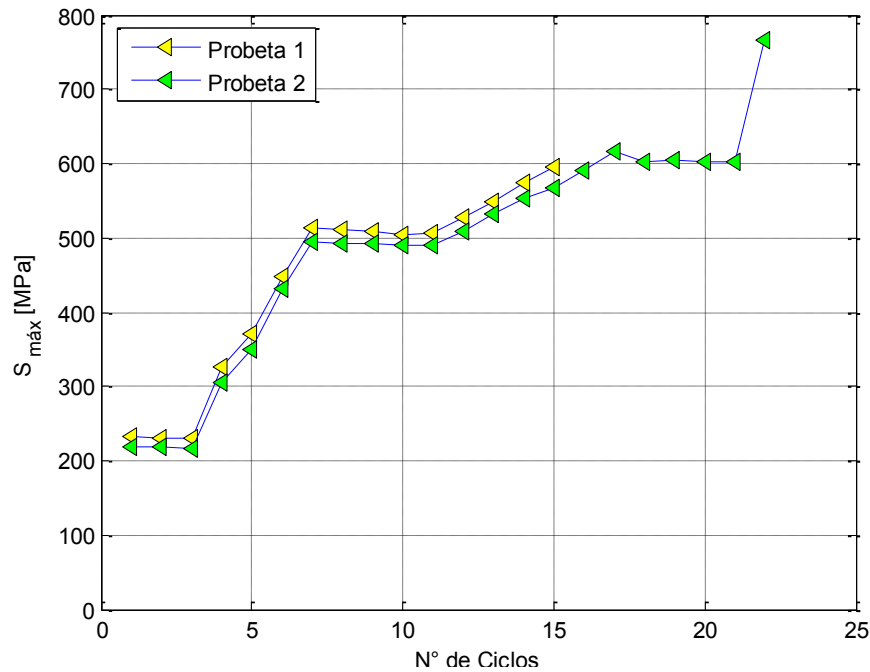


Figura 5-35 : Esfuerzos máximos, rutina 2, cables trenzados

5.3.1.6. Factores de Amortiguamiento Equivalente

Como era de esperar, el factor de amortiguamiento viscoso equivalente aumenta a medida que aumenta la deformación máxima impuesta sobre la probeta debido a que el área del ciclo de histéresis se vuelve mayor. Se observa además que, al realizar ciclos repetitivos a una misma deformación máxima (0.5% en ciclos 1 a 3; 2.2% en ciclos 7 a 11; 5% en ciclos 17 a 21), el factor de amortiguamiento equivalente disminuye. Esto se debe al efecto de entrenamiento, mostrado para los ciclos 17 a 21 en la Figura 5-29. De esta forma, para un número mayor de ciclos se podría esperar que el decaimiento sea cada vez menor y el valor del factor de amortiguamiento se estabilice (siempre y cuando no haya degradación del material). Para los ciclos con amplitud constante al 5% (17 a 21) se observa que el amortiguamiento decrece desde un 4% a un 3%.

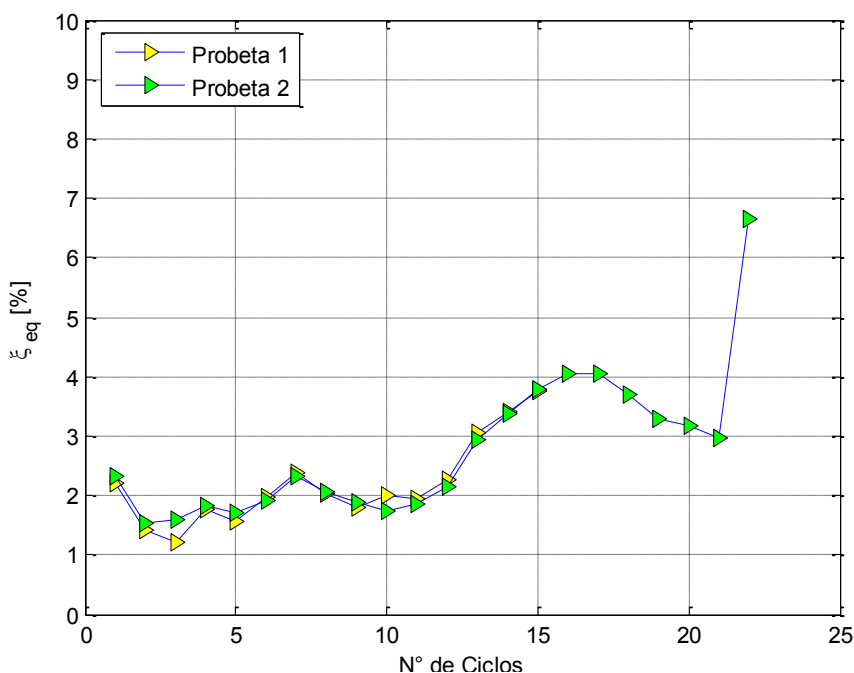


Figura 5-36 : Factores de amortiguamiento equivalente, rutina 2, cables trenzados

5.3.1.7. Deformaciones Remanentes

La Figura 5-37 muestra la evolución de las deformaciones remanentes en la probeta con el número de ciclos. En ella, se observa que, mientras el material está en su rango lineal – elástico, las deformaciones remanentes son despreciables. A medida que la deformación máxima aumenta, empiezan a aparecer deformaciones remanentes en la probeta. Dichas deformaciones aumentan con la deformación máxima impuesta, sin embargo, se observa un proceso de estabilización cuando se repiten ciclos de una misma amplitud (2.2% para los ciclos 7 a 11 y 5% para los ciclos 17 a 21). Esta estabilización es característica del rango superelástico e implica que la deformación remanente en la probeta crece a tasa decreciente hasta llegar, eventualmente, a un valor asintótico. Fuera de este rango (ciclos 17 a 21), las deformaciones permanentes también crecen a tasa decreciente, pero no existe la certeza de que se converja a un valor específico. Lo anterior se refleja de mejor manera en la Figura 5-38, que ilustra las deformaciones remanentes relativas.

En la Figura 5-39 se grafica la deformación remanente relativa en función de la amplitud de cada ciclo. Se observa que éstas aumentan linealmente con la amplitud y que decaen significativamente para ciclos a amplitud constante.

Es importante destacar que se observa un comportamiento superelástico en los ciclos cuyas deformaciones incurren en el rango plástico del material (ciclos 17 a 21). Esto se explica porque, para el nivel de deformación impuesto (5%), no toda la martensita se ha deformado plásticamente. El porcentaje de martensita que no queda retenido en forma plástica continúa con el proceso de la transformación martensítica inversa, exhibiendo el comportamiento superelástico.

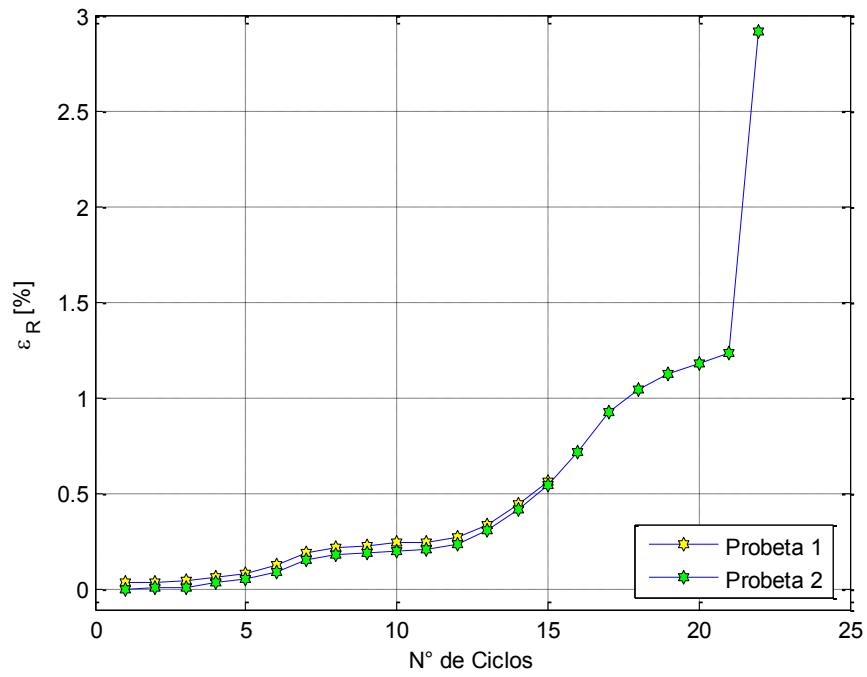


Figura 5-37 : Deformación remanente absoluta, rutina 2, cables trenzados

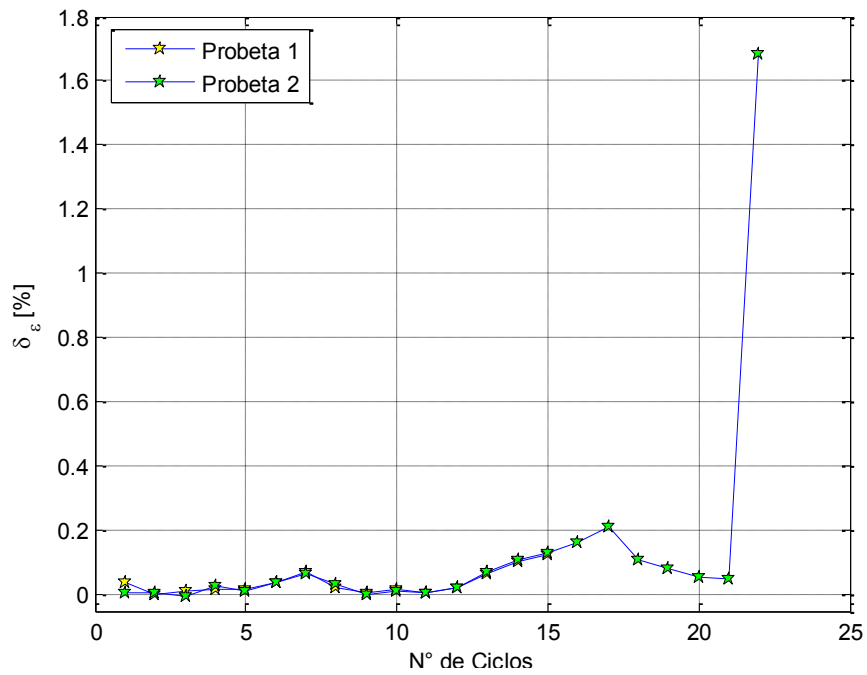


Figura 5-38 : Deformación remanente relativa, rutina 2, cables trenzados

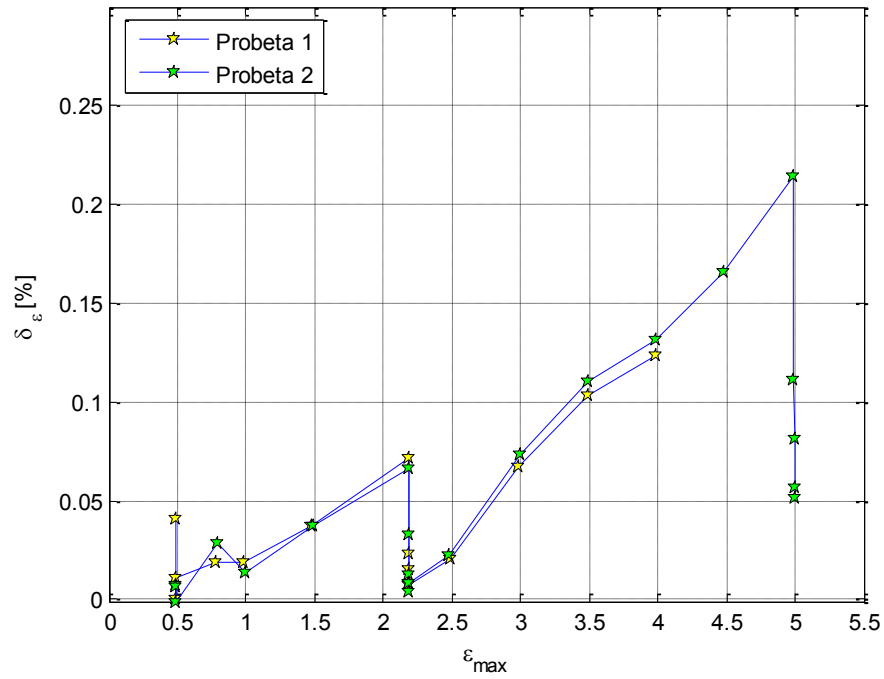


Figura 5-39 : Deformaciones remanentes en función de la amplitud de cada ciclo, rutina 2, cables trenzados

En la Tabla 5.3 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 5.3 : Resumen de parámetros calculados, rutina 2, cables trenzados

Ciclo	E1 [GPa]	E2 [GPa]	S _{t1} 1 [MPa]	S _{t1} 2 [MPa]	S _{t2} 1 [MPa]	S _{t2} 2 [MPa]	R1 [GPa]	R2 [GPa]	ε _{max} 1 [%]	ε _{max} 2 [%]	S _{max} 1 [MPa]	S _{max} 2 [MPa]	ξ _{eq} 1 [%]	ξ _{eq} 2 [%]	ε _R 1 [%]	ε _R 2 [%]
1	47.5	44.2	218.0	172.0	171.6	147.2	47.5	45.3	0.489	0.484	232.4	219.3	2.194	2.318	0.041	0.007
2	56.5	50.3	183.0	161.4	146.6	134.1	47.4	45.0	0.488	0.485	231.4	218.0	1.404	1.526	0.041	0.013
3	56.2	50.4	185.8	161.9	148.7	131.3	47.4	44.9	0.487	0.484	230.9	217.1	1.206	1.591	0.052	0.012
4	57.2	50.4	176.2	166.0	183.3	169.6	41.6	38.8	0.783	0.786	325.5	305.2	1.758	1.836	0.071	0.040
5	57.7	50.9	172.6	160.3	191.5	178.5	37.9	35.4	0.979	0.990	371.3	350.1	1.557	1.702	0.090	0.054
6	57.5	50.9	169.8	161.7	230.9	213.5	30.3	28.8	1.481	1.493	448.2	430.5	1.975	1.919	0.127	0.091
7	57.9	51.0	166.7	160.4	264.0	246.8	23.5	22.6	2.183	2.185	512.5	494.5	2.380	2.334	0.199	0.157
8	58.4	51.3	158.9	155.1	245.5	234.0	23.3	22.5	2.187	2.188	510.1	491.2	2.044	2.054	0.222	0.190
9	58.2	51.0	157.3	154.0	245.2	232.2	23.3	22.5	2.180	2.185	508.7	492.1	1.795	1.874	0.230	0.194
10	58.0	51.3	156.8	150.6	242.8	226.2	23.2	22.5	2.180	2.183	504.8	490.6	1.992	1.750	0.245	0.207
11	57.1	51.0	162.9	153.2	241.6	225.1	23.2	22.4	2.186	2.187	506.1	490.1	1.934	1.861	0.253	0.215
12	55.8	51.3	165.3	149.3	258.7	237.0	21.2	20.6	2.488	2.479	528.3	509.9	2.259	2.161	0.274	0.237
13	57.2	51.7	155.1	141.7	268.7	251.2	18.4	17.7	2.984	2.996	549.7	531.5	3.064	2.928	0.341	0.310
14	57.1	49.8	143.9	150.6	269.7	263.9	16.5	15.9	3.486	3.492	573.6	553.5	3.417	3.384	0.445	0.421
15	55.4	49.0	140.3	144.1	268.8	263.5	14.9	14.2	3.989	3.981	595.0	567.1	3.755	3.789	0.568	0.553
16	52.8	48.7	131.8	132.8	265.8	251.2	12.8	13.2	4.491	4.482	575.8	589.8	4.756	4.045	0.760	0.718
17	43.9	45.2	133.2	135.2	240.1	248.0	11.9	12.3	4.972	4.993	592.4	615.6	4.313	4.048	0.984	0.933
18	41.1	41.7	123.4	124.0	215.9	223.7	11.9	12.1	4.986	4.986	592.2	603.4	3.729	3.706	1.103	1.044
19	39.6	41.7	115.2	113.5	208.4	211.1	11.0	12.1	4.990	4.994	549.0	604.5	4.136	3.291	1.220	1.125
20	35.3	38.5	113.7	123.4	191.2	209.0	10.1	12.1	4.977	4.997	505.0	603.3	3.945	3.184	1.266	1.181
21	31.5	39.4	116.1	114.3	180.3	200.2	10.4	12.1	4.983	4.997	518.5	602.1	2.955	2.955	1.316	1.233
22	31.9	36.9	105.8	120.5	271.9	272.6	6.6	9.6	7.999	7.978	525.6	765.5	8.833	6.642	3.188	2.917

5.3.2. Ensayos de Probetas de Alambres en Paralelo

5.3.2.1. Gráficos de Tensión vs Deformación

La Figura 5-40 y la Figura 5-41 muestran las curvas de tensión – deformación para la rutina 2 aplicada a las probetas de alambres en paralelo. Como en el primer ensayo se cortó un alambre de la probeta 1, el área empleada en el cálculo de las propiedades de esta muestra sólo considera 18 alambres.

Debido a que el ensayo se realizó inmediatamente después de haber aplicado la rutina 1, los alambres comienzan con la deformación remanente acumulada de dicho ensayo.

En este caso, no se aplicó el último ciclo de deformación (al 8%) en la probeta 1. El gráfico correspondiente a la probeta 2 termina súbitamente debido a que el sistema operativo que controlaba el sistema de adquisición de datos (Windows XP) colapsó repentinamente.

En ambos casos, la envolvente de las curvas se asemeja al ensayo de tracción monotónica realizado por Marivil (2007) en alambres de características similares, a 20°C de temperatura.

Al igual que en las probetas de alambre trenzado, se observa que las deformaciones remanentes relativas para la serie de ciclos al 5% de deformación máxima no superan el 0.25% en el primer ciclo y luego disminuyen hasta ser despreciables (ciclos 20 y 21 de la Figura 5-42).

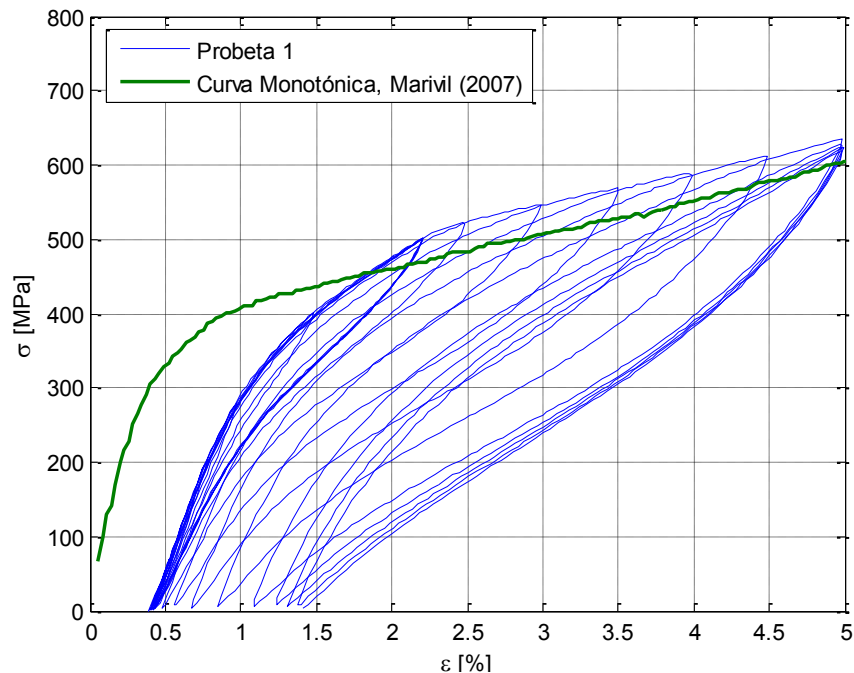


Figura 5-40 : Tensión vs deformación, probeta 1, rutina 2, alambres en paralelo

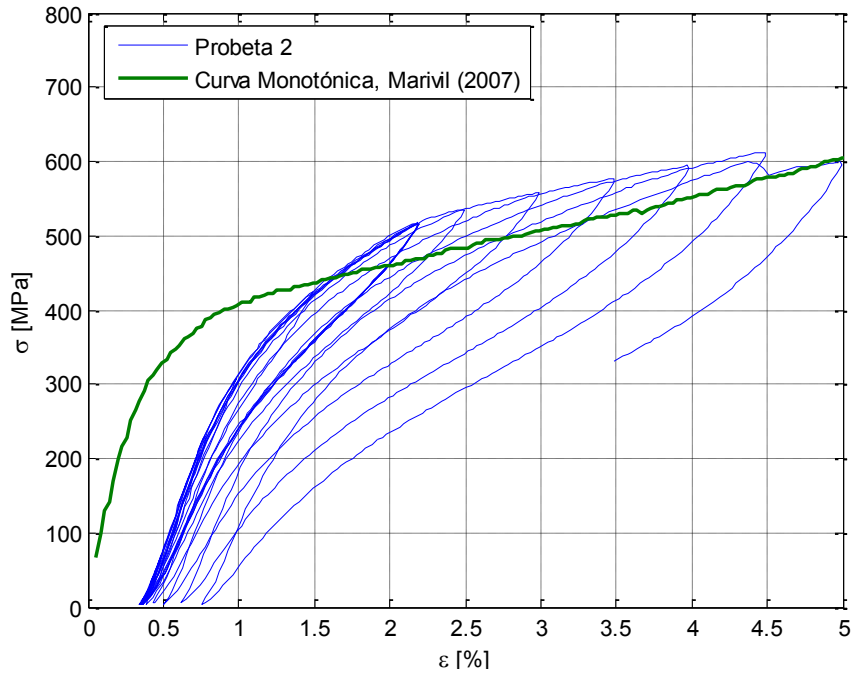


Figura 5-41 : Tensión vs deformación, probeta 2, rutina 2, alambres en paralelo

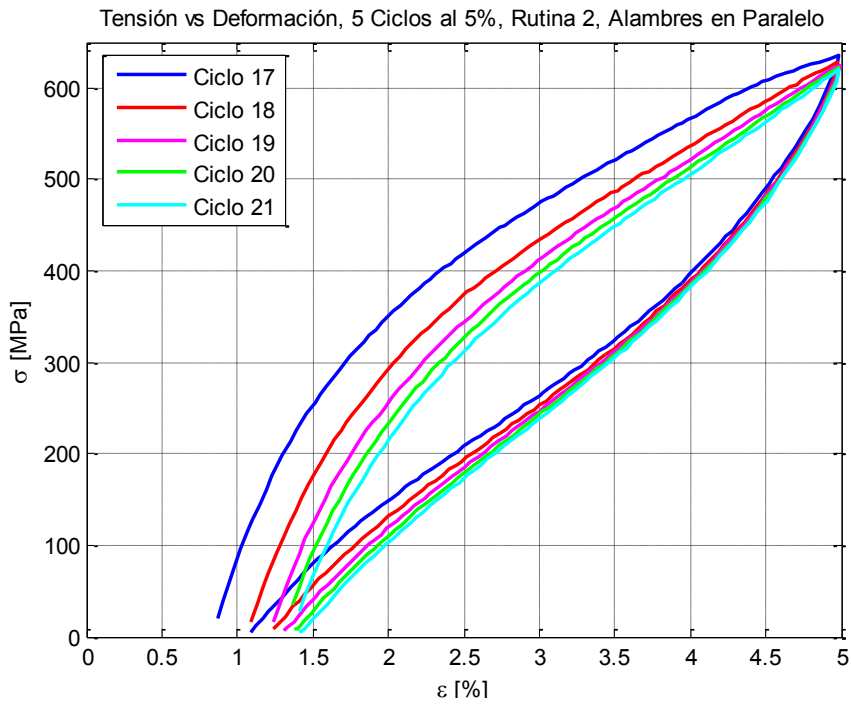


Figura 5-42 : Tensión vs deformación, serie de 5 ciclos al 5% (ciclos 17 a 21 de la rutina 2), probeta 1, alambres en paralelo

5.3.2.2. Módulos de Elasticidad

En la Figura 5-43 se muestran los valores del módulo de elasticidad para ambas probetas. Los primeros 3 ciclos no pueden ser tomados en cuenta puesto que se tenían muy pocos puntos en el rango (4 a 5) como para realizar una regresión lineal que represente fielmente el rango lineal (usualmente los 2 primeros puntos siguen una pendiente menor, por lo que se desprecian. De esta forma sólo quedan 2 a 3 puntos para realizar la regresión).

Como se comentó en el caso de cables trenzados, una vez que se supera el límite superelástico comienza a retenerse martensita deformada plásticamente. En consecuencia, se acorta el rango elástico – lineal y el valor del módulo de elasticidad decrece.

Por otra parte, se observa que los valores resultantes para el módulo de elasticidad, dentro del rango superelástico, coinciden con los obtenidos al estudiar los datos del ensayo a amplitud constante (Figura 5-19) y son superiores al valor calculado por Marivil (52 GPa). Al igual que en los ensayos a amplitud constante, se observa que el módulo de elasticidad de los alambres en paralelo es mayor al de las probetas de cable trenzado (Figura 5-30).

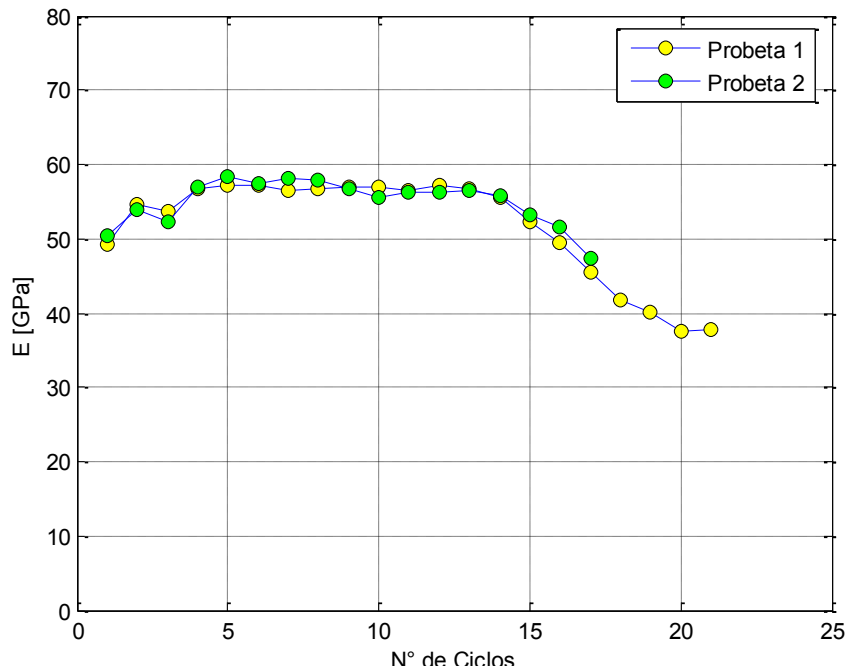


Figura 5-43 : Módulos de elasticidad, rutina 2, alambres en paralelo

5.3.2.3. Esfuerzos de Transformación

La Figura 5-44 muestra la evolución del esfuerzo de transformación con el número de ciclos. Del mismo modo que el valor del módulo de elasticidad, el esfuerzo de transformación permanece relativamente constante mientras la probeta es sometida a deformaciones dentro de su rango superelástico. Una vez sobrepasado este límite, se altera permanentemente la estructura interna del material por lo que se observan variaciones en el esfuerzo de transformación.

Se observa que el valor del esfuerzo de transformación para alambres en paralelo es superior en cerca de 40 MPa al obtenido para las probetas de cable trenzado. Además, dentro del rango superelástico (hasta el ciclo 11), los valores obtenidos por el método de la recta paralela son similares a los calculados por Marivil (2007) en alambres singulares (240 MPa), utilizando el mismo método.

Los 4 primeros ciclos no fueron incluidos en el método de la recta paralela ya que la línea trazada para determinar el esfuerzo de transformación no alcanza a cortar la curva. Esto ocurre debido a que la trayectoria de tensiones se mantiene en el rango lineal – elástico en los primeros ciclos de la rutina de ensayo. En el caso del método bilineal, fue necesario esperar al ciclo 7 para que la curva describiera el plateau en forma significativa, de modo de poder trazar la segunda recta.

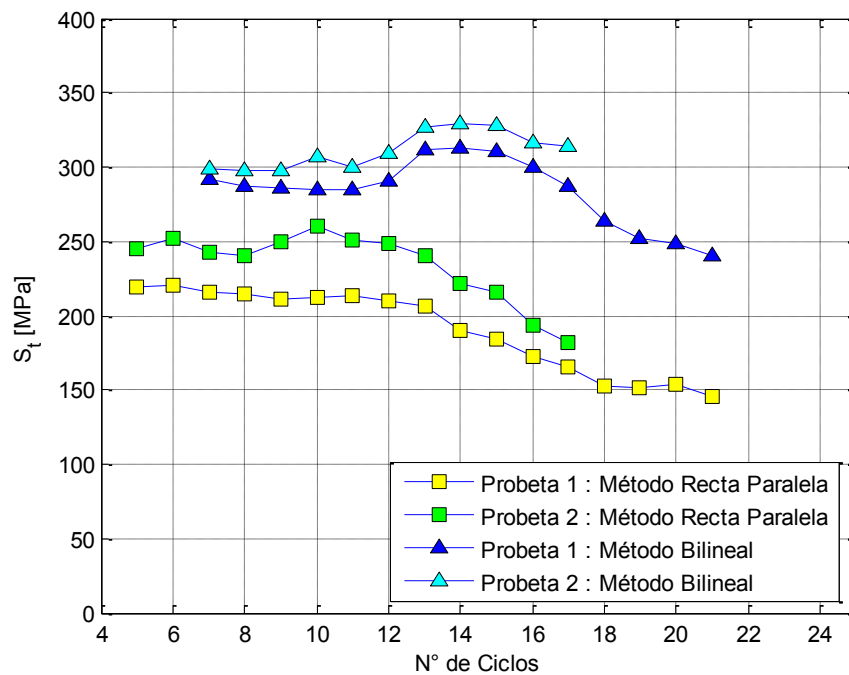


Figura 5-44 : Esfuerzos de transformación, rutina 2, alambres en paralelo

5.3.2.4. Rigidez Secante

En la Figura 5-45 se muestra la rigidez secante en función del número de ciclos. Debido a la deformación remanente inicial con que comenzó el ensayo, la rigidez secante fue calculada desplazando la trayectoria de tensiones hacia la izquierda, hasta que ésta comenzara en el origen.

Los primeros 4 ciclos no deben ser tomados en cuenta debido a la baja resolución que se tenía para ellos.

El comportamiento de la rigidez secante (Figura 5-45) es similar al obtenido al aplicar la rutina 2 a las muestras de cable trenzado (Figura 5-32).

En la Figura 5-46 se grafica la rigidez secante en función de la amplitud de cada ciclo. Se observa que ésta disminuye abruptamente luego de los primeros ciclos de carga para luego tender, eventualmente, a un valor asintótico.

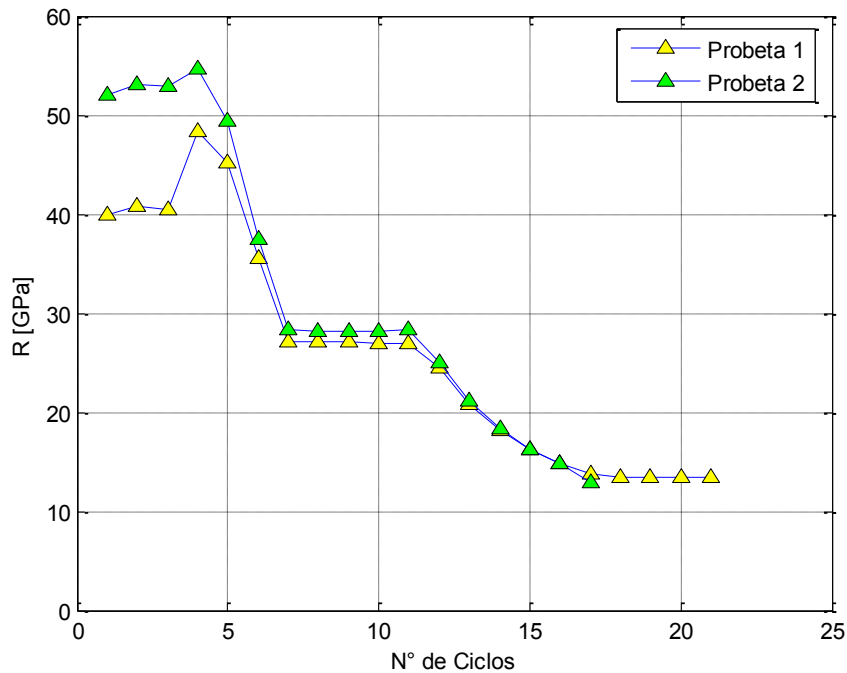


Figura 5-45 : Rigidez secante, rutina 2, alambres en paralelo

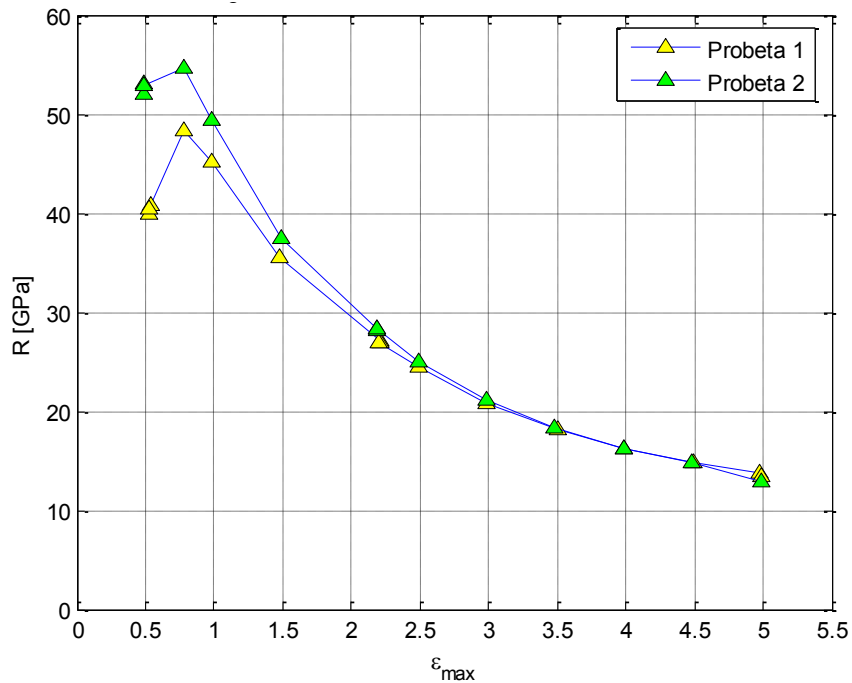


Figura 5-46 : Rigidez secante vs amplitud de ciclo, rutina 2, alambres en paralelo

5.3.2.5. Deformaciones y Tensiones Máximas

La Figura 5-47 indica las deformaciones máximas efectivas alcanzadas en cada ciclo y la Figura 5-48 muestra las tensiones máximas alcanzadas por ciclo. Si se comparan las tensiones máximas obtenidas para las probetas de alambres en paralelo (Figura 5-48) con las que resultan del ensayo de cables trenzados (Figura 5-35) se observan que la tensión máxima de los alambres en paralelo es levemente superior a la obtenida para cables trenzados (entre 20 y 30 MPa, que corresponden a una diferencia de entre un 4% y 5%). Por otra parte, se observa que las tensiones máximas alcanzadas en los primeros ciclos de carga para los alambres en paralelo son significativamente inferiores a las de los cables trenzados. Esta diferencia se explica porque, para bajos niveles de tensión, el efecto de curvatura de los alambres en paralelo incide considerablemente en el comportamiento general de la probeta.

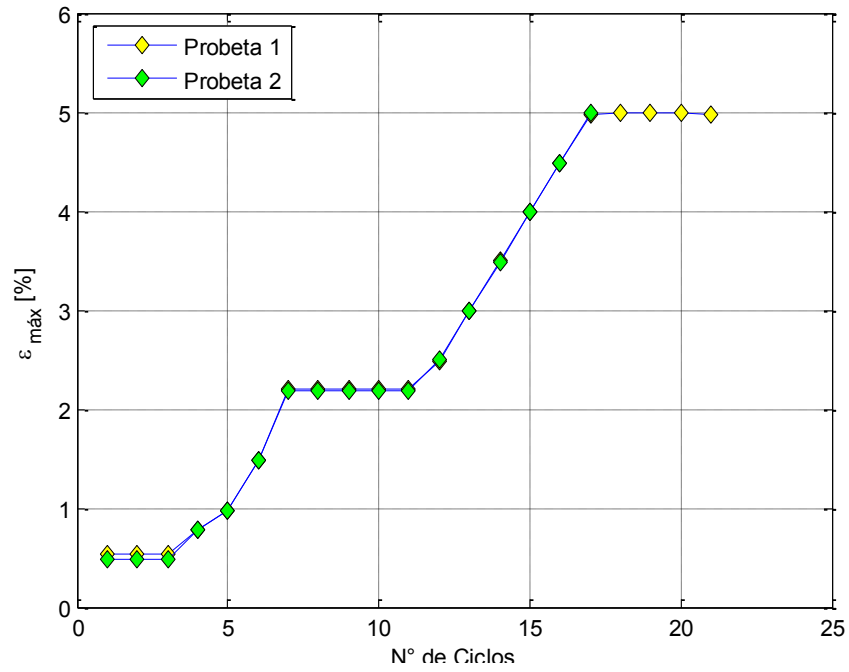


Figura 5-47 : Deformaciones máximas efectivas, rutina 2, alambres en paralelo

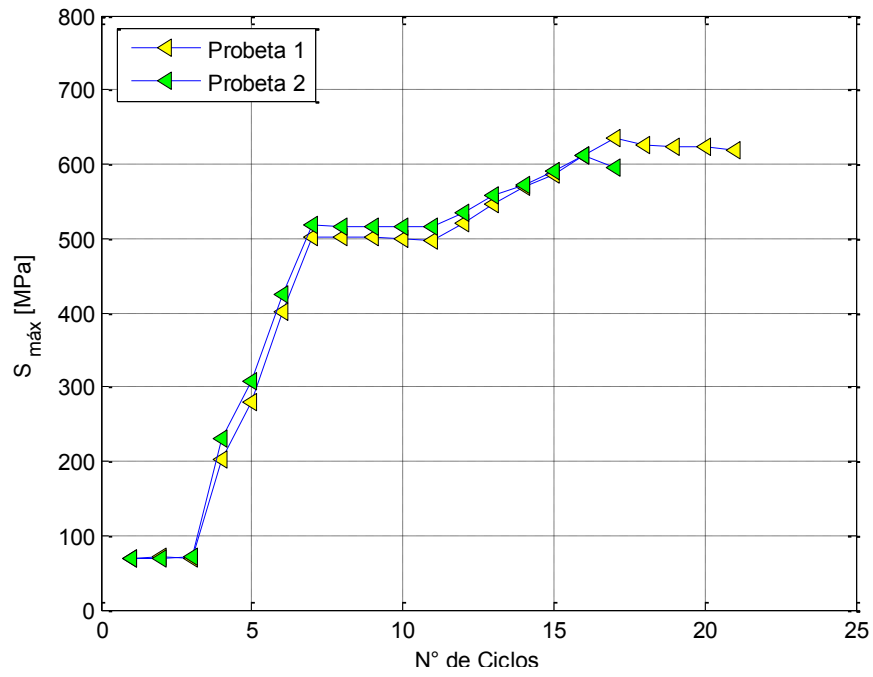


Figura 5-48 : Esfuerzos máximos, rutina 2, alambres en paralelo

5.3.2.6. Factores de Amortiguamiento Equivalente

En la Figura 5-49 se observa que la variación del factor de amortiguamiento viscoso equivalente exhibe el mismo comportamiento que el de los cables trenzados, explicado en la sección 5.3.1.6.

La anomalía en el valor de los dos primeros ciclos de la probeta 1 se produce por la baja cantidad de puntos que se tienen para ambos ciclos. El punto de inicio del segundo ciclo se tiene cuando la deformación está al 0.25%, que corresponde a la mitad del tramo lineal de deformación realizada en ese ciclo en particular. En consecuencia, se producen distorsiones en el cálculo de las áreas empleadas para obtener el factor de amortiguamiento.

En la Figura 5-50 se ilustra un cuadro resumen con el factor de amortiguamiento equivalente en función de la amplitud de cada ciclo. Se incluyen los resultados para cables trenzados y alambres en paralelo, promediados entre ambas probetas. Además se incluyen los valores calculados por Marivil (2007) para alambres de CuAlBe, de 0.5 mm de diámetro y tamaño de grano de 60 μm .

Se observa que el amortiguamiento que presentan los alambres en paralelo es levemente inferior al de los cables trenzados. Esto se debe a que el ensayo de la rutina 2 de alambres en paralelo comenzó con una deformación remanente cercana al 0.4%, en consecuencia, la deformación máxima efectiva en la probeta es inferior en un 0.4% respecto de las probetas de cable trenzado. Los valores, para cables trenzados y alambres en paralelo, calculados para el 0.5% de deformación difieren significativamente de la tendencia de los datos obtenidos por Marivil debido a la baja resolución que se tenía para los primeros ciclos (particularmente para el ensayo de alambres en paralelo).

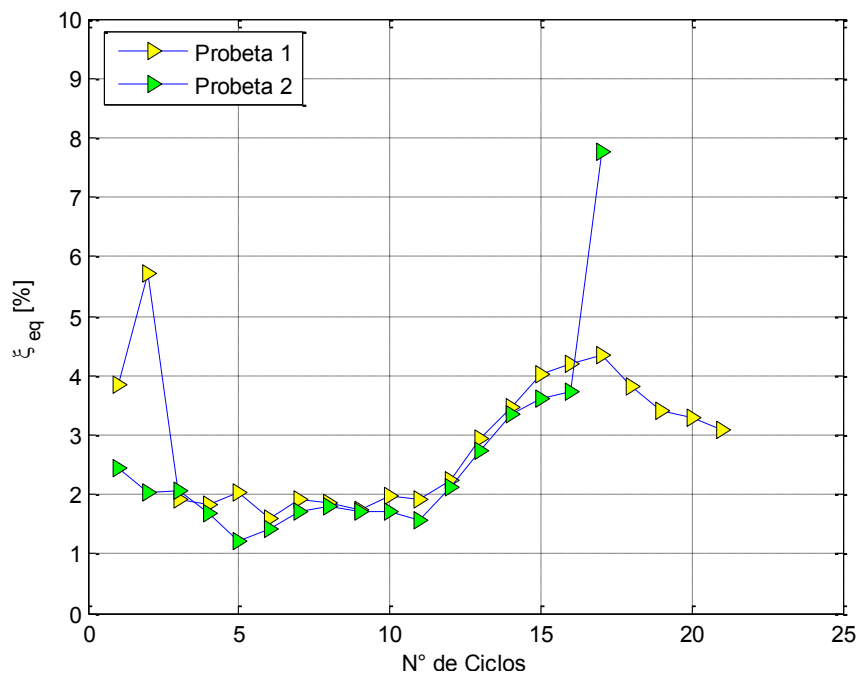


Figura 5-49 : Factores de amortiguamiento equivalente, rutina 2, alambres en paralelo

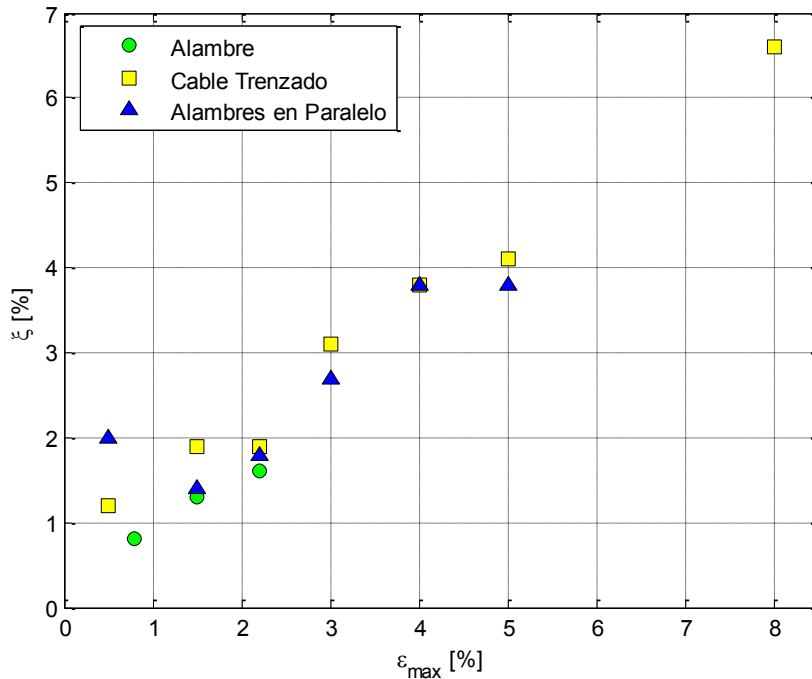


Figura 5-50 : Factor de amortiguamiento equivalente en función de la amplitud de cada ciclo

5.3.2.7. Deformaciones Remanentes

Como el ensayo se realizó inmediatamente después de haber aplicado la rutina 1 sobre las probetas, sin desmontarlas de la máquina de ensayo, las deformaciones remanentes acumuladas en la probeta (Figura 5-51) se suman a las del ensayo anterior. En consecuencia, se observa que la deformación acumulada no comienza en cero.

Para efectos prácticos, resulta conveniente analizar el comportamiento de las deformaciones remanentes observando la deformación relativa entre ciclos (Figura 5-52). Al igual que para el caso de cables trenzados, se observa que mientras la probeta es ciclada dentro de su rango superelástico, las deformaciones remanentes son mínimas. Una vez que se sale de este intervalo, se observa un crecimiento en las deformaciones relativas. Sin embargo, éstas decaen al mantener el ciclado a un mismo nivel de deformación. La razón de este comportamiento es la misma que se expuso en el caso de cables trenzados.

Al igual que en el caso de cables trenzados, en la Figura 5-53 se observa que las deformaciones remanentes relativas crecen linealmente al aumentar la amplitud. En este caso, esto sólo se observa para deformaciones superiores al 2.2%, debido al entrenamiento que tuvieron las probetas al aplicar la rutina 1.

Al comparar los gráficos de deformación relativa para alambres en paralelo y cables trenzados, se observa un comportamiento similar, lo que sugiere que el trenzado de los alambres no afecta en forma significativa a la evolución de las deformaciones remanentes.

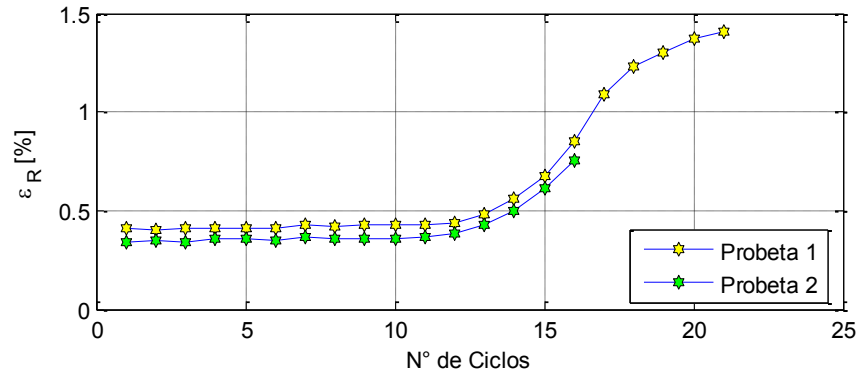


Figura 5-51 : Deformación remanente acumulada, rutina 2, alambres en paralelo

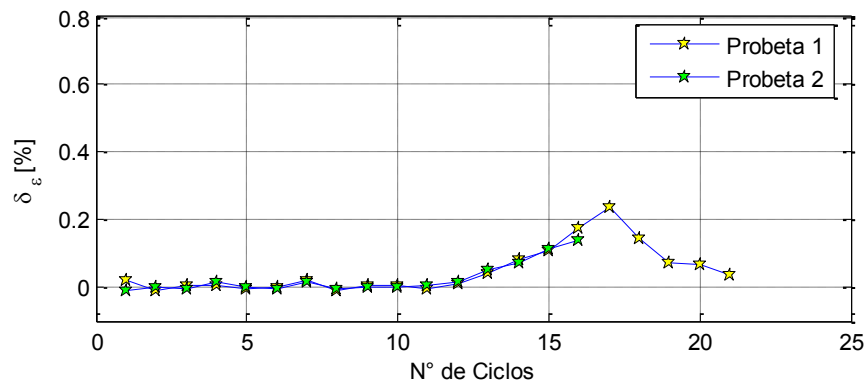


Figura 5-52 : Deformación remanente relativa, rutina 2, alambres en paralelo

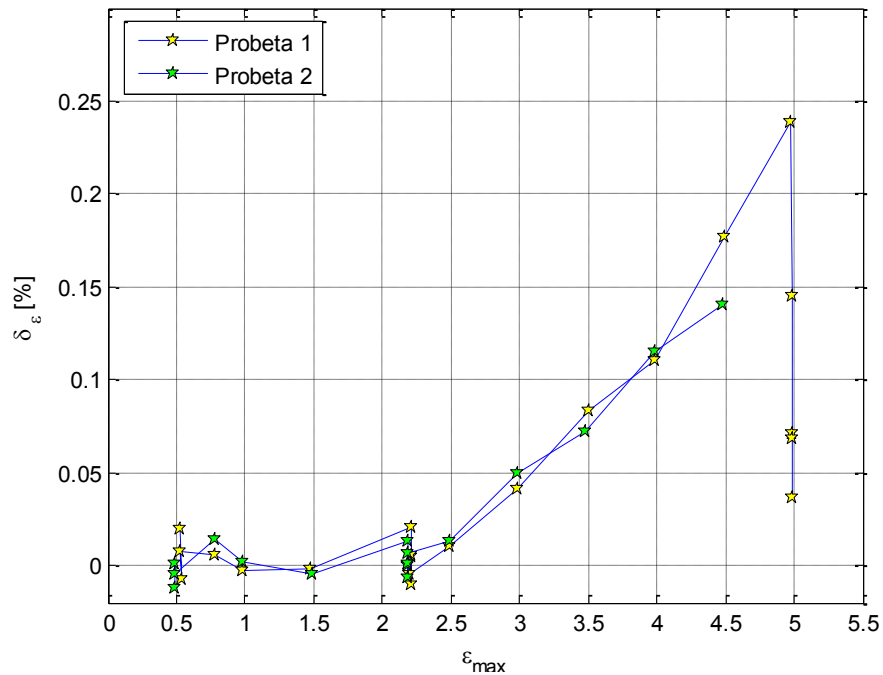


Figura 5-53: Deformaciones remanentes vs amplitud de ciclo, rutina 2, alambres en paralelo

En la Tabla 5.4 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 5.4 : Resumen de parámetros calculados, rutina 2, alambres en paralelo

Ciclo	E1 [GPa]	E2 [GPa]	S _{t1} 1 [MPa]	S _{t1} 2 [MPa]	S _{t2} 1 [MPa]	S _{t2} 2 [MPa]	R1 [GPa]	R2 [GPa]	ε _{max} 1 [%]	ε _{max} 2 [%]	S _{max} 1 [MPa]	S _{max} 2 [MPa]	ξ _{eq} 1 [%]	ξ _{eq} 2 [%]	ε _R 1 [%]	ε _R 2 [%]
1	49.2	50.4	-	-	-	-	40.0	52.0	0.528	0.490	68.7	69.4	3.835	2.427	0.408	0.344
2	54.5	54.0	-	-	-	-	40.7	53.1	0.533	0.487	71.9	69.5	5.731	2.030	0.400	0.346
3	53.6	52.3	-	-	-	-	40.4	52.8	0.528	0.490	69.2	70.5	1.923	2.056	0.408	0.341
4	56.7	57.0	-	-	-	-	48.3	54.6	0.774	0.778	201.7	230.4	1.840	1.690	0.414	0.355
5	57.3	58.4	219.0	244.7	-	-	45.1	49.4	0.977	0.980	280.0	308.0	2.044	1.200	0.411	0.357
6	57.1	57.4	220.5	251.9	-	-	35.6	37.5	1.480	1.490	400.2	424.9	1.605	1.409	0.409	0.353
7	56.6	58.1	216.0	242.8	273.7	291.6	27.0	28.3	2.210	2.187	501.3	517.9	1.902	1.722	0.430	0.366
8	56.6	57.8	214.7	240.9	274.2	290.6	27.0	28.2	2.209	2.189	500.9	516.3	1.862	1.802	0.420	0.359
9	56.9	56.8	210.6	249.6	266.8	293.7	27.1	28.2	2.206	2.190	501.4	516.8	1.748	1.698	0.425	0.360
10	56.8	55.5	211.7	260.4	270.3	300.0	27.0	28.2	2.210	2.189	500.2	516.5	1.968	1.713	0.431	0.361
11	56.6	56.2	213.9	251.0	269.7	292.5	26.9	28.3	2.200	2.182	496.6	516.2	1.929	1.569	0.426	0.367
12	57.2	56.3	209.6	248.1	275.0	304.5	24.4	25.0	2.486	2.493	520.2	533.9	2.245	2.119	0.437	0.381
13	56.8	56.5	207.0	239.8	297.2	322.7	20.8	21.2	2.984	2.986	546.6	556.8	2.952	2.748	0.478	0.430
14	55.6	55.9	190.3	222.0	296.9	321.2	18.1	18.3	3.499	3.484	569.5	572.5	3.462	3.337	0.561	0.502
15	52.4	53.3	184.3	215.2	296.3	319.5	16.2	16.3	3.989	3.983	586.9	591.3	4.024	3.600	0.672	0.617
16	49.5	51.5	172.9	193.9	287.0	308.3	14.8	14.8	4.490	4.486	611.5	612.8	4.182	3.741	0.849	0.758
17	45.5	47.4	165.6	182.0	275.0	305.4	13.7	12.8	4.978	4.990	635.1	594.8	4.334	7.766	1.088	3.488
18	41.8	-	152.4	-	251.9	-	13.5	-	4.988	-	624.6	-	3.807	-	1.233	-
19	40.2	-	151.1	-	237.1	-	13.5	-	4.989	-	624.3	-	3.409	-	1.305	-
20	37.5	-	154.0	-	237.2	-	13.5	-	4.985	-	622.5	-	3.300	-	1.373	-
21	37.7	-	146.0	-	224.6	-	13.4	-	4.982	-	619.9	-	3.092	-	1.409	-

Capítulo 6: Resultados Analíticos

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados del modelo computacional elaborado para predecir el comportamiento de cables trenzados. El modelo numérico, desarrollado a partir del trabajo de Gysling (2008), implementa el modelo de fibra descrito en la sección 3.5 empleando la deformación global del cable como variable de entrada.

En este capítulo se exhiben los resultados del modelo numérico y se comparan con los datos experimentales analizados en el capítulo 5.

6.2. Resultados para Ensayos Cíclicos a Amplitud Constante

6.2.1. Ley Constitutiva Utilizada

El modelo de ley constitutiva empleado corresponde al modelo multilíneal descrito en la sección 0. Este se calibró a partir de los datos de los ensayos de alambres en paralelo, utilizando como referencia el quinto ciclo de la probeta 2, rutina 1. El módulo de elasticidad se calibró a partir del promedio de los módulos de elasticidad de ambas probetas, fijándolo en 57 GPa. Debido al efecto de entrenamiento, el primer ciclo de cada ensayo posee una ley constitutiva distinta al resto de los ciclos. En consecuencia, el programa es incapaz de predecir este efecto, por lo que se asume que la probeta está previamente entrenada al momento de realizar la predicción numérica. Por la misma razón, los datos empleados en la calibración del modelo fueron centrados restando la deformación remanente acumulada hasta ese momento. En consecuencia, se realizó una extrapolación de los datos para predecir el comportamiento hasta el 2.2% de deformación. La Figura 6-1 muestra en forma gráfica la ley constitutiva empleada y la contrasta con los datos experimentales. La Tabla 6.1 indica los valores empleados en los puntos característicos del modelo, de acuerdo a la notación empleada en el capítulo 3 (Figura 3-10).

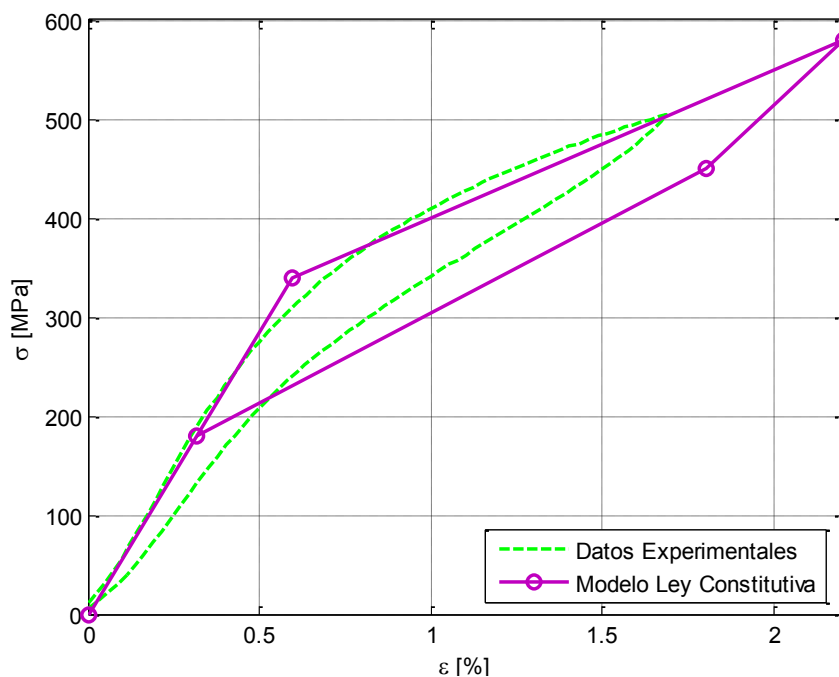


Figura 6-1 : Ley constitutiva empleada

Tabla 6.1 : Valores Empleados en Ley Constitutiva

Punto	ε [%]	σ [Mpa]
A	0.60	340.00
B	2.20	580.53
D	1.80	450.00
E	0.32	180.00

6.2.2. Notación

En lo que sigue, los rótulos PR1 y PR2 se refieren a los resultados experimentales para probeta 1 y 2 respectivamente, de acuerdo a la rutina y tipo de cable (trenzado o paralelo) en estudio.

6.2.3. Datos de Entrada

6.2.3.1. Archivos de Carga (Deformaciones)

Se efectuaron 19 ciclos de carga, con la deformación global comenzando en cero y alcanzando la deformación máxima efectiva, restando la deformación remanente del primer ciclo, del ensayo que se deseaba reproducir. El paso $\Delta\epsilon$ de avance de las deformaciones fue de 0.001, lo que generó cerca de 70000 puntos de evaluación.

6.2.3.2. Deformaciones Remanentes

Para modelar las deformaciones remanentes en el cable, se estudió la relación entre δ_ε y ε_{max} en los ensayos de alambres en paralelo, para lograr establecer la tasa de variación η como:

$$\eta = \frac{\delta_\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \quad (6.1)$$

Se calcularon los valores de η obtenidos para los datos experimentales de las probetas 1 y 2 de alambres en paralelo (rutina 1, ver Tabla 5.2) y luego se realizó una regresión exponencial de la forma:

$$\eta = A \cdot e^{-\lambda \cdot n} \quad (6.2)$$

donde A y λ corresponden a los parámetros del modelo y n al número de ciclos.

Finalmente, la tasa de deformaciones remanentes empleada corresponde al promedio entre los parámetros de ajuste de las curvas de ambas probetas. La Figura 6-2 muestra el ajuste de curvas realizado y los parámetros obtenidos.

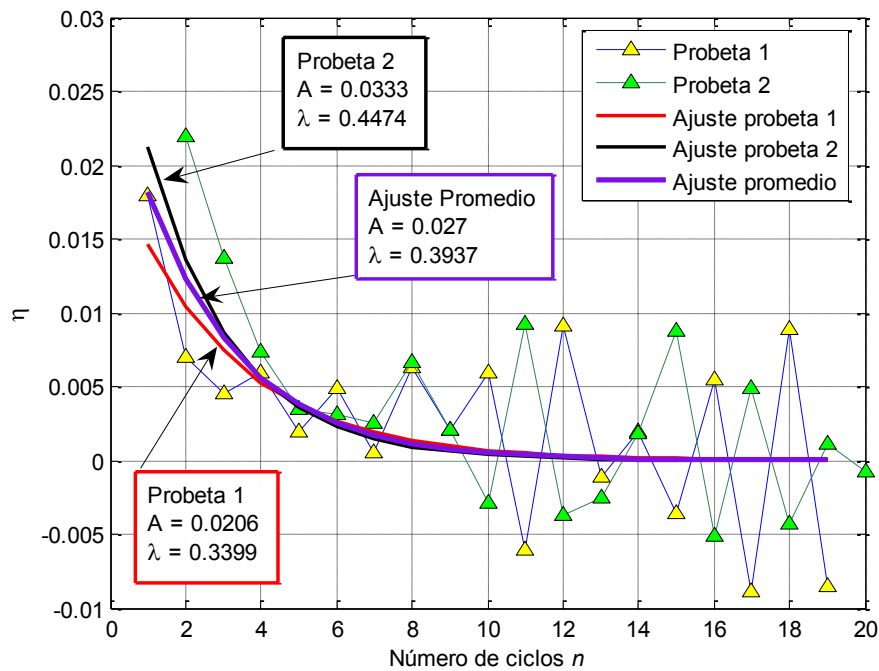


Figura 6-2 : Modelamiento de la tasa de deformaciones remanentes

6.2.4. Resultados Obtenidos para Cables Trenzados

6.2.4.1. Gráficos de Tensión vs Deformación

Como el programa no predice el efecto de entrenamiento, las curvas se modelaron desde el segundo ciclo en adelante. Para poder comparar las curvas experimentales con las del modelo numérico a las experimentales se les quitó el primer ciclo y luego se centraron restando la deformación remanente de dicho ciclo.

En las curvas de tensión - deformación (Figura 6-3 y Figura 6-4) se observa que los resultados predichos por el programa simulan el comportamiento de la curva obtenida experimentalmente, siguiendo una trayectoria de tensiones similar. La predicción de las tensiones máximas oscila en ± 20 MPa, aproximadamente, respecto de su valor real. Además, las curvas predichas se desplazan correctamente de acuerdo a las deformaciones remanentes en el cable.

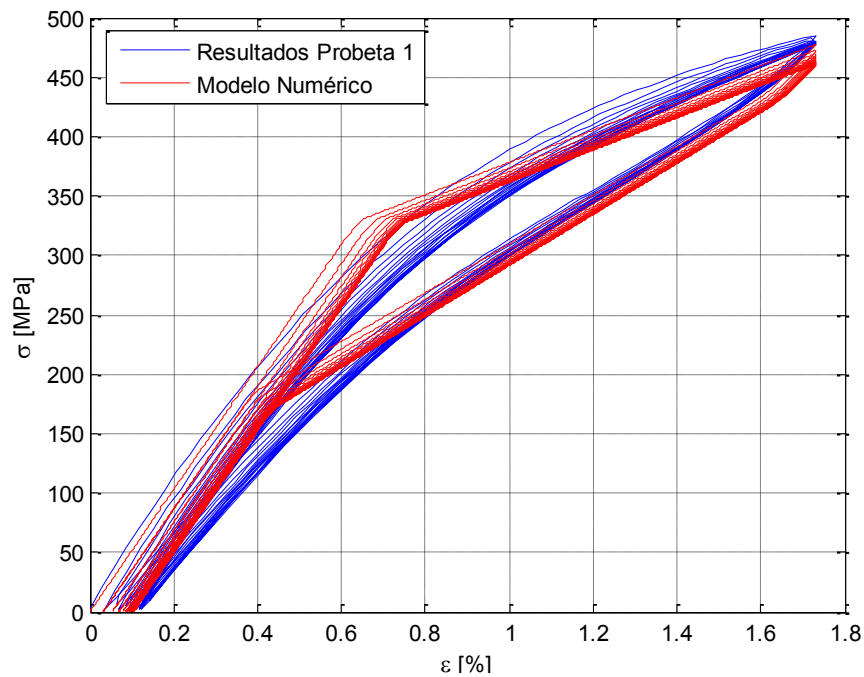


Figura 6-3 : Predicción de tensión vs deformación, rutina 1, probeta 1, cables trenzados

6.2.4.2. Módulos de Elasticidad

La Figura 6-5 muestra que el módulo de elasticidad predicho por el programa no difiere significativamente con respecto a lo obtenido de manera experimental (en promedio, el error es de un 1%). Se observa que la disminución en la rigidez del cable producto del trenzado, respecto a la ley constitutiva, coincide con los resultados experimentales.

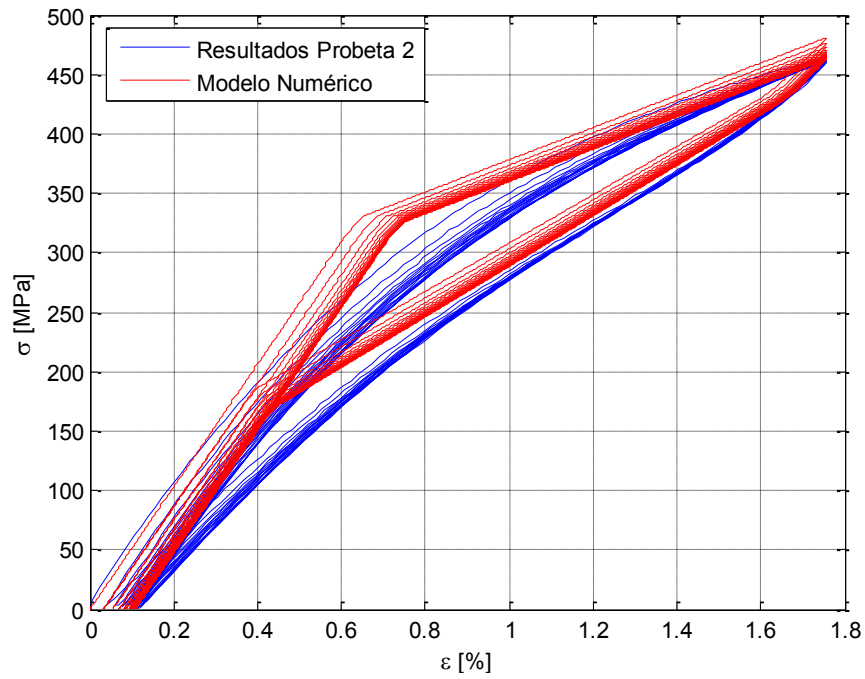


Figura 6-4 : Predicción de tensión vs deformación, rutina 1, probeta 2, cables trenzados

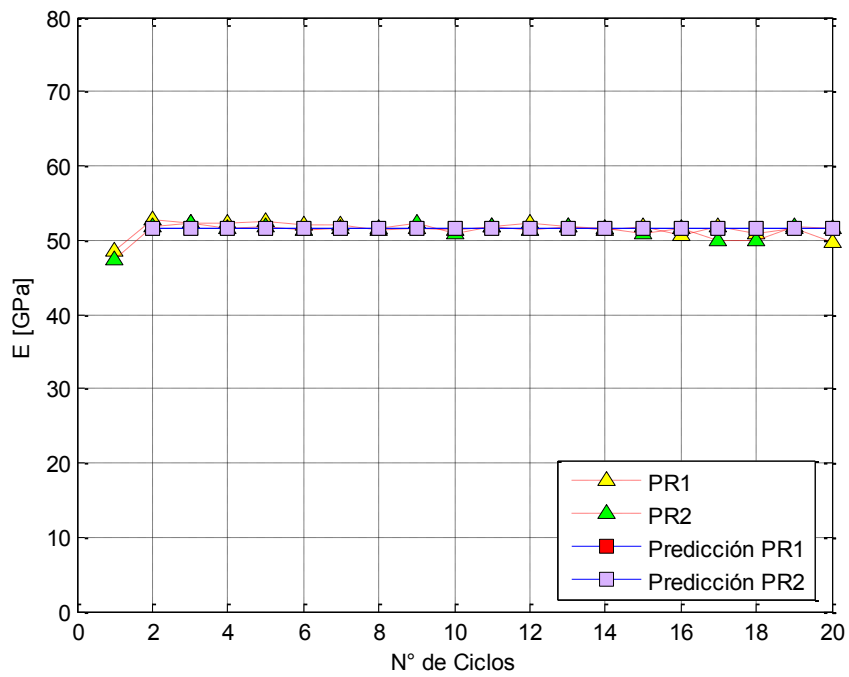


Figura 6-5 : Predicción del módulo de elasticidad, rutina 1, cables trenzados

6.2.4.3. Esfuerzos de Transformación

En la Figura 6-6 se muestra el valor del esfuerzo de transformación obtenido por el programa y se compara con el obtenido experimentalmente mediante el método bilineal. El esfuerzo de transformación obtenido es levemente inferior (3% menos) al valor A de la Tabla 6.1. Esto se debe a que la ley constitutiva considera un alambre recto. De acuerdo al modelamiento matemático desarrollado en el capítulo 3, la rigidez del cable disminuye con el aumento en el ángulo θ . Dicha disminución en la rigidez hace que la trayectoria de tensiones se incline hacia la derecha respecto de la que describiría un alambre recto. En consecuencia, el esfuerzo de transformación para un cable trenzado es inferior al de un alambre recto.

Por otra parte, como la curva constitutiva linealizada se modeló a partir de ensayos con deformación efectiva inferior al 2%, se tuvo que extrapolar para representarla hasta el 2.2% (Figura 6-1). Se privilegió que el programa fuese capaz de predecir en forma correcta la tensión máxima de la ley constitutiva por sobre el esfuerzo de transformación real, ya que en aplicaciones de ingeniería los diseños usualmente quedan definidos por este parámetro. En consecuencia, el esfuerzo de transformación entregado por el programa está sobrestimado.

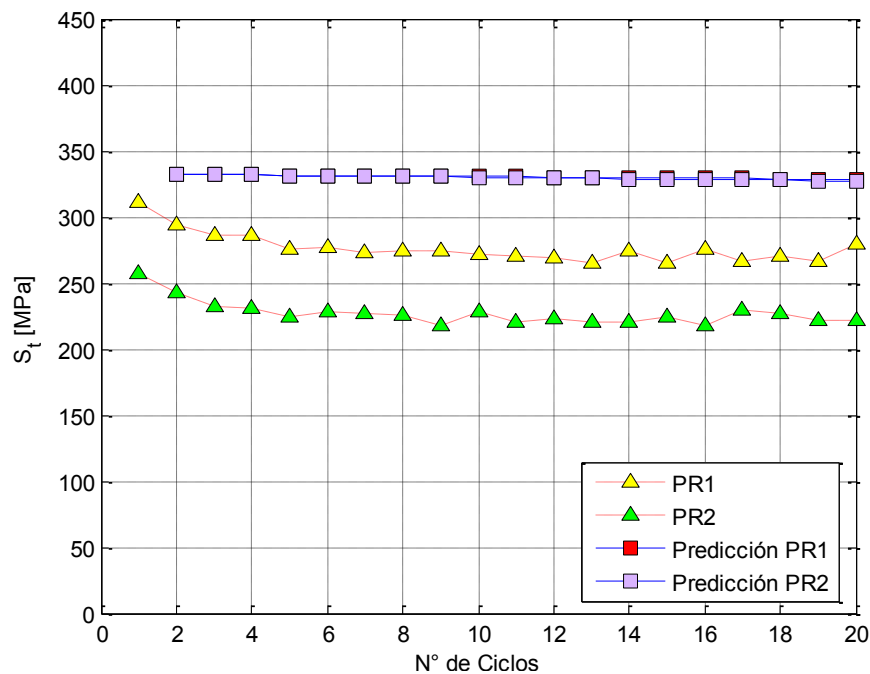


Figura 6-6 : Predicción del esfuerzo de transformación, rutina1, cables trenzados

6.2.4.4. Rigidez Secante

La rigidez secante se mide como la pendiente de la recta que une el origen con el punto de la curva al momento de máxima amplitud de cada ciclo. Como los resultados entregados por el modelo numérico ignoran el primer ciclo (debido al efecto de entrenamiento), el origen de los datos está situado al comienzo del segundo ciclo. Para que los resultados para la rigidez secante fueran comparables, éstos se calcularon como el cociente entre la tensión en el punto de amplitud máxima de cada ciclo y la suma del valor de la deformación en dicho punto con la deformación remanente del primer ciclo de los resultados experimentales.

En a Figura 6-7 se compara la predicción realizada para la rigidez secante en función del número de ciclos y se compara con los resultados experimentales. Se observa que la estimación realizada por el modelo numérico se ajusta de buena forma a lo obtenido experimentalmente, obteniendo un error promedio del 3.2% y 1.7% para las probetas 1 y 2, respectivamente.

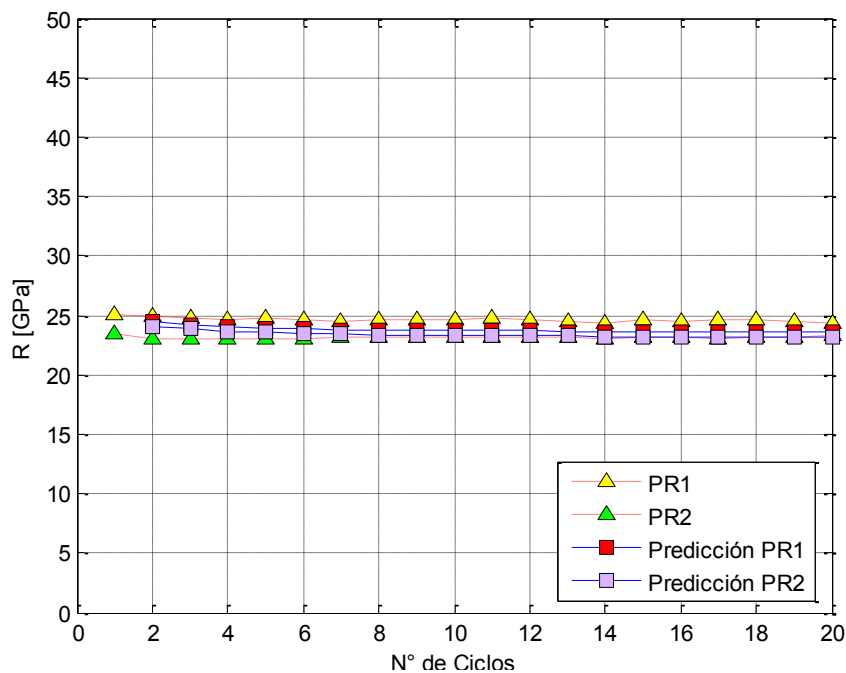


Figura 6-7 : Predicción de la rigidez secante, rutina 1, cables trenzados

6.2.4.5. Tensiones Máximas

En la Figura 6-8, se observa que las tensiones predichas por el modelo numérico siguen una tendencia decreciente hasta estabilizarse en torno a los 463 MPa. Dicha tendencia corresponde a la tasa de deformaciones remanentes impuesta. Luego de cada ciclo, la ley constitutiva se desplaza hacia la derecha producto de las deformaciones permanentes; sin embargo, la deformación máxima impuesta se mantiene constante. En consecuencia, la diferencia entre la deformación máxima (fija) y el origen de la ley constitutiva (variable) es cada vez menor, lo que equivale a mantener la ley constitutiva fija y disminuir la amplitud de cada ciclo, resultando en tensiones máximas menores.

Con respecto a los valores obtenidos, el programa es capaz de predecir con un error promedio del 2.8% los resultados para la tensión máxima en la probeta 1 y de un 1.4% para la probeta 2. Como se mencionó en el capítulo 5, es probable que hayan diferencias en el ángulo de la hélice entre ambas probetas, ya que la probeta 2 presentó tensiones máximas inferiores pese a haber sido sometida a deformaciones mayores que la probeta 1. Bajo el supuesto anterior, el programa responde en forma adecuada, ya que los resultados para la tensión en la probeta 2 son levemente superiores a los obtenidos para la primera probeta.

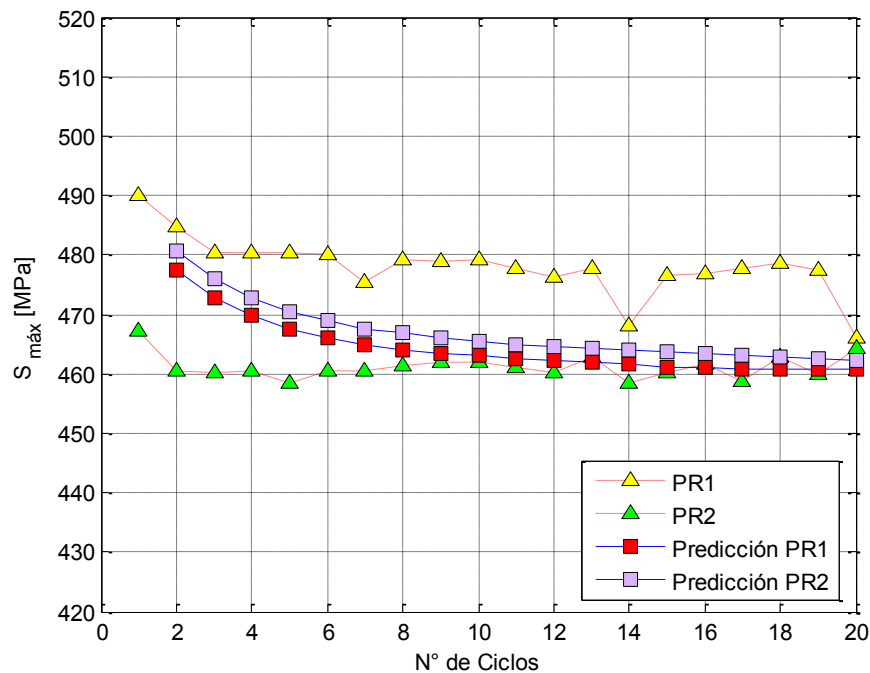


Figura 6-8 : Predicción de esfuerzos máximos, rutina 1, cables trenzados

6.2.4.6. Factores de Amortiguamiento Equivalente

En la Figura 6-9 se muestran los resultados obtenidos para el factor de amortiguamiento viscoso equivalente y su evolución con el número de ciclos. Se observa que el programa subestima significativamente este parámetro, en efecto, se tienen errores promedio de un 24% y 16% respectivamente para las probetas 1 y 2. Esta disminución se debe al tipo de modelación efectuado para la ley constitutiva. Específicamente, el último tramo de ella, que se modela como lineal – elástico, sin considerar disipación energética. Las curvas experimentales, en cambio, indican que el material retorna a su posición de origen siguiendo una trayectoria de tensiones distinta a la inicial, por lo que existe disipación de energía en todo el ciclo. Por otra parte, la disipación de energía que predice el programa se mantiene constante en el número de ciclos al no considerar los efectos, mencionados en el capítulo 5, que hacen que las curvas reales varíen su comportamiento.

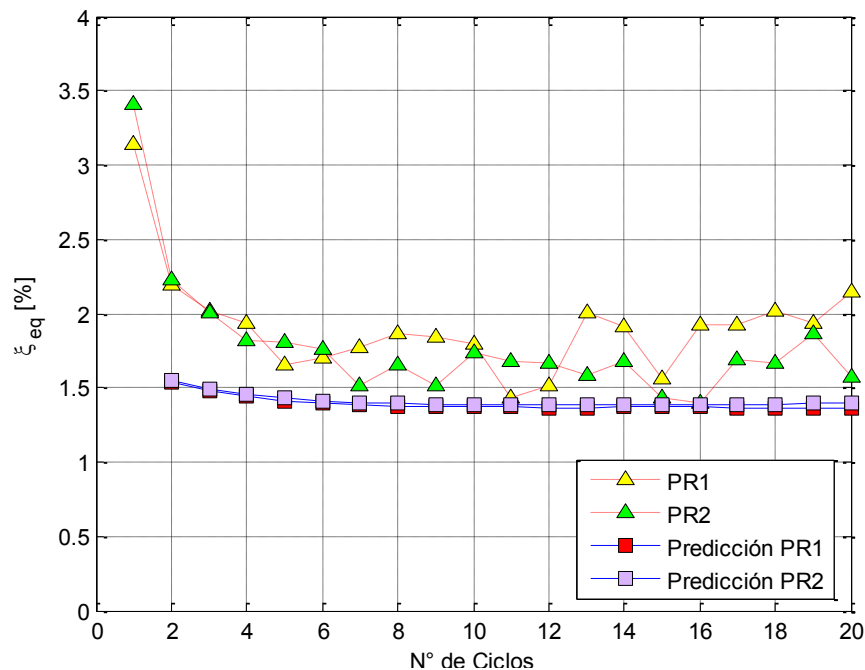


Figura 6-9 : Predicción de los factores de amortiguamiento, rutina 1, cables trenzados

En la Tabla 6.2 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 6.2 : Resumen de parámetros estimados por el software, rutina 1, cables trenzados

Ciclo	E1 [GPa]	E2 [GPa]	S _{t1} [MPa]	S _{t2} [MPa]	R1 [GPa]	R2 [GPa]	S _{max1} [MPa]	S _{max2} [MPa]	ξ _{eq1} [%]	ξ _{eq 2} [%]
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	51.6	51.6	332.4	332.4	27.6	27.4	477.4	480.5	1.532	1.549
3	51.6	51.6	331.9	332.1	27.8	27.6	472.7	476.0	1.479	1.495
4	51.6	51.6	331.9	331.6	28.0	27.8	469.8	472.6	1.440	1.460
5	51.6	51.6	331.5	331.4	28.1	27.9	467.5	470.4	1.414	1.431
6	51.6	51.6	331.5	331.4	28.2	28.0	466.1	469.0	1.396	1.412
7	51.6	51.6	331.0	330.9	28.2	28.0	464.8	467.6	1.388	1.403
8	51.6	51.6	330.9	330.7	28.3	28.1	464.1	466.8	1.376	1.398
9	51.6	51.6	330.7	330.4	28.3	28.1	463.5	466.1	1.373	1.389
10	51.6	51.6	330.6	330.2	28.3	28.1	463.1	465.6	1.369	1.390
11	51.6	51.6	330.3	329.7	28.3	28.1	462.6	465.0	1.369	1.390
12	51.6	51.6	330.1	329.5	28.3	28.1	462.2	464.6	1.368	1.389
13	51.6	51.6	329.9	329.2	28.3	28.1	461.9	464.2	1.368	1.387
14	51.6	51.6	329.6	328.9	28.3	28.1	461.6	463.9	1.370	1.388
15	51.6	51.6	329.1	328.8	28.3	28.1	461.1	463.7	1.370	1.388
16	51.6	51.6	329.1	328.5	28.3	28.1	461.0	463.4	1.369	1.389
17	51.6	51.6	329.0	328.2	28.3	28.1	460.9	463.1	1.367	1.389
18	51.6	51.6	328.9	327.9	28.3	28.1	460.8	462.8	1.367	1.392
19	51.6	51.6	328.9	327.6	28.3	28.1	460.7	462.5	1.367	1.394
20	51.6	51.6	328.8	327.3	28.3	28.1	460.7	462.2	1.367	1.394

6.2.5. Alambres en Paralelo

6.2.5.1. Gráficos de Tensión vs Deformación

Como el programa no predice el efecto de entrenamiento, las curvas se modelaron desde el segundo ciclo en adelante. Para poder comparar las curvas experimentales con el modelo numérico a éstas se les quitó el primer ciclo y luego se centraron restando la deformación remanente de dicho ciclo.

La Figura 6-10 y la Figura 6-11 comparan los resultados experimentales con los calculados con el modelo numérico. Como se mencionó en la sección 6.2.1, la ley constitutiva se modeló a partir de los datos empíricos obtenidos para el quinto ciclo de la probeta 2, por lo que la predicción del programa para la probeta 2 es muy parecida a la curva real. No obstante, los resultados obtenidos para la probeta 1 se aproximan a la trayectoria de tensiones obtenida experimentalmente en términos de módulo de elasticidad, tensiones máximas y deformaciones remanentes.

De las ecuaciones (3.51) a (3.53) se tiene que el ángulo θ de la hélice disminuye la rigidez del cable, afectando a las tensiones máximas alcanzadas. Al comparar los resultados obtenidos para alambres trenzados (Figura 6-3 y Figura 6-4) con los de alambres en paralelo (Figura 6-10 y Figura 6-11), se observa que la disminución en la rigidez predicha por el modelo concuerda con lo obtenido experimentalmente.

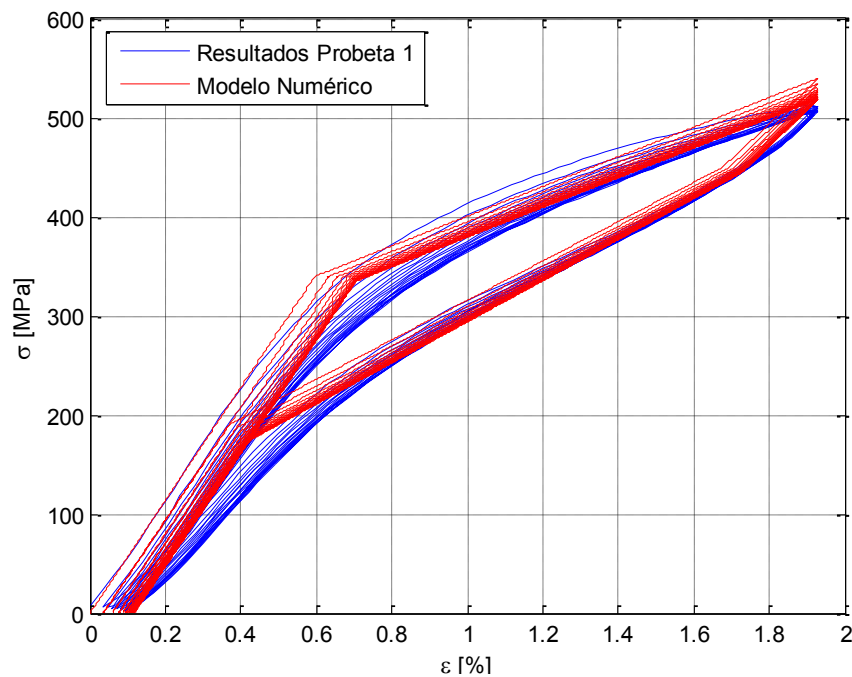


Figura 6-10 : Predicción de tensión vs deformación, probeta 1, rutina1, alambres en paralelo

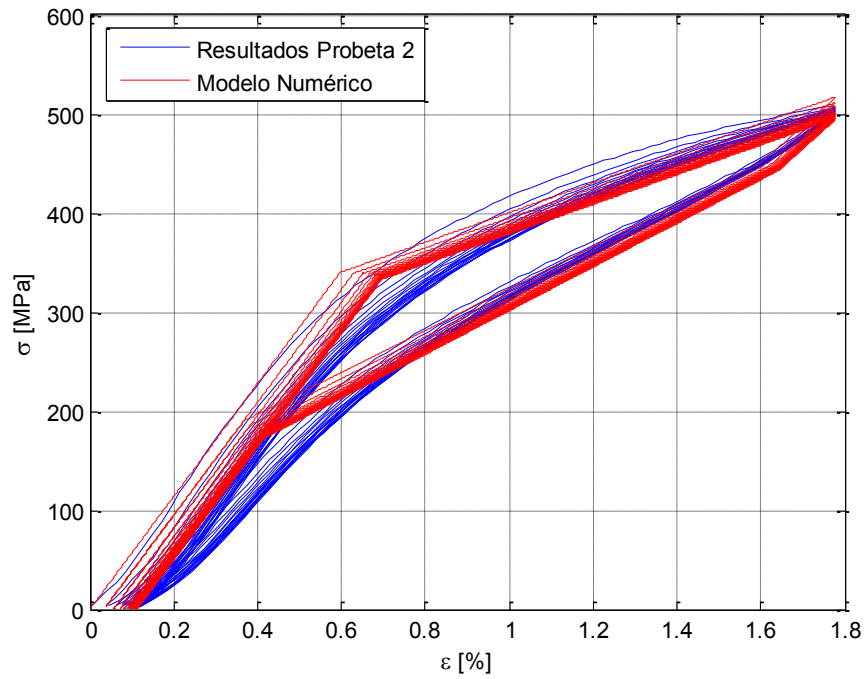


Figura 6-11 : Predicción de tensión vs deformación, probeta 2, rutina 1, alambres en paralelo

6.2.5.2. Módulos de Elasticidad

La Figura 6-12 indica los resultados obtenidos por el modelo numérico para el módulo de elasticidad y los compara con los datos experimentales. Para el caso de alambres en paralelo, en que el ángulo de la hélice es igual a cero, la trayectoria de tensiones sigue la ley constitutiva. De esta forma, el módulo de elasticidad obtenido numéricamente corresponde a los 57 GPa especificados en dicha ley.

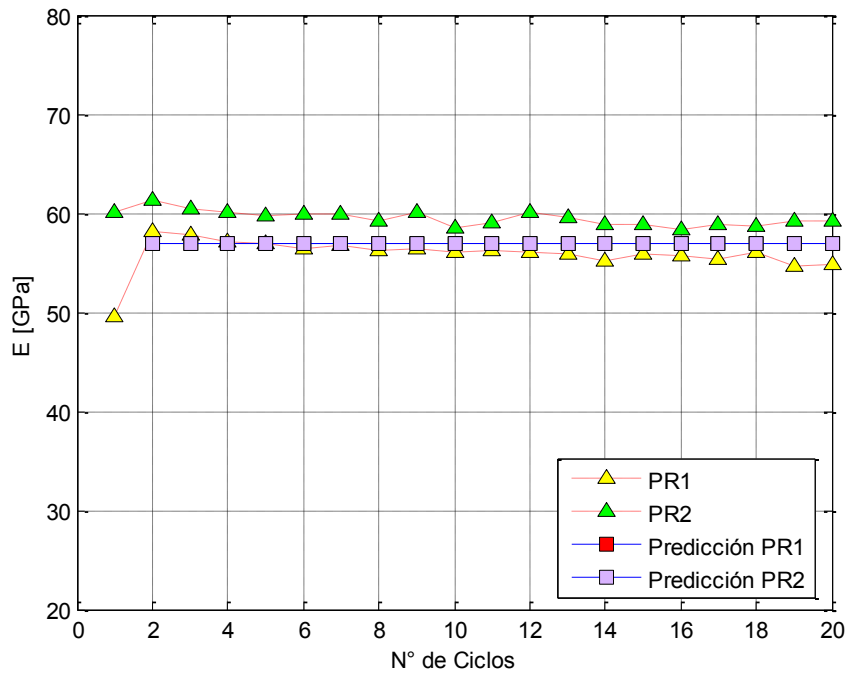


Figura 6-12 : Predicción del módulo de elasticidad, rutina 1, alambres en paralelo

6.2.5.3. Esfuerzos de Transformación

En la Figura 6-13 se muestran los resultados obtenidos por el programa para el esfuerzo de transformación y se comparan con los obtenidos experimentalmente, empleando el método bilineal. Al igual que para el caso del módulo de elasticidad, debido a que la trayectoria de tensiones sigue la ley constitutiva, el valor del esfuerzo de transformación coincide con el valor para la tensión del punto A especificado en la Tabla 6.1.

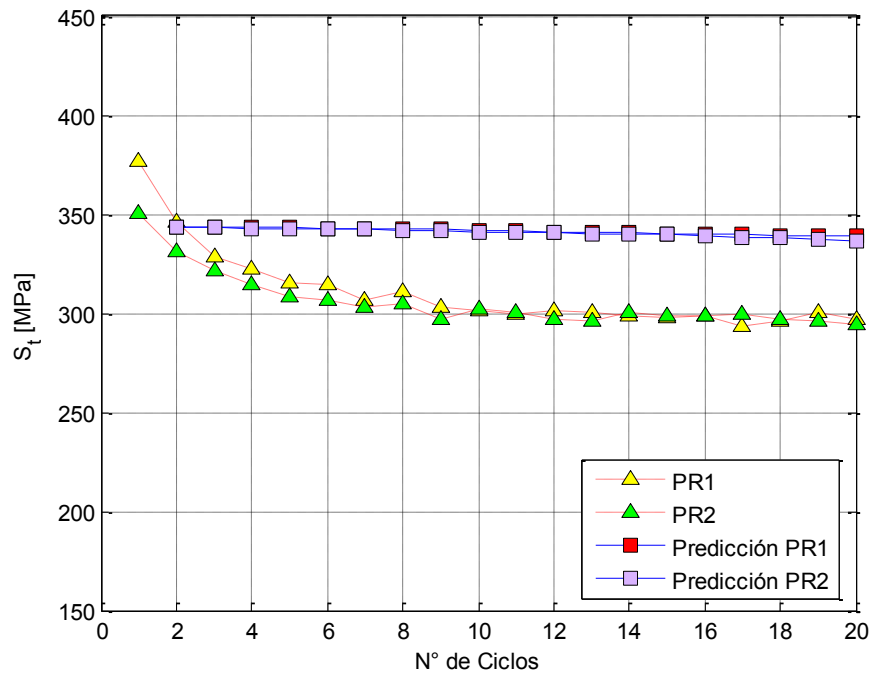


Figura 6-13 : Predicción del esfuerzo de transformación, rutina 1, alambres en paralelo

6.2.5.4. Rigidez Secante

La rigidez secante se mide como la pendiente de la recta que une el origen con el punto de la curva al momento de máxima amplitud de cada ciclo. Como los resultados entregados por el modelo numérico ignoran el primer ciclo (debido al efecto de entrenamiento), el origen de los datos está situado al comienzo del segundo ciclo. Para que los resultados para la rigidez secante fueran comparables, éstos se calcularon como el cociente entre la tensión en el punto de amplitud máxima de cada ciclo y la suma del valor de la deformación en dicho punto con la deformación remanente del primer ciclo de los resultados experimentales.

La Figura 6-14 muestra la predicción de la rigidez secante en función del número de ciclos. Se obtuvo un error promedio de un 3.1% para la probeta 1 y de un 0.7% para la probeta 2. El bajo error obtenido en la probeta 2 se debe a que la ley constitutiva fue modelada a partir de estos resultados.

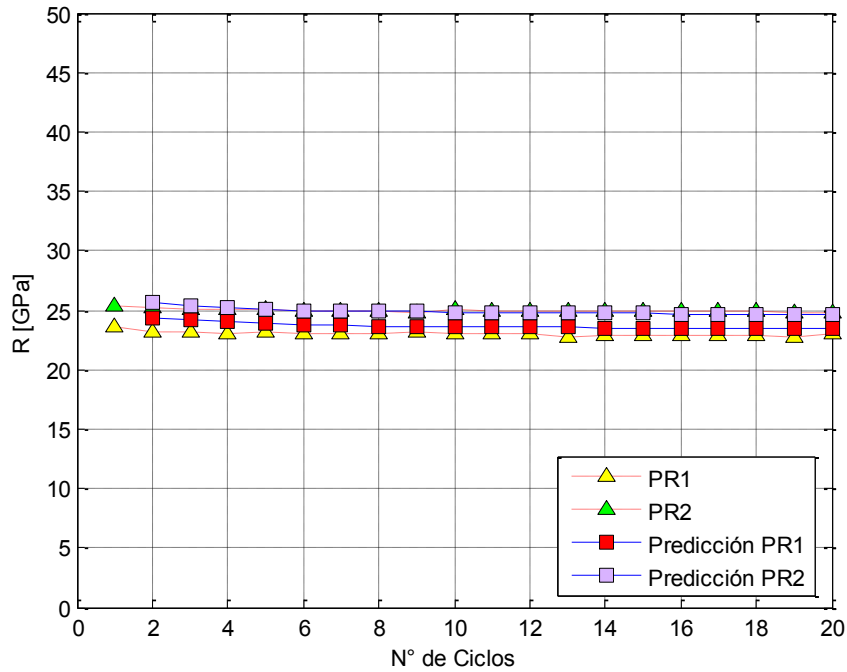


Figura 6-14 : Predicción de la rigidez secante, rutina 1, alambres en paralelo

6.2.5.5. Tensiones Máximas

En la Figura 6-15 se grafican las tensiones máximas obtenidas con el modelo numérico en función del número de ciclos y se comparan con los resultados experimentales. Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico poseen un error promedio del 3% para la probeta 1 y de un 0.5% para la probeta 2. Estas diferencias tienen su origen en el modelamiento de la ley constitutiva, que fue realizado a partir de los resultados obtenidos para la probeta 2. Como la trayectoria de tensiones de los alambres en paralelo sigue la ley constitutiva, las diferencias en los resultados entre ambas probetas corresponden exclusivamente al grado de ajuste que tengan los resultados experimentales con el modelo multilíneal implementado.

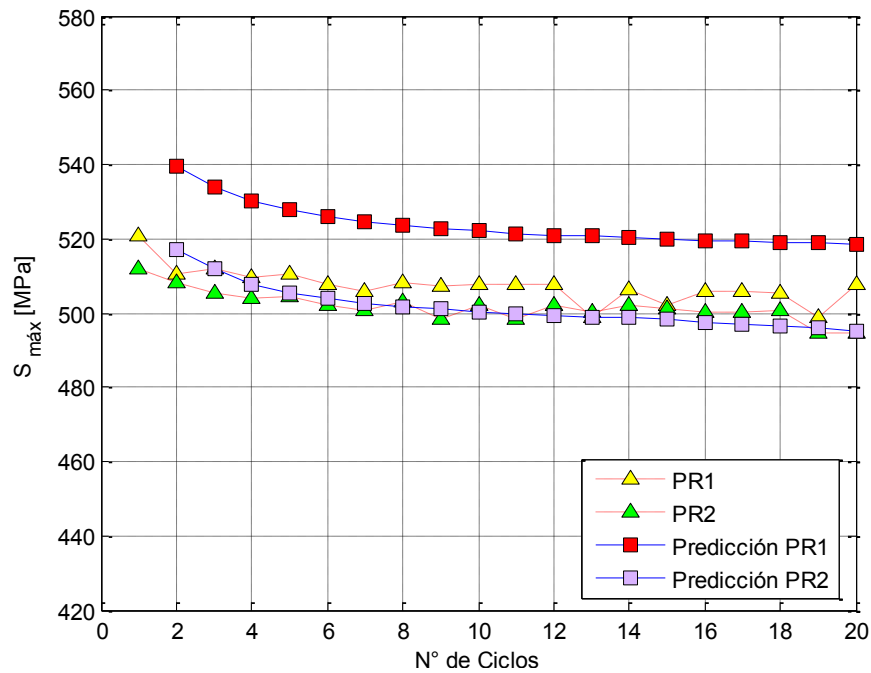


Figura 6-15 : Predicción de esfuerzos máximos, rutina 1, alambres en paralelo

6.2.5.6. Factores de Amortiguamiento Equivalente

En la Figura 6-16 se grafican los resultados para el factor de amortiguamiento equivalente en función del número de ciclos. Se observa que los valores predichos son significativamente menores a los obtenidos de forma experimental. Como se mencionó en la sección 0, existe una gran diferencia entre los valores de amortiguamiento equivalente reales y los que se obtienen a partir del modelo multilíneo empleado por el programa. Esto se debe a que el modelo tipo bandera empleado para estimar la ley constitutiva del material posee un tramo lineal – elástico sin disipación de energía. En este caso, el error promedio es de un 25% y 16% para la probetas 1 y 2 respectivamente.

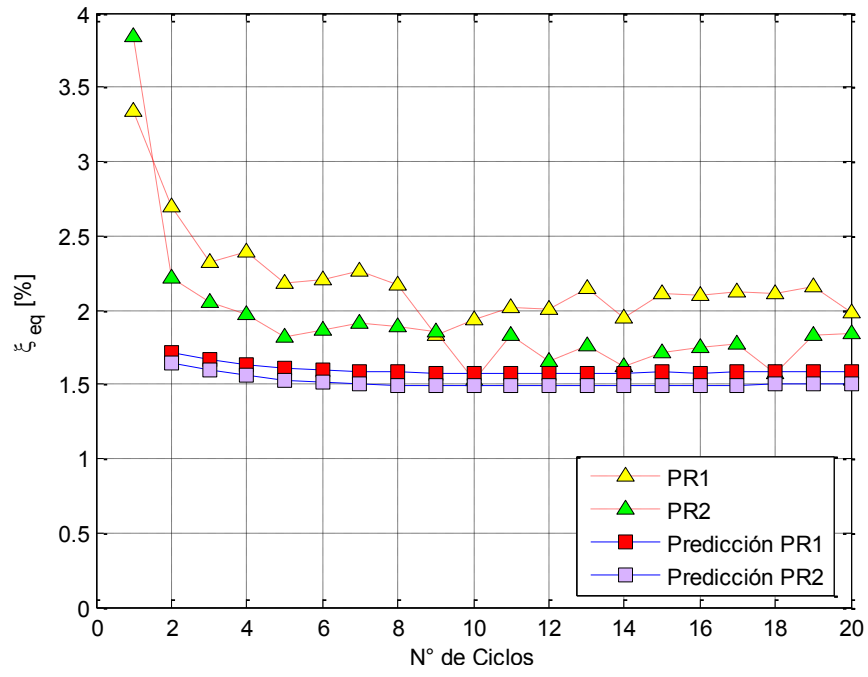


Figura 6-16 : Predicción de los factores de amortiguamiento, rutina 1, alambres en paralelo

En la Tabla 6.3 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 6.3 : Resumen de parámetros estimados por el software, rutina 1, alambres en paralelo

Ciclo	E1 [GPa]	E2 [GPa]	S _{i1} [MPa]	S _{i2} [MPa]	R1 [GPa]	R2 [GPa]	S _{max1} [MPa]	S _{max2} [MPa]	ξ _{eq1} [%]	ξ _{eq2} [%]
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	57.0	57.0	343.8	343.8	28.0	29.1	539.7	517.2	1.714	1.639
3	57.0	57.0	343.5	343.1	28.2	29.3	534.1	511.7	1.670	1.592
4	57.0	57.0	343.3	342.6	28.4	29.5	530.3	507.9	1.634	1.556
5	57.0	57.0	343.0	342.5	28.5	29.6	527.6	505.5	1.612	1.528
6	57.0	57.0	342.9	342.4	28.6	29.7	525.9	503.9	1.595	1.513
7	57.0	57.0	342.7	342.2	28.6	29.7	524.7	502.7	1.588	1.500
8	57.0	57.0	342.4	341.9	28.6	29.8	523.6	501.8	1.579	1.495
9	57.0	57.0	342.1	341.6	28.6	29.8	522.9	501.1	1.578	1.493
10	57.0	57.0	341.6	341.1	28.6	29.8	522.0	500.2	1.578	1.492
11	57.0	57.0	341.3	340.9	28.6	29.8	521.5	499.8	1.576	1.489
12	57.0	57.0	341.0	340.6	28.7	29.8	521.0	499.3	1.572	1.488
13	57.0	57.0	341.1	340.1	28.7	29.8	520.9	498.7	1.572	1.487
14	57.0	57.0	340.5	340.1	28.6	29.8	520.3	498.6	1.576	1.487
15	57.0	57.0	339.9	339.6	28.6	29.8	519.8	498.2	1.579	1.491
16	57.0	57.0	339.8	339.1	28.6	29.8	519.5	497.6	1.577	1.494
17	57.0	57.0	339.6	338.5	28.6	29.7	519.3	497.0	1.580	1.497
18	57.0	57.0	339.4	337.9	28.6	29.7	519.0	496.5	1.580	1.499
19	57.0	57.0	339.1	337.3	28.6	29.7	518.8	495.9	1.583	1.502
20	57.0	57.0	338.8	336.8	28.6	29.7	518.5	495.3	1.583	1.505

6.3. Resultados para Ensayos Cíclicos a Amplitud Variable

Los resultados expuestos en esta sección intentan predecir los resultados de los ensayos correspondientes a la rutina 2 descrita en la sección 4.5.2. Como se mencionó en el capítulo 5, al incurrir en deformaciones mayores a las del rango superelástico, el material comienza a retener martensita deformada plásticamente, lo que afecta sus propiedades y modifica la ley constitutiva con cada ciclo de carga. El modelo numérico no considera estos cambios en el comportamiento del material, por lo que intentar predecir el comportamiento de cables sometidos a deformaciones que se extienden por sobre el límite superelástico implica aceptar un error en la modelación y, por consiguiente, en los resultados obtenidos.

Para evaluar la capacidad del programa para predecir ciclos a amplitud variable, primero se consideraron únicamente los primeros 11 ciclos de la rutina 2. Estos corresponden al ciclado que se realiza dentro del rango superelástico del material. Luego, se intentó predecir el comportamiento del material incluyendo los ciclos de deformación hasta el 5%. Para ello, se modificó la ley constitutiva de acuerdo a los datos obtenidos en forma experimental para los alambres en paralelo. Se incluyen los resultados obtenidos para 2 modelos lineales de curva constitutiva hasta el 5%.

Como se explicó en la sección 5.3.2.1, las probetas de alambres en paralelo fueron ensayadas inmediatamente después de haber aplicado la rutina 1 sobre ellas. En consecuencia, sus resultados experimentales incluyen la deformación remanente del ensayo anterior. Para poder comparar los resultados del software con los datos experimentales, éstos se centraron de la misma forma en que se centraron los datos empleados en los ensayos a amplitud constante.

Para el análisis de resultados, se incluyen las curvas de tensión – deformación, las tensiones máximas y el factor de amortiguamiento por ser los factores más relevantes en los diseños de ingeniería.

6.3.1. Datos de Entrada

6.3.1.1. Archivo de Cargas (deformaciones)

El archivo de cargas utilizado corresponde al mismo patrón de deformaciones utilizado en la rutina 2 de ensayo, descrita en la sección 4.5.2, pero descartando el ciclo a 8% (Figura 6-17). Se empleó un paso de avance de las deformaciones $\Delta\varepsilon$ de 0.001. Para el estudio de deformaciones variables dentro del rango superelástico, se emplearon sólo los 11 primeros ciclos de carga.

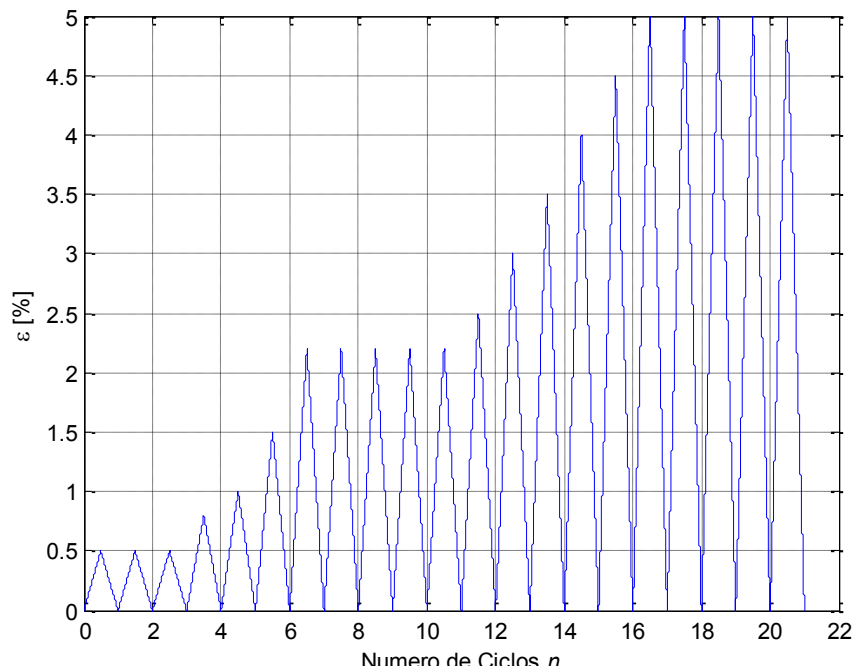


Figura 6-17 : Deformaciones de entrada para simulación de rutina 2

6.3.1.2. Deformaciones Remanentes

Para modelar las deformaciones remanentes en el cable, se estudió la relación entre δ_ε y ε_{max} de las curvas de alambres en paralelo, explicitada en la ecuación (6.1). Para ello se consideraron 3 tramos en la curva de la tasa de deformaciones remanentes respecto de la deformación máxima η versus el número de ciclos. La Figura 6-18 indica el ajuste de curvas realizado.

El primer tramo corresponde a los 11 primeros ciclos y no posee deformaciones remanentes. Esto se debe a que el ensayo de las probetas de alambres en paralelo se realizó inmediatamente después de haber aplicado la rutina 1. En consecuencia, la tasa de deformaciones remanentes para deformaciones máximas menores o iguales al 2.2% debe continuar el decaimiento exponencial de la Figura 6-2, que tiende a deformaciones nulas.

El segundo tramo corresponde al aumento lineal de la deformación máxima con el número de ciclos. En la Figura 6-18 se observa que la tasa de deformaciones remanentes respecto de la deformación máxima también crece linealmente. En esta zona, la curva se ajustó mediante una regresión lineal sobre el comportamiento de ambas probetas y luego promediando el parámetro para la pendiente m . De esta manera, la tasa de deformaciones remanentes para este tramo queda representada por la ecuación siguiente:

$$\eta = m \cdot (n - 11) \tag{ 6.3 }$$

donde m corresponde al parámetro obtenido de las regresiones lineales y n al número de ciclos.

El último tramo de la curva corresponde al ciclado a una amplitud constante del 5%. En este caso se empleó el modelo exponencial decreciente utilizado para la predicción de la rutina 1, calibrado para este caso mediante una regresión exponencial decreciente:

$$\eta = A \cdot e^{-\lambda \cdot n} \quad (6.4)$$

El valor de los parámetros utilizados se lista en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 : Parámetros modelo de deformaciones remanentes, alambres en paralelo, rutina 2

Parámetro	Valor
m	0.0083
A	253.26
λ	0.5045

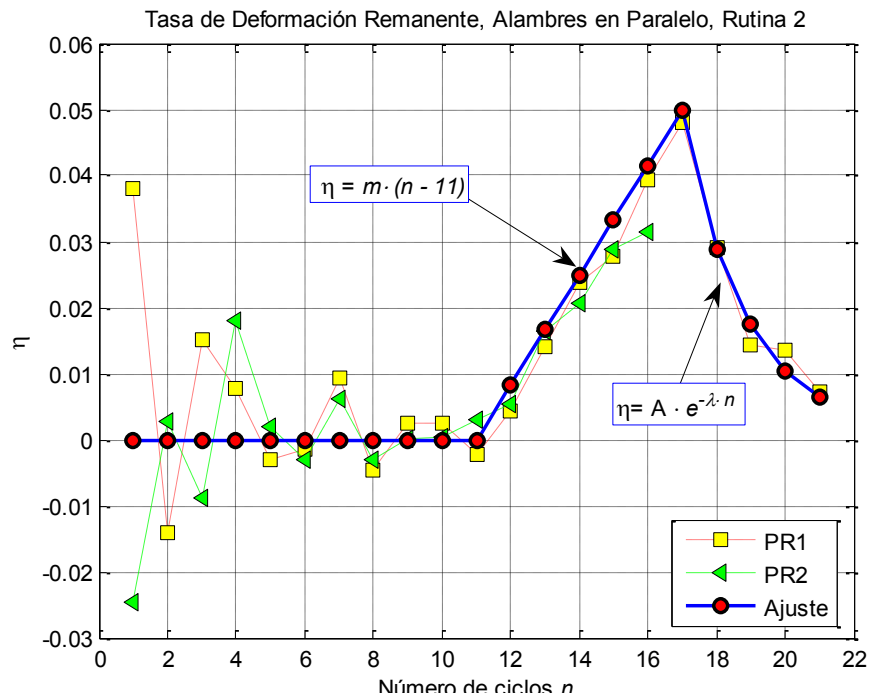


Figura 6-18: Tasa de deformación remanente, alambres en paralelo, rutina 2

Como las probetas de cable trenzado no fueron ensayadas inmediatamente después de haber aplicado la rutina 1, los primeros ciclos presentan deformaciones remanentes. En consecuencia, el primer tramo de la curva de deformaciones permanentes es distinto al empleado para alambres en paralelo. El modelo de deformaciones remanentes empleado en este caso se ilustra en la Figura 6-19. Se modelaron los primeros 3 ciclos con deformación remanente nula por encontrarse en el rango lineal elástico de la ley constitutiva linealizada. Luego, se modeló el crecimiento entre los ciclos 3 y 7 como lineal, siguiendo los mismos parámetros que para los alambres en paralelo. Los ciclos 7 a 11 siguen una tendencia exponencial decreciente. El resto es igual al caso de los alambres en paralelo.

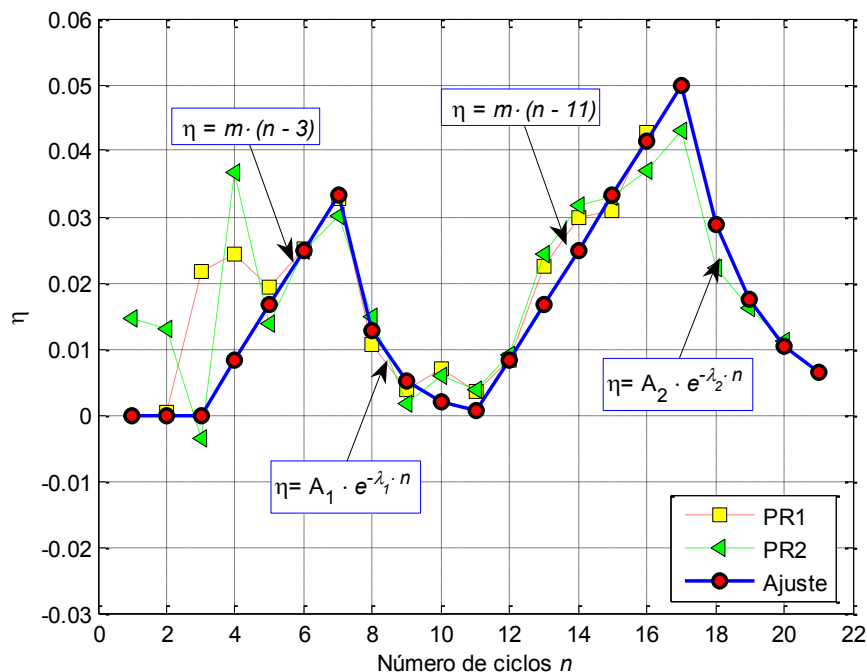


Figura 6-19 : Tasa de deformación remanente, cables trenzados, rutina 2

Tabla 6.5 : Parámetros modelo de deformaciones remanentes, cables trenzados, rutina 2

Parámetro	Valor
m	0.0083
A_1	21.40
A_2	253.26
λ_1	0.4461
λ_2	0.5045

6.3.1.3. Modelo de Ley Constitutiva Utilizado en Ensayos al 5%.

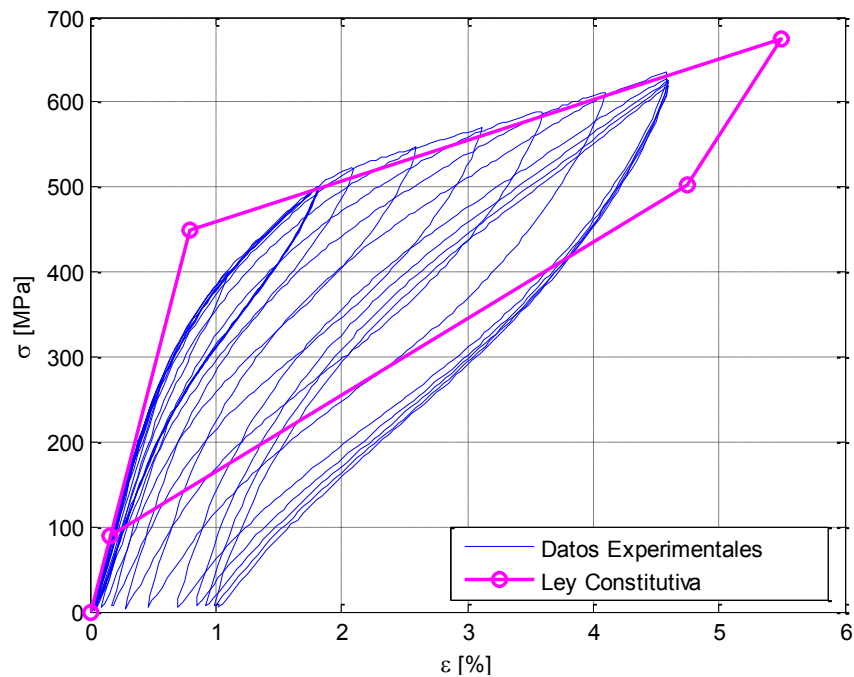


Figura 6-20 : Ley constitutiva empleada en simulaciones con deformaciones sobre el límite superelástico

Para reproducir los ensayos que incurren en deformaciones mayores a las del límite superelástico (2.2%), fue necesario modelar una nueva ley constitutiva. Para ello, se utilizó como referencia la curva tensión – deformación de la probeta 1 de la rutina 2 de ensayo de alambres en paralelo.

Cuando el cable es cargado, la ley constitutiva representa la envolvente de los ciclos de carga, extrapoliéndola hasta el 5.5% de deformación unitaria. Para la descarga en fase predominantemente martensítica, se utilizó una pendiente levemente menor a la que posee el último ciclo de carga y, de esta forma, se simuló la tendencia a la baja que tiene este módulo al retenerse martensita deformada plásticamente. El último tramo, correspondiente a la transformación martensítica inversa, se modeló con una pendiente intermedia entre los ciclos a 2.2% y 5%, escogida arbitrariamente.

Tabla 6.6 : Valores Ley Constitutiva al 5%

Punto	ϵ [%]	σ [Mpa]
A	0.79	450.00
B	5.50	675.00
D	4.75	502.50
E	0.16	89.06

6.3.2. Predicciones Dentro del Rango Superelástico

A continuación se presentan los resultados obtenidos por el modelo numérico para los primeros 11 ciclos de carga, ilustrados en la Figura 6-17, y se comparan con los datos experimentales listados en el capítulo 5. Para la simulación se utilizó la misma ley constitutiva empleada en la predicción de ciclos a amplitud constante (Figura 6-1).

Los datos experimentales no muestran una diferencia significativa entre el primero y el resto de los ciclos de carga, por lo que se modeló el ensayo desde el inicio. Como las probetas de alambres en paralelo fueron ensayadas inmediatamente después de haber aplicado la rutina 1, los datos experimentales poseen una deformación remanente inicial. Para un correcto modelamiento del comportamiento de los alambres en paralelo, las deformaciones de entrada alcanzan el valor máximo indicado en la Figura 6-17 menos la deformación inicial promedio de ambas probetas, obtenida de los datos experimentales. Para comparar los resultados, las curvas experimentales de alambres en paralelo fueron desplazadas hacia el origen restando la deformación inicial.

6.3.2.1. Resultados Para Cables Trenzados

Los resultados entregados por el programa se asemejan a los datos experimentales siguiendo la forma de la curva, desplazándose coherentemente con las deformaciones remanentes y alcanzando tensiones máximas similares. La Figura 6-21 y la Figura 6-22 sobreponen los resultados numéricos con los experimentales y verifican la capacidad del modelo de reproducir las curvas de tensión – deformación. Es importante destacar que la pendiente de descarga de cada ciclo del modelo numérico coincide con los resultados de laboratorio, verificando las ecuaciones para estimar módulo de elasticidad cuando el material se encuentra en proceso de transformación de fase.

Las tensiones máximas obtenidas utilizando el modelo numérico reproducen los valores experimentales con un margen de error del 5.2% y 10.0% para las probetas 1 y 2 respectivamente (Figura 6-23). Si bien el error no es despreciable, los resultados permiten obtener una buena aproximación para realizar diseños de ingeniería.

El factor de amortiguamiento (Figura 6-24) equivalente es subestimado por el programa debido a que el modelo multilínea de la ley constitutiva considera el tramo inicial como elástico, sin capacidad de disipar energía. Esto afecta considerablemente a los primeros 6 ciclos de carga, donde las deformaciones están en torno al límite elástico.

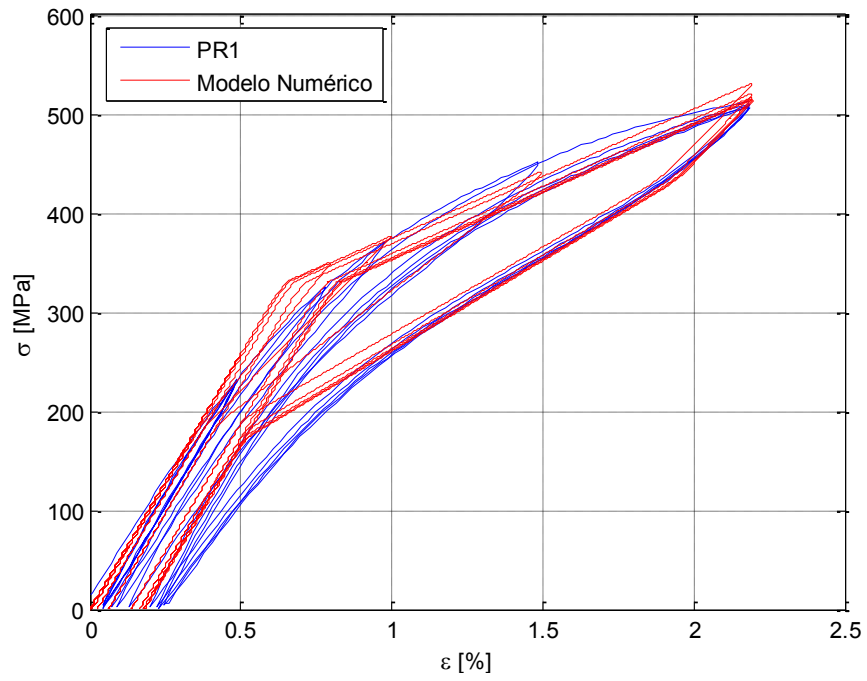


Figura 6-21 : Predicción de tensión vs deformación en rango superelástico, probeta 1, cables trenzados

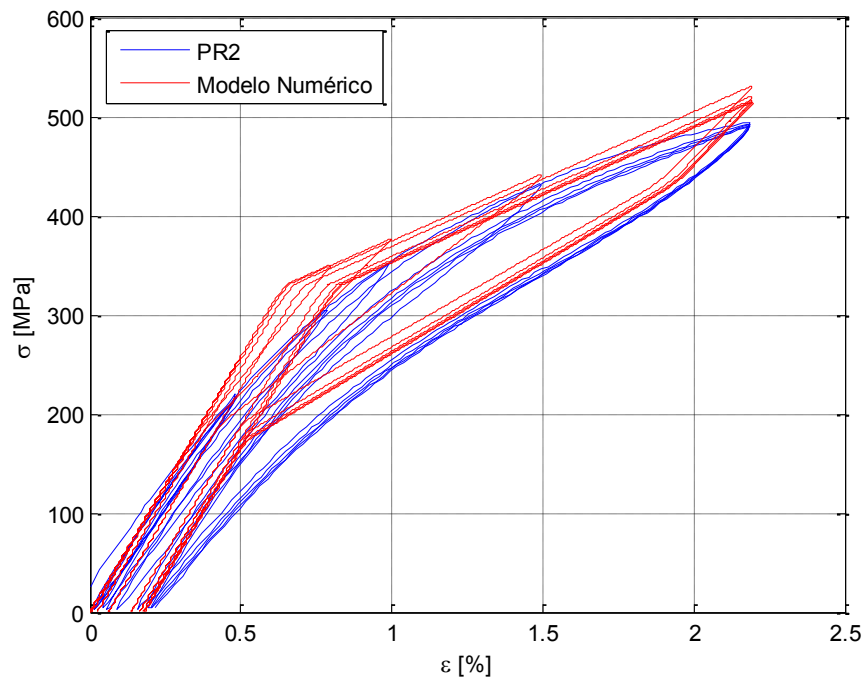


Figura 6-22 : Predicción de tensión vs deformación en rango superelástico, probeta 2, cables trenzados

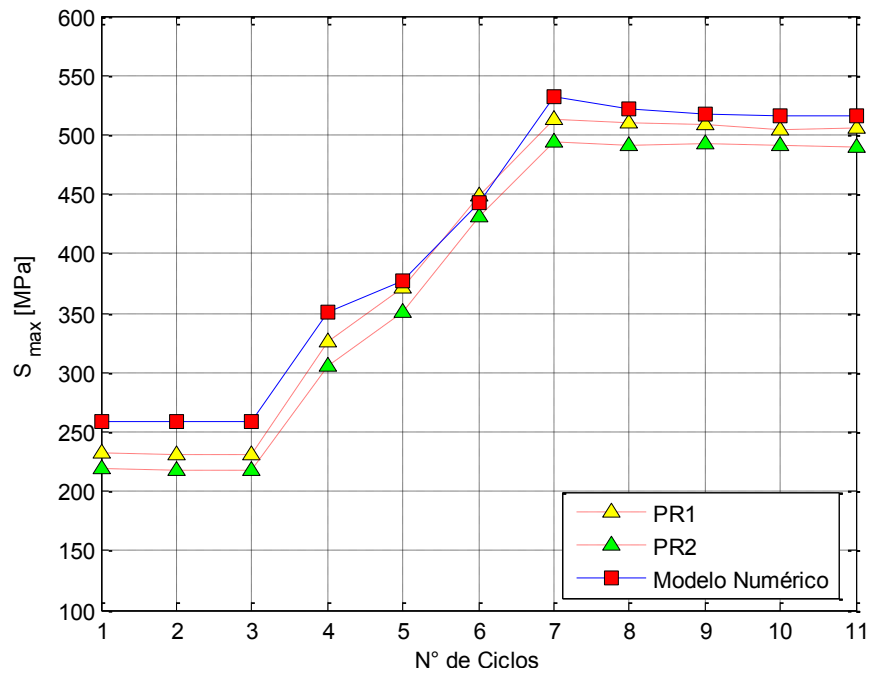


Figura 6-23 : Predicción de tensiones máximas en rango superelástico, cables trenzados

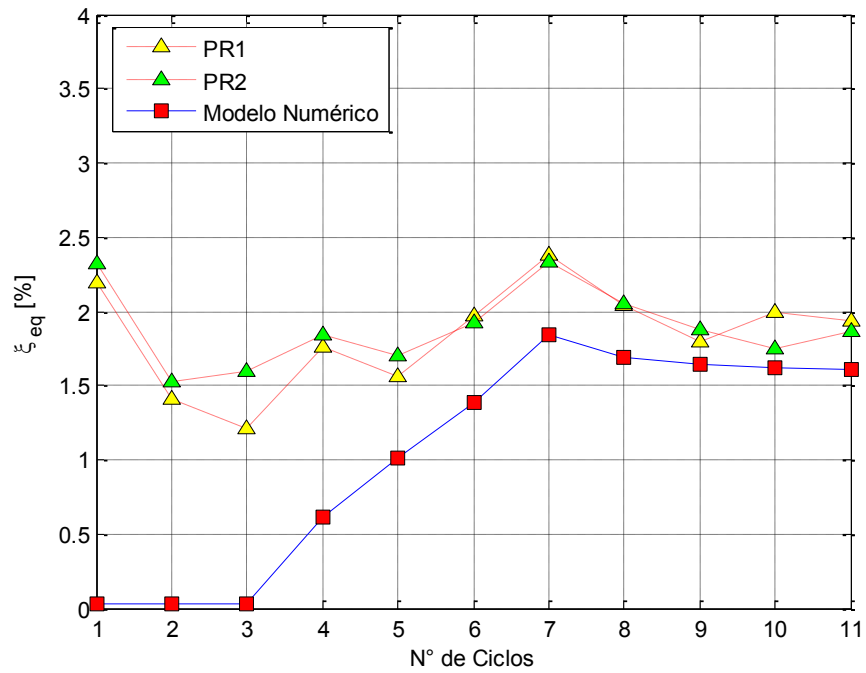


Figura 6-24 : Predicción del factor de amortiguamiento equivalente en rango superelástico, cables trenzados

6.3.2.2. Resultados Para Alambres en Paralelo

Las curvas experimentales de tensión – deformación, para la rutina 2 de alambres en paralelo, comienzan con la deformación remanente acumulada luego de la rutina 1 (ver sección 5.3.2). Para comparar las curvas experimentales con el modelo, por simplicidad éstas se centraron restando la deformación remanente inicial.

La Figura 6-25 y la Figura 6-26 comparan las curvas de tensión – deformación obtenidas por el modelo numérico con las determinadas de forma experimental. Como en este ensayo no se tuvo deformaciones remanentes importantes, los ciclos se superponen entre sí, lo que permite comparar los resultados computacionales de manera más sencilla. Se observa que las curvas calculadas con el modelo numérico se asemejan a las obtenidas en laboratorio, verificando que el programa es capaz de predecir, de manera consistente, ciclos a amplitud variable dentro del rango superelástico.

Las tensiones máximas calculadas con el modelo numérico (Figura 6-27) difieren de los valores reales, en promedio, en un 7.8% y un 3.7%, para las probetas 1 y 2, respectivamente.

Al igual que en el caso de cables trenzados, el factor de amortiguamiento resultante está subestimado por las razones explicadas en la sección anterior.

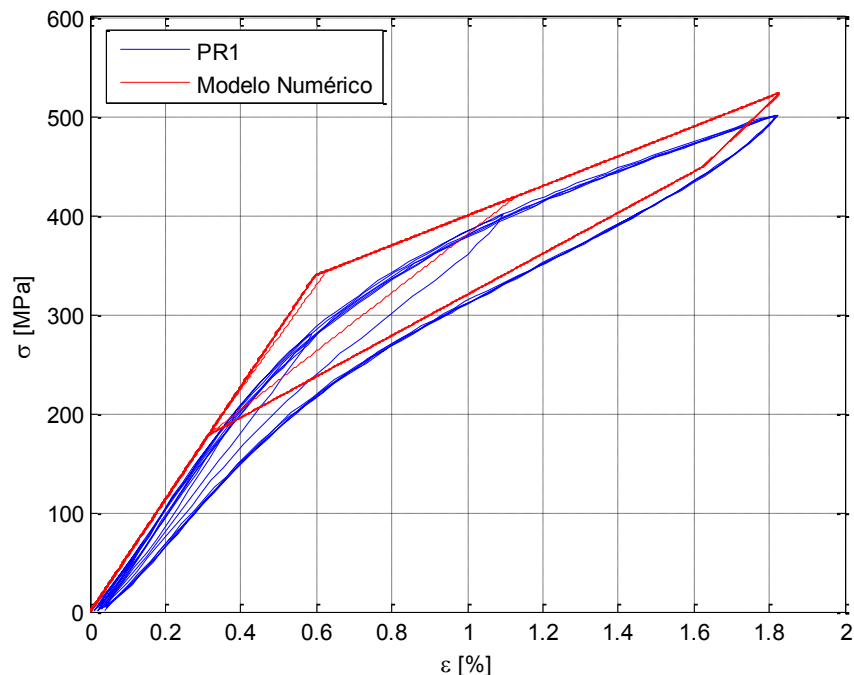


Figura 6-25 : Predicción de tensión vs deformación en rango superelástico, probeta 1, alambres en paralelo

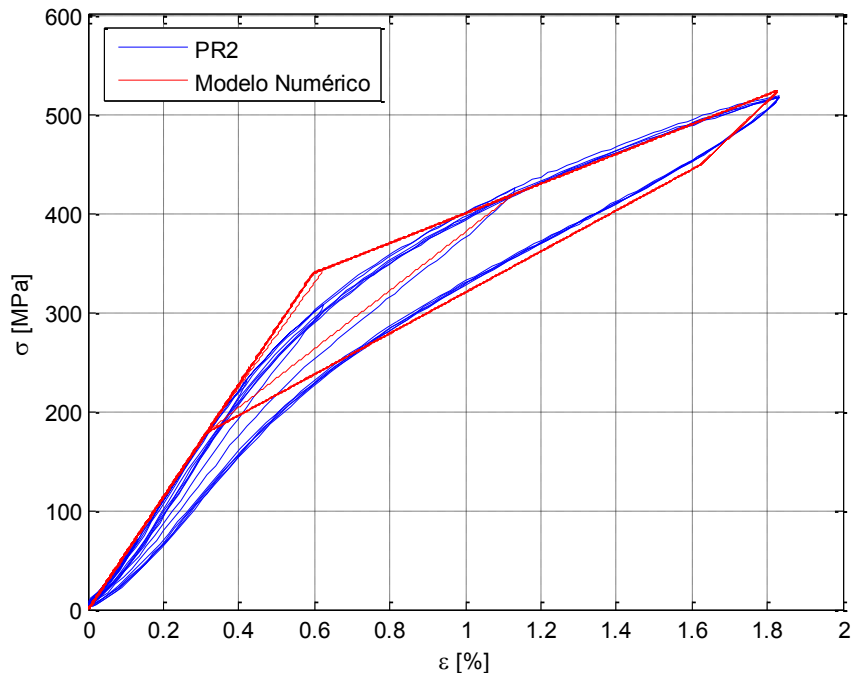


Figura 6-26 : Predicción de tensión vs deformación en rango superelástico, probeta 2, alambres en paralelo

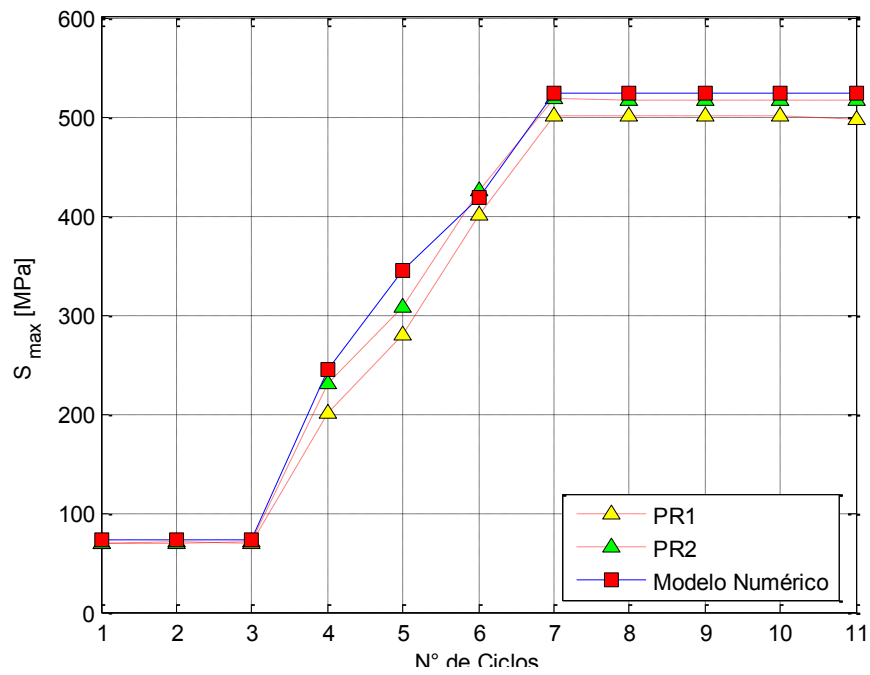


Figura 6-27 : Predicción de tensiones máximas en rango superelástico, alambres en paralelo

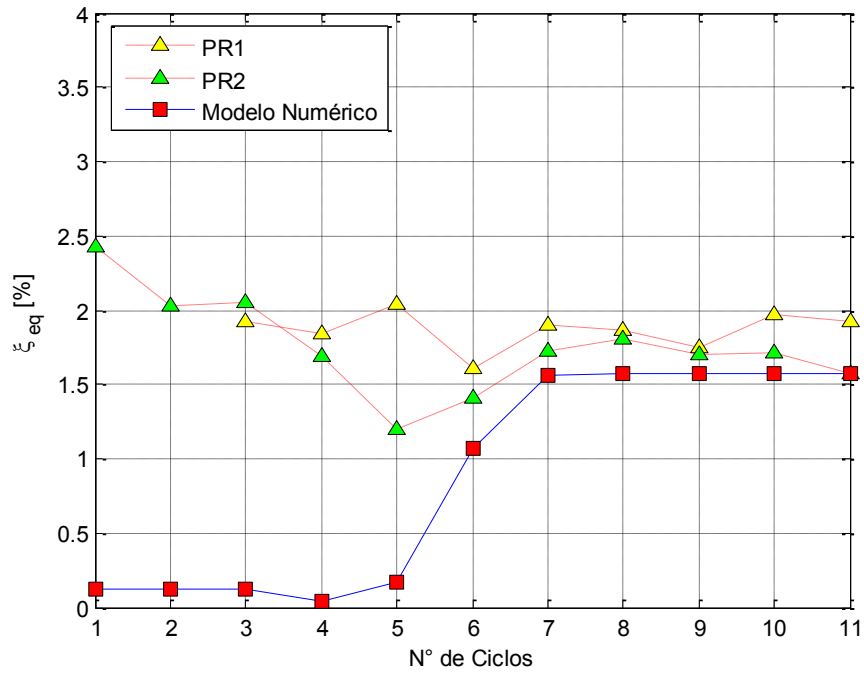


Figura 6-28 : Predicción del factor de amortiguamiento equivalente en rango superelástico, alambres en paralelo

En la Tabla 6.7 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, tanto para cables trenzados como para alambres en paralelo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 6.7 : Resumen de parámetros estimados por el software, deformaciones en rango superelástico

Ciclo	Cables Trenzados		Alambres en Paralelo	
	S_{max} [MPa]	ξ_{eq} [%]	S_{max} [MPa]	ξ_{eq} [%]
1	258.1	0.032	73.0	0.124
2	258.1	0.032	73.0	0.126
3	258.1	0.032	73.0	0.126
4	350.8	0.620	244.0	0.037
5	376.9	1.011	344.5	0.172
6	442.3	1.386	419.3	1.075
7	531.9	1.839	524.0	1.565
8	521.8	1.693	523.8	1.568
9	517.8	1.638	523.5	1.568
10	516.2	1.615	523.3	1.570
11	515.3	1.610	523.1	1.570

6.3.3. Predicciones Hasta el 5% de Deformación

6.3.3.1. Resultados para Cables Trenzados

En la Figura 6-29a se observa que la envolvente de las curvas simuladas por el programa se asemeja a la envolvente experimental de la Figura 6-29b. No obstante, al realizar la comparación ciclo a ciclo es fácil notar que existen diferencias significativas en la trayectoria de tensiones. Para los ciclos a deformaciones iguales o menores al 2.2%, la trayectoria de tensiones calculada difiere significativamente de los datos experimentales, salvo por el módulo de elasticidad del tramo elástico - lineal. Esto se debe a que la ley constitutiva considera un valor elevado del esfuerzo de transformación, de modo de poder representar de mejor forma la envolvente para ciclos a deformación superior.

Las tensiones máximas alcanzadas están sobrestimadas para los ciclos a deformación inferior al 2.2% (primeros 7 ciclos de la Figura 6-30). Una vez superado este límite, las tensiones máximas siguen la envolvente de la curva experimental. Sin embargo, como las deformaciones remanentes son altas, la tensión máxima cae al desplazarse la ley constitutiva. Por esta misma razón, el tramo entre el límite elástico y la tensión máxima de las curvas se aleja de la envolvente experimental con cada ciclo de carga.

Como la ley constitutiva debe ajustarse a la envolvente de la trayectoria de tensiones, se sobrestima significativamente la energía disipada en cada ciclo. En consecuencia, el factor de amortiguamiento equivalente de cada ciclo (Figura 6-31) no corresponde con lo obtenido empíricamente.

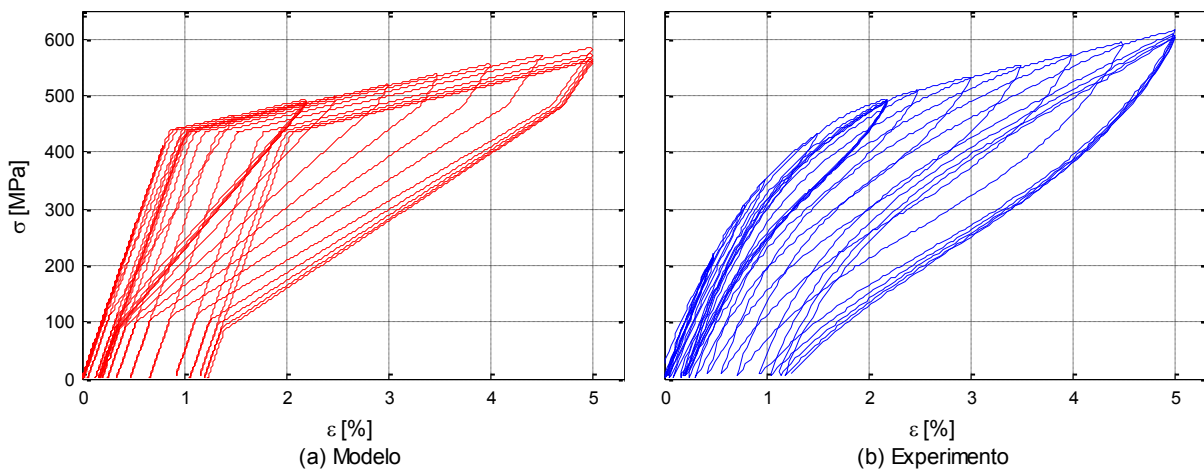


Figura 6-29 : Tensión vs deformación en cables trenzados, deformación hasta 5%

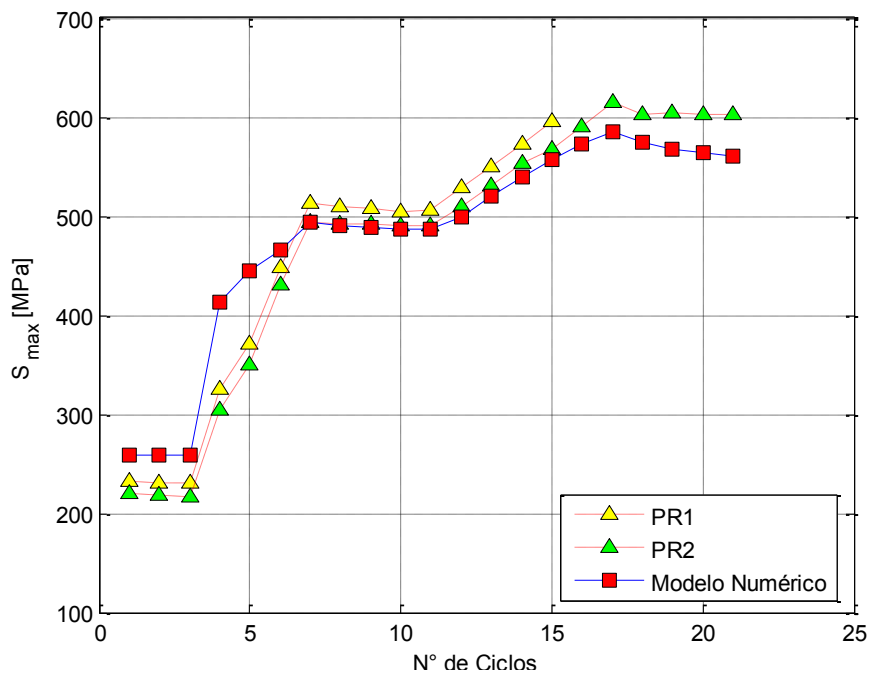


Figura 6-30 : Predicción de tensiones máximas, deformaciones hasta el 5%, cables trenzados

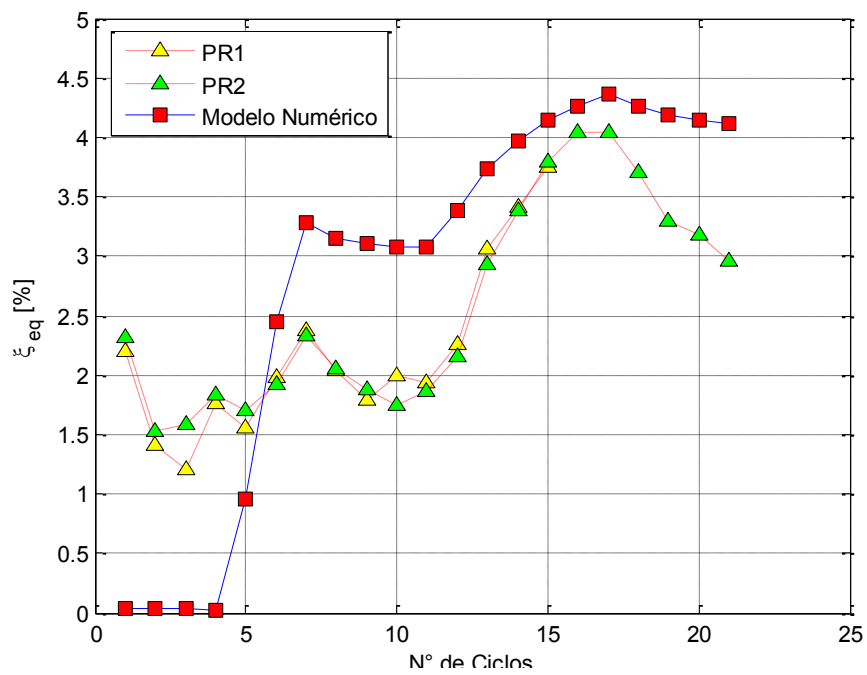


Figura 6-31 : Predicción del factor de amortiguamiento equivalente, deformaciones hasta el 5%, cables trenzados

6.3.3.2. Resultados para Alambres en Paralelo

Al igual que en el caso de cables trenzados, la curva de tensión – deformación de los alambres en paralelo sigue la envolvente de la curva obtenida experimentalmente (Figura 6-32). Se observan las mismas imprecisiones listadas en la sección anterior, en cuanto a la capacidad que tiene el programa de predecir la trayectoria de tensiones real.

Los esfuerzos máximos obtenidos (Figura 6-33), si bien son subestimados, se ajustan de mejor manera que en el caso de cables trenzados (error promedio del 5.5%). Este mejor ajuste se debe a que la ley constitutiva fue modelada a partir de datos experimentales pertinentes. Nuevamente, se observa que la tensión máxima decae con el aumento en las deformaciones remanentes.

La capacidad de disipar energía estimada por el programa es hasta un 50% superior a lo obtenido en las pruebas de laboratorio (Figura 6-34). La ley constitutiva implementada hace que este efecto se manifieste de mayor manera en los primeros ciclos de carga.

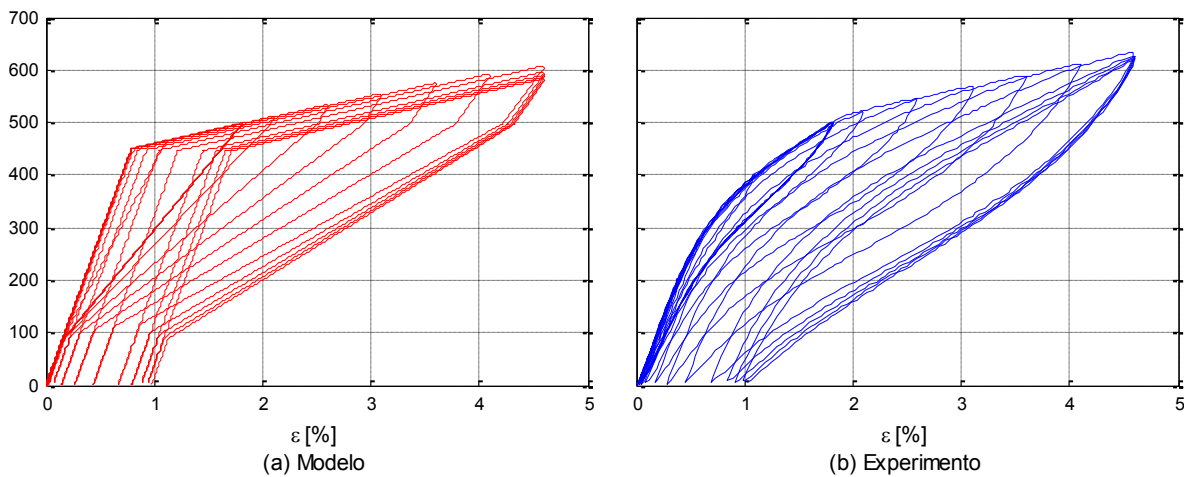


Figura 6-32 : Tensión vs deformación en alambres en paralelo, deformación hasta 5%

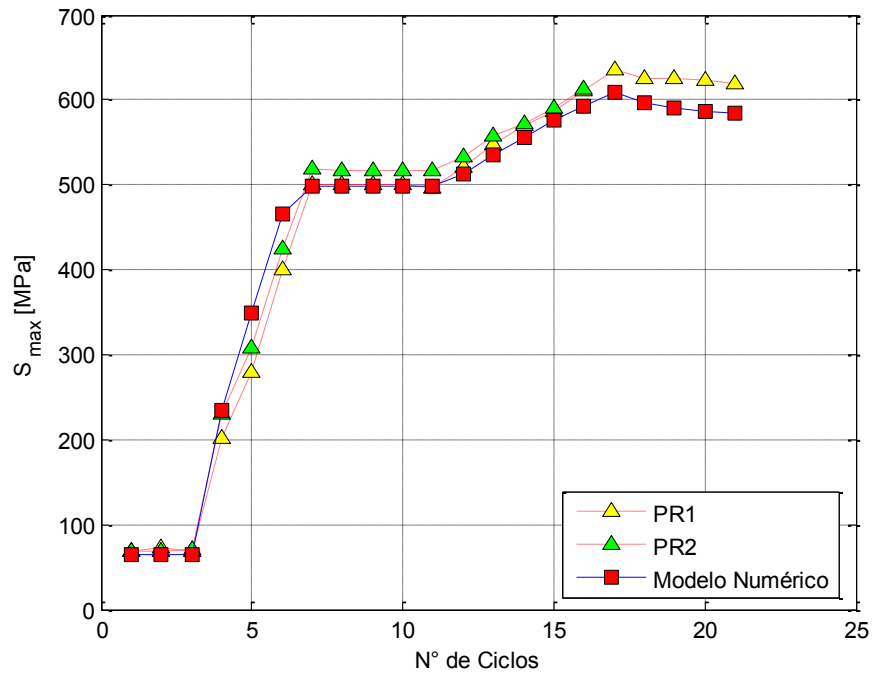


Figura 6-33 : Predicción de tensiones máximas, deformaciones hasta el 5%, alambres en paralelo

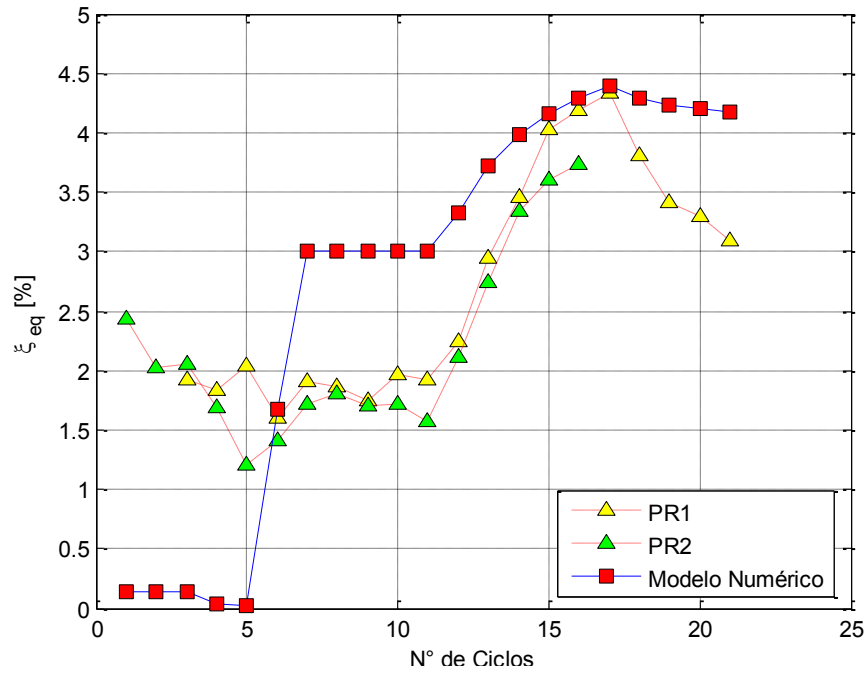


Figura 6-34 : Predicción del factor de amortiguamiento equivalente, deformaciones hasta el 5%, alambres en paralelo

En la Tabla 6.8 se lista un resumen con las propiedades calculadas para cada ciclo, tanto para cables trenzados como para alambres en paralelo, de modo que el lector interesado pueda tenerlas como referencia para futuras investigaciones.

Tabla 6.8 : Resumen de parámetros estimados por el software, deformaciones hasta 5%

Ciclo	Cables Trenzados		Alambres en Paralelo	
	S_{max} [MPa]	ξ_{eq} [%]	S_{max} [MPa]	ξ_{eq} [%]
1	257.9	0.032	63.8	0.142
2	257.9	0.032	63.8	0.143
3	257.9	0.032	63.8	0.143
4	412.4	0.028	234.7	0.039
5	444.7	0.960	348.6	0.026
6	465.4	2.450	465.4	1.677
7	493.7	3.281	498.7	3.003
8	490.1	3.146	498.5	3.003
9	488.4	3.100	498.4	3.003
10	487.7	3.081	498.2	3.008
11	487.2	3.075	498.1	3.008
12	499.5	3.378	512.3	3.331
13	519.9	3.729	534.9	3.722
14	538.9	3.966	556.0	3.982
15	556.5	4.139	575.9	4.164
16	572.0	4.269	593.4	4.298
17	585.3	4.368	608.5	4.400
18	574.2	4.255	597.1	4.288
19	567.7	4.184	591.1	4.239
20	563.5	4.142	586.9	4.200
21	561.1	4.117	584.0	4.172

Capítulo 7: Comentarios y Conclusiones

7.1. Resumen

Esta investigación consistió en estudiar experimentalmente el comportamiento de cables trenzados y alambres en paralelo de una aleación superelástica basada en cobre. Se realizaron ensayos a amplitud constante y a amplitud variable. Para cada ciclo de carga, se calcularon las siguientes propiedades mecánicas: módulo de elasticidad, esfuerzo de transformación de fase, rigidez secante, deformación máxima efectiva, tensiones máximas, factor de amortiguamiento equivalente y deformaciones remanentes en la probeta. Adicionalmente, se extendió un modelo numérico existente capaz de predecir el comportamiento de este tipo de cables al ser sometido a cargas axisimétricas.

La aleación utilizada, Cu-11.8%p.Al-0.5%p.Be, con comportamiento superelástico, ha sido estudiada en numerosos trabajos anteriores. En ellos, se determinó que, para aplicaciones de ingeniería, el tamaño adecuado del grano de la microestructura del material era de 60 μm . Para lograr dicho tamaño, los alambres, de 0.5 mm de diámetro, empleados en la construcción de los cables, fueron recocidos a 700°C por 20 segundos y luego templados en agua con hielo.

Para la fabricación de las probetas de cables trenzados, se diseñó un procedimiento y un montaje para el trenzado de los alambres. Se trabajó con 3 discos paralelos y coaxiales, con perforaciones por las cuales pasaban los alambres a trenzar; algunos de estos discos se hacían rotar y/o desplazar de acuerdo al paso de la hélice del cable.

En la etapa experimental, se fabricaron cuatro probetas de cables. Dos de ellas estaban conformadas por alambres trenzados y las dos restantes, por alambres dispuestos en paralelo. Los cables fueron ensayados cíclicamente en tracción, siguiendo dos rutinas de ensayo. En la primera, se cicló a una amplitud constante (2%). La segunda consistió en ciclos a amplitud variable y creciente entre el 0.5% y el 8%.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente, se extendió un modelo numérico, desarrollado originalmente por Gysling (2008), que predice el comportamiento de cables sometidos a cargas axisimétricas.

7.2. Conclusiones

7.2.1. Resultados Experimentales

- El comportamiento de todas las probetas, de alambres trenzados o de aquellos dispuestos en paralelo, es similar al obtenido en trabajos anteriores al ensayar un único alambre de CuAlBe de 0.5 mm de diámetro y tamaño de grano de 60 μm . Es decir, las curvas cíclicas siguen la trayectoria de tensiones típica del CuAlBe. Sin embargo, el trenzado disminuye significativamente el módulo de elasticidad y la tensión máxima alcanzada en la probeta, haciendo que la curva se incline hacia la derecha.
- A partir de los ensayos a amplitud variable, se obtuvo que el comportamiento superelástico se manifiesta para deformaciones hasta el 3%, aproximadamente. Por otra parte, tanto para los cables trenzados como para las probetas de alambres en paralelo, las deformaciones remanentes acumuladas hasta alcanzar ese nivel de deformación no superan el 0.35%. Una vez superado ese rango, la deformación remanente crece proporcionalmente con el aumento en la amplitud de cada ciclo.
- Se determinó el módulo de elasticidad, esfuerzo de transformación, rigidez secante, tensiones máximas y factor de amortiguamiento equivalente para cada probeta en cada ensayo realizado. Para el caso de alambres en paralelo, se obtuvo que los valores calculados concuerdan con las propiedades calculadas por Marivil (2007) en alambres. Para las probetas de cables trenzados, los valores de los parámetros citados disminuyen, salvo el factor de amortiguamiento equivalente, donde la variación no es significativa para ciclos dentro del rango superelástico.
- La capacidad disipativa de los cables es similar a la encontrada en los estudios de alambres de CuAlBe. El amortiguamiento para ciclos a un 2.2% de deformación es cercano al 2%, y para ciclos al 5% de deformación llega al 4.0% y 4.7% para cables trenzados y alambres en paralelo, respectivamente.
- El amortiguamiento aumenta con la deformación máxima impuesta en la probeta. Para varios ciclos de carga a un mismo nivel de deformación, el factor de amortiguamiento equivalente disminuye con el número de ciclos. Si la deformación de la probeta está dentro del rango superelástico, el valor del amortiguamiento tiende a estabilizarse y converger. Si se supera el límite superelástico, el amortiguamiento disminuye a tasa decreciente, sin que haya certeza de que converja a un valor particular.
- En cuanto a deformaciones remanentes, se obtuvo que para los ensayos a deformación máxima constante del 2.2%, el valor de ε_R es del 0.35% aproximadamente, tanto para cables trenzados

como para alambres en paralelo. Para el ensayo a deformaciones variables, se tiene que para un 5% de amplitud, la deformación remanente acumulada es de un 1.25% para cables trenzados y un 1.4% para alambres en paralelo. En el único trabajo con cables SMA publicado (Reedlunn & Shaw, 2008; con Nitinol), se realizaron ciclos al 10% de deformación, alcanzando una deformación remanente acumulada del 5%. Los resultados obtenidos abren la posibilidad de que las deformaciones remanentes en CuAlBe sean menores a las que se tienen en el Nitinol; sin embargo, como los ensayos se realizaron a amplitudes diferentes, se necesita más información para poder concluir en este aspecto.

- Las deformaciones remanentes crecen al aumentar la deformación máxima en la probeta. También, se obtuvo que para ciclos de carga a un mismo nivel de deformación, la tasa de deformaciones remanentes relativas disminuye con el número de ciclos. Al igual que con el amortiguamiento, dentro del rango superelástico dicha tasa tiende a valores nulos. Fuera de este rango, la tasa decae pero no se tiene certeza de que lo haga hasta valores despreciables.

7.2.2. Resultados Analíticos

- El modelo analítico estima en forma precisa (error del 1%) la disminución en el módulo de elasticidad debido al ángulo de la hélice del cable, respecto de la disminución en dicho parámetro observada experimentalmente.
- Debido al modelo multilineal de ley constitutiva empleado, el modelo numérico sobrestima el esfuerzo de transformación, en todos los casos.
- Se predijo la tensión máxima en el cable, con un error inferior al 10%. El error en la medición de este parámetro se asocia al desplazamiento de la ley constitutiva con el aumento de las deformaciones remanentes. Un modelo más preciso de cómo varía la ley constitutiva con la presencia de deformaciones remanentes puede mejorar la estimación de las tensiones máximas en el cable.
- El amortiguamiento predicho por el modelo numérico es inferior al obtenido experimentalmente. Esta diferencia se produce porque la ley constitutiva implementada considera un tramo lineal – elástico donde no ocurre disipación de energía. Por la misma razón, la subestimación de este parámetro es mayor mientras menor sea la deformación máxima en el cable.

7.3. Limitaciones

- El modelo numérico sólo considera un modelo analítico, el modelo de fibra, para el cálculo de las tensiones en el cable. Dicho modelo representa una buena aproximación de la realidad para las condiciones en que se desarrollaron los ensayos (cable empotrado en sus extremos, ángulo de trenzado inferior a 20°). Sin embargo, de acuerdo al trabajo de Gysling (2008), se cometen errores significativos al predecir el comportamiento de cables libres de girar en sus extremos o cuando el ángulo de trenzado es mayor a 20°. Para evitar esto se requiere efectuar un análisis no lineal.
- En el modelo numérico se considera que los ciclos siempre terminan en descarga completa. No existe la posibilidad de recargar antes de que un ciclo haya llegado a deformación nula.

7.4. Recomendaciones

- Para poder utilizar cables de CuAlBe como elementos estructurales, se requieren estudios a escala real, con cables conformados por varios niveles.
- El modelo multilíneal utilizado para la ley constitutiva fue implementado originalmente para reproducir ensayos de alambres de Nitinol. Para aumentar la precisión del modelo numérico, se requiere un modelo multilíneal de ley constitutiva que considere más tramos, ajustándose a la curva de tensión – deformación del CuAlBe. Además, se recomienda implementar un modelo que considere siempre disipación de energía en la descarga.
- Se recomienda implementar una función que permita que el modelo numérico sea capaz de predecir el comportamiento de cables SMA cuando la recarga se produce antes de que exista deformación nula o se haya alcanzado un determinado nivel de deformación remanente.
- Se requieren estudios de las deformaciones remanentes en cables de CuAlBe para poder determinar un modelo preciso de cómo éstas se incrementan con el número de ciclos.
- Para aumentar la precisión del modelo numérico, se recomienda incorporar una función que modifique el modelo ley constitutiva en función de las deformaciones remanentes en el cable. Actualmente, la ley constitutiva se desplaza hacia la derecha según las deformaciones remanentes, ocasionando que se subestimen las tensiones en el cable.

Bibliografía

- [1] Álvarez, F., Dávila, J.D, Cominetti, R. & Ramírez, H. (2005). Cálculo Vectorial, Variable Compleja y Ecuaciones en Derivadas Parciales. pp. 3 - 13. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (Apuntes para el curso Matemáticas Aplicadas)
- [2] Abeyaratne, R., Kim, S.J. & Knowles, J.K. (1994). Continuum Modeling of Shape Memory Alloys, AMD-vol. 189/PVP-vol. 292. *Mechanics of Phase Transformations and Shape Memory Alloys*, ASME; pp. 59 - 69
- [3] Araya, R., Marivil, M., Mir, C., Moroni, O., & Sepúlveda, A. (2008). Temperature and Grain Size Effects in the Behavior of CuAlBe SMA Wires Under Cyclic Loading. *Material Science and Engineering A*. Vol. 496, N°1-2, pp. 209 - 213.
- [4] Araya, R. (2009). Microestructura y Comportamiento Mecánico de una Aleación Superelástica Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be en Ensayos de Tracción Monotónicos y Cíclicos. M.Sc. Thesis. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [5] Boyd, J.G. & Lagoudas, D.C. (1996). Thermodynamical Constitutive Model for Shape Memory Materials. Part I. The Monolithic Shape Memory Alloy. *International Journal of Plasticity*. Vol. 12, N° 6, pp. 805 - 842
- [6] Casciati, F. & Van der Eijk, C. (2008). Variability in Mechanical Properties and Microstructure Characterization of CuAlBe Shape Memory Alloys for Vibration Mitigation. *Smart Structures and Systems*. Vol. 4, N°2 , pp. 103 - 121.
- [7] Chopra, A.K. (2001). Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. pp. 99 - 104. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, EE.UU. 2a Ed.
- [8] Costello, G. (1998). *Theory of Wire Rope*. Springer. New York, NY. 2a Ed.
- [9] DesRoches, R., McCormick, J. & Delemont, M. (2004). Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wire and Bars. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, N°1, pp. 28 - 46.
- [10] Dolce, M. & Cardone, D. (2001a). Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys for Seismic Applications. Martensite and Austenite NiTi Bars Subjected to Torsion. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 43, pp. 2631 - 2656.

- [11] Dolce, M. & Cardone, D. (2001b). Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys for Seismic Applications. Austenite TiNi Wires Subjected to Tension. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 43 , pp. 2657 - 2677.
- [12] Falk, F. (1983). One-Dimensional Model of Shape Memory Alloys. *Archives of Mechanics*, Vol. 35, N°1, pp. 63 - 84
- [13] Gandhi, F. & Wolons, D. (1999). Characterization of the Pseudoelastic Damping Behavior of Shape Memory Alloy Wires Using Complex Modulus. *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, pp. 49 - 56.
- [14] Graesser, E. & Cozzarelli, F. (1991). Shape-memory Alloys as New Materials for Seismic Isolation. *Journal of Engineering Mechanics* , Vol. 117, N°11, pp. 2590 - 2608.
- [15] Gysling, A. (2008). Comparación de Modelos Analíticos que Predicen el Comportamiento de Cables Sometidos a Cargas Axisimétricas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [16] Huang, M. & Brinson, L.C. (1998). A Multivariant Model for Single Crystal Shape Memory Alloy Behavior. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 46, N°8, pp.1379 - 1409
- [17] Ip, K. (2000). Energy Dissipation in Shape Memory Alloy Wires Under Cyclic Bending. *Smart Materials and Structures*. Vol. 9, pp. 653 - 659.
- [18] Knapp, R. (1979). Derivation of a New Stiffness Matrix for Helically Armoured Cables Considering Torsion. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 14, pp. 515 - 529.
- [19] Liang, C. & Rogers, C.A. (1992). A Multidimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys. *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 26, pp. 429 - 443.
- [20] Machida S. & Durelli, A.J. (1973). Response of a Strand to Axial and Torsional Displacements. *Journal Mechanical Engineering Science*. Vol. 15, N°4, pp. 241 - 251.

- [21] Marivil, M. (2007). *Comportamiento Superelástico de una Aleación Cu-11.8%p.Al-0.5%p.Be, para Aplicaciones en Ingeniería Antisísmica*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [22] Mir, C. (2005). *Efecto del Tamaño de Grano y Temperatura Sobre el Comportamiento Superelástico de una Aleación Cu-Al-Be*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [23] Montecinos, S., Moroni, M.O. & Sepúlveda, A. (2005). Superelastic Behavior and Damping Capacity of CuAlBe Alloys. *Material Science and Engineering*. Vol. A 419, pp. 91 - 97.
- [24] Motahari, S.A. & Ghassemieh, M. (2007). Multilinear One-dimensional Shape Memory Material Model for Use in Structural Engineering Applications. *Engineering Structures*. Vol. 29, pp. 904 - 913.
- [25] Otsuka K. & Wayman, C.M. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- [26] Piedboeuf, M.C., Gauvin, R. & Thomas, M. (1998). Damping Behaviour of Shape Memory Alloys: Strain Amplitude, Frequency and Temperature Effects. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 214, N°5, pp. 885 - 901.
- [27] Popov, E.P. (2000). *Mecánica de Sólidos*. pp. 325 - 335. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, EE.UU. 2a Ed.
- [28] Porter, D.A & Easterling, K.E. (1981). *Phase Transformations in Metals and Alloys*. D. Van Nostrand. New York, NY, EE.UU.
- [29] Reedlunn, B. & Shaw, J.A. (2008). Shape Memory Alloy Cables. *Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials* , Vol. 6928. SPIE, art. N° 69291G
- [30] Sepúlveda, J., Boroschek, R., Herrera, R., Moroni, O. & Sarrazin, M. (2008). Steel Beam-Column Connection Using Copper-Based Shape Memory Alloy Dampers. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 64, N°4, pp. 429 - 435.

- [31] Song G., Ma, N. & Li, H.-N. (2006). Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures. *Engineering Structures*. Vol. 28, pp. 1266-1274.
- [32] Valdivieso, J. (2006). Verificación Experimental del Comportamiento Sísmico de un Modelo a Escala de Marcos con Disipadores a Base de Cobre (SMA). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [33] Wilson, J.C & Wesolowsky, M.J. (2005). Shape Memory Alloys for Seismic Response Modification: A State-of-the-Art Review. *Earthquake Spectra*, Vol. 21, pp. 569 - 601.
- [34] Zhang, Y., Camilleri, J.A, & Zhu, S. (2008). Mechanical Properties of Superelastic Cu–Al–Be Wires at Cold Temperatures for the Seismic Protection of Bridges. *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, 025008 (9pp.)
- [35] Zhu, J., Liang, N., Huang, W., Liew, K.M. & Liu, Z. (2002). A Thermodynamic Constitutive Model for Stress Induced Phase Transformation in Shape Memory Alloys. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 741 - 763.