



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN CUERPOS ELÁSTICOS A TRAVÉS DE HOMOGENEIZACIÓN DE AMPLITUD PEQUEÑA

ANDRÉS FELIPE VITO BAHAMONDE

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

DR. HERNÁN SANTA MARÍA OYANEDEL

Santiago de Chile, Marzo 2012

© MMXII, ANDRÉS FELIPE VITO BAHAMONDE



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN CUERPOS ELÁSTICOS A TRAVÉS DE HOMOGENEIZACIÓN DE AMPLITUD PEQUEÑA

ANDRÉS FELIPE VITO BAHAMONDE

Miembros del Comité:

DR. HERNÁN SANTA MARÍA OYANEDEL

DR. SERGIO ENRIQUE GUTÉRREZ CID

DR. JOAQUÍN ALEJANDRO MURA MARDONES

DR. MARCELO ALEJANDRO ARENAS SAAVEDRA

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Marzo 2012

© MMXII, ANDRÉS FELIPE VITO BAHAMONDE

A mi Padre...

Juvenal Hernán Q.E.P.D.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesor supervisor Dr. Hernán Santa María por el invaluable apoyo, la orientación y comentarios a lo largo de esta Tesis. Agradecer al profesor Dr. Sergio Gutiérrez, puesto que el tema es fruto de su investigación. Gracias también a ellos por el tiempo invertido en las revisiones, comentarios útiles y orientación en la construcción de esta Tesis.

Agradecer al presidente del comité de Tesis, Dr. Marcelo Arenas, por su buena disposición al reunirse conmigo y, un reconocimiento especial al profesor Dr. Joaquín Mura, por su aceptación inmediata para formar parte de este comité.

Además, el autor desea agradecer al personal del Laboratorio de Ingeniería Estructural de la Pontificia Universidad Católica de Chile por su ayuda en el trabajo experimental, especialmente a don Manuel Rabello, encargado del laboratorio y don Atilio Muñoz, para ellos un especial reconocimiento por su colaboración.

Agradezco a mis padres y hermanos por su amor, ánimo y apoyo durante mis años de estudio y especialmente durante el tiempo dedicado a esta Tesis.

Este proyecto no hubiera sido posible sin la ayuda, comprensión y el consejo brindado por numerosas personas. Estoy en deuda con todos aquellos que me han ayudado de muchas maneras a desarrollar esta investigación.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	v
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xx
ABSTRACT	xxi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes y motivación	1
1.2. Hipótesis de trabajo	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivos generales	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcance del trabajo	4
1.5. Estructura de la Tesis	5
1.5.1. Introducción de la Tesis	6
1.5.2. Cuerpo de la Tesis	7
1.5.3. Conclusiones de la Tesis	7
1.5.4. Anexos	8
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN DETECCIÓN DE DEFECTOS Y DAÑOS	9
2.1. Introducción	9
2.2. Defectos y daño en los sólidos	9
2.3. Métodos de identificación de defectos y/o daño y evaluación no destructiva	11
2.3.1. Pruebas no destructivas más usadas	12
2.4. Métodos de identificación de daño basado en vibraciones	15
2.4.1. Métodos tradicionales de identificación de daño basado en vibraciones	15

2.4.2.	Métodos modernos de identificación de daño basado en vibraciones . . .	17
2.5.	Métodos de detección basado en mediciones estáticas	18
2.5.1.	Ejemplos de detección de daño basado en mediciones estáticas	19
3.	MÉTODO DE DETECCIÓN DE DEFECTOS	21
3.1.	Enunciado del método de detección	21
3.2.	Versión adaptativa	24
4.	METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS EXPERIMENTAL	26
4.1.	Sistema de adquisición de datos	26
4.1.1.	Descripción del SAD empleado en los experimentos	26
4.1.2.	Descripción de los instrumentos del SAD	28
4.1.3.	Interfaz hacia el computador	31
4.1.4.	Programación utilizada para la adquisición de datos	31
4.1.5.	Análisis de resolución y sensibilidad del SAD	32
4.2.	Teoría de mediciones	34
4.2.1.	Términos usados frecuentemente en la medición	35
4.2.2.	Tipos de error en la medición	37
4.3.	Métodos de medición y análisis estadístico	39
4.3.1.	Medición directa de cantidades primarias: Análisis Tipo A	40
4.3.2.	Varianza de la suma de dos variables aleatorias	43
4.4.	Procedimiento para el análisis de detección de defectos	43
4.4.1.	Diseño del experimento	44
4.4.2.	Mediciones experimentales	46
4.4.3.	Validación del modelo computacional	48
4.4.4.	Pruebas de detección de defectos	48
4.4.5.	Evaluación del nivel de acierto	49
5.	PLAN DE EXPERIMENTOS Y RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS . . .	50
5.1.	Descripción de materiales	50
5.2.	Procedimiento de ensayo	50

5.2.1.	Implementación de experimentos	50
5.2.2.	Aplicación de la carga	53
5.2.3.	Posiciones del transductor de desplazamiento	54
5.2.4.	Desplazamientos en la interacción acero-hormigón	55
5.3.	Programa de experimentación	57
5.3.1.	Descripción de las probetas	57
5.3.2.	Descripción de los experimentos de mediciones de desplazamientos	58
5.4.	Experimentos en la probeta P1	59
5.4.1.	Resultados para la posición de carga C1	59
5.4.2.	Resultados para la posición de carga C2	62
5.5.	Experimentos en la probeta P2	65
5.5.1.	Resultados para la posición de carga C1	65
5.5.2.	Resultados para la posición de carga C2	68
5.6.	Experimentos en la probeta P3	71
5.6.1.	Resultados para la posición de carga C1	71
5.6.2.	Resultados para la posición de carga C2	73
5.6.3.	Resultados para la posición de carga C3	76
5.7.	Experimentos en la probeta P4	80
5.7.1.	Resultados para la posición de carga C1	80
5.7.2.	Resultados para la posición de carga C2	82
6.	APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS	87
6.1.	Validación del modelo computacional	87
6.1.1.	Detalles de la modelación 3D en ANSYS	87
6.1.2.	Condiciones de borde para el problema 2D en Freefem++	88
6.1.3.	Resultados para la posición de carga C1	90
6.1.4.	Resultados para la posición de carga C2	90
6.1.5.	Análisis de los resultados	92
6.2.	Descripción de las pruebas para la detección de defectos	93
6.2.1.	Pruebas de detección usando la versión original del método	93

6.2.2.	Pruebas de detección usando la versión adaptativa del método	94
6.3.	Resultados de la detección de defectos para la probeta P2	96
6.3.1.	Método original	96
6.3.2.	Método adaptativo	101
6.4.	Resultados de la detección de defectos para la probeta P3	103
6.4.1.	Método original	103
6.4.2.	Método adaptativo	110
6.5.	Resultados de la detección de defectos para la probeta P4	112
6.5.1.	Método original	112
6.5.2.	Método adaptativo	117
6.6.	Comentarios generales sobre las pruebas de detección de defectos	119
6.6.1.	Método original	119
6.6.2.	Método adaptativo	120
6.7.	Problemas de sesgos en la detección de defectos cuando se utilizan zonas de medición de pequeño tamaño	120
7.	APORTES DE LA TESIS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS	122
7.1.	Resumen	122
7.2.	Aportes de la Tesis	122
7.3.	Conclusiones	123
7.3.1.	Conclusiones sobre el procedimiento experimental	123
7.3.2.	Conclusiones sobre el método de detección en aplicaciones reales . . .	124
7.4.	Sugerencias para futuras investigaciones	125
	BIBLIOGRAFIA	127
	ANEXO A. CÓDIGO BASE PARA ADQUISICIÓN DE DATOS	130
	ANEXO B. EXTRACTOS DEL MANUAL DEL REGISTRADOR DE DATOS . .	132
B.1.	Resolución del registrador de datos TDS-302	132
B.2.	Cálculo de la sensibilidad del transductor de desplazamiento	132

B.3.	Cálculo de la sensibilidad de la celda de carga	132
ANEXO C. DESPLAZAMIENTOS EN CORTORNO DE APOYO EN PROBETA		
P1		133
C.1.	Resultados para el esquema de carga C1	133
C.2.	Resultados para el esquema de carga C2	134
ANEXO D. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN PLACAS BASE		
D.1.	Resultados para el experimento P1C1	135
D.2.	Resultados para el experimento P1C2	136
D.3.	Resultados para el experimento P2C1	137
D.4.	Resultados para el experimento P2C2	138
D.5.	Resultados para el experimento P3C1	139
D.6.	Resultados para el experimento P3C2	140
D.7.	Resultados para el experimento P3C3	141
D.8.	Resultados para el experimento P4C1	142
D.9.	Resultados para el experimento P4C2	143
ANEXO E. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN LAS PROBETAS		
E.1.	Resultados para el experimento P1C1	144
E.2.	Resultados para el experimento P1C2	154
E.3.	Resultados para el experimento P2C1	164
E.4.	Resultados para el experimento P2C2	169
E.5.	Resultados para el experimento P3C1	174
E.6.	Resultados para el experimento P3C2	179
E.7.	Resultados para el experimento P3C3	182
E.8.	Resultados para el experimento P4C1	185
E.9.	Resultados para el experimento P4C2	190

INDICE DE FIGURAS

1.1	Estructura de la Tesis.	6
2.1	Dislocación de hélice o de <i>burgers</i>	10
4.1	Fotografía de la implementación del sistema de adquisición de datos.	27
4.2	Instrumentación para la adquisición de datos.	27
4.3	Tipos de transductores de desplazamiento	28
4.4	Tipos de no-linealidad en el transductor de tipo galga extensométrica	29
4.5	Tranductor de desplazamiento.	30
4.6	Celda de carga utilizada en el estudio experimental.	30
4.7	Registrador de datos TDS-302.	31
4.8	Imágen del dispositivo <i>GPIB-USB Controller</i>	32
4.9	Diagrama de flujo del procedimiento para la detección de defectos.	45
4.10	Esquema básico del procedimiento de medición.	47
4.11	Validación del modelo computacional en la probeta sin defectos.	49
5.1	Montaje para los experimentos.	51
5.2	Detalle del apoyo para las probetas y de la conexión apernada.	51
5.3	Esquema del proceso de soldadura en sus distintas etapas.	52
5.4	Aplicación de la carga.	53
5.5	Posiciones de la carga, unidades en <i>mm</i>	53
5.6	Detalle de las posiciones del transductor.	54
5.7	Esquema de medición del desplazamiento del apoyo de las probetas.	55
5.8	Esquema en planta de medición de desplazamientos en las placas base.	56
5.9	Descripción de las probetas, unidades en <i>mm</i>	57

5.10	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P1C1.	59
5.11	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P1C1. . . .	60
5.12	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P1C2.	63
5.13	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P1C2. . . .	64
5.14	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P2C1.	66
5.15	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P2C1. . . .	67
5.16	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P2C2.	69
5.17	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P2C2. . . .	71
5.18	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P3C1.	72
5.19	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P3C1. . . .	73
5.20	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P3C2.	75
5.21	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P3C2. . . .	76
5.22	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P3C3.	78
5.23	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P3C3. . . .	80
5.24	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P4C1.	81
5.25	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P4C1. . . .	82
5.26	Gráfico de los desplazamientos para el experimento P4C2.	84
5.27	Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P4C2. . . .	86
6.1	Modelo 3D de elementos finitos en ANSYS.	88
6.2	Etiquetas para las condiciones de borde de la probeta P1.	90
6.3	Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C1. . .	91
6.4	Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C2. . .	92
6.5	Resultados de detección para la prueba P2C1S2a.	96
6.6	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P2C1S2a.	97
6.7	Resultados de detección para la prueba P2C1S2b.	97

6.8	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P2C1S2b.	98
6.9	Resultados de detección para la prueba P2C2S2a.	98
6.10	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P2C2S2a.	99
6.11	Resultados de detección para la prueba P2C2S2b.	99
6.12	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P2C2S2b.	100
6.13	Resultados de la detección para la probeta P2 usando la versión adaptativa. . . .	101
6.14	Resultados de detección para la prueba P3C1S3a.	104
6.15	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P3C1S3a.	104
6.16	Resultados de detección para la prueba P3C1S3b.	105
6.17	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P3C1S3b.	105
6.18	Resultados de detección para la prueba P3C2S3a.	106
6.19	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P3C2S3a.	106
6.20	Resultados de detección para la prueba P3C2S3b.	107
6.21	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P3C2S3b.	107
6.22	Resultados de detección para la prueba P3C3S3a.	108
6.23	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P3C3S3b.	108
6.24	Resultados de detección para la prueba P3C3S3b.	109
6.25	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P3C3S3b.	109
6.26	Resultados de la detección para la probeta P3 usando la versión adaptativa. . . .	111
6.27	Resultados de detección para la prueba P4C1S4a.	113
6.28	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P4C1S4a.	113
6.29	Resultados de detección para la prueba P4C1S4b.	113
6.30	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P4C1S4b.	114
6.31	Resultados de detección para la prueba P4C2S4a.	114
6.32	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P4C2S4a.	115

6.33	Resultados de detección para la prueba P4C2S4b.	115
6.34	Evolución de F_{obj} y Ψ para la prueba P2C2S4b.	116
6.35	Resultados de la detección para la probeta P4 usando la versión adaptativa. . . .	117
6.36	Ejemplos de posibles sesgos en la detección de defectos.	121
C.1	Desplazamientos en el contorno de apoyo en la probeta P1 y carga C1.	133
C.2	Desplazamientos en el contorno de apoyo en la probeta P1 y carga C2.	134
D.1	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P1C1.	135
D.2	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P1C2.	136
D.3	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P2C1.	137
D.4	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P2C2.	138
D.5	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P3C1.	139
D.6	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P3C2.	140
D.7	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P3C3.	141
D.8	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P4C1.	142
D.9	Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P4C2.	143
E.1	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 1). . . .	144
E.2	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 2). . . .	145
E.3	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 3). . . .	146
E.4	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 4). . . .	147
E.5	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 5). . . .	148
E.6	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 6). . . .	149
E.7	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 7). . . .	150
E.8	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 8). . . .	151
E.9	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 9). . . .	152
E.10	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 10). . . .	153

E.11	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 1).	. . . 154
E.12	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 2).	. . . 155
E.13	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 3).	. . . 156
E.14	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 4).	. . . 157
E.15	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 5).	. . . 158
E.16	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 6).	. . . 159
E.17	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 7).	. . . 160
E.18	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 8).	. . . 161
E.19	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 9).	. . . 162
E.20	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 10).	. . . 163
E.21	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 1).	. . . 164
E.22	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 2).	. . . 165
E.23	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 3).	. . . 166
E.24	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 4).	. . . 167
E.25	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 5).	. . . 168
E.26	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 1).	. . . 169
E.27	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 2).	. . . 170
E.28	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 3).	. . . 171
E.29	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 4).	. . . 172
E.30	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 5).	. . . 173
E.31	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 1).	. . . 174
E.32	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 2).	. . . 175
E.33	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 3).	. . . 176
E.34	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 4).	. . . 177
E.35	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 5).	. . . 178

E.36	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C2 (RE 1).	. . . 179
E.37	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C2 (RE 2).	. . . 180
E.38	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C2 (RE 3).	. . . 181
E.39	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C3 (RE 1).	. . . 182
E.40	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C3 (RE 2).	. . . 183
E.41	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C3 (RE 3).	. . . 184
E.42	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 1).	. . . 185
E.43	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 2).	. . . 186
E.44	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 3).	. . . 187
E.45	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 4).	. . . 188
E.46	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 5).	. . . 189
E.47	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 1).	. . . 190
E.48	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 2).	. . . 191
E.49	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 3).	. . . 192
E.50	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 4).	. . . 193
E.51	Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 5).	. . . 194

INDICE DE TABLAS

4.1	Especificaciones del trasductor de desplazamiento	29
4.2	Especificaciones de la celda de carga	30
5.1	Características mecánicas del acero usado en el estudio experimental.	50
5.2	Niveles de carga para análisis tipo A de mediciones.	54
5.3	Puntos medidos para cada experimento de mediciones de desplazamientos. . .	58
5.4	Valores de los desplazamientos para el experimento P1C1.	60
5.5	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P1C1.	61
5.6	Resumen de los desplazamientos para el experimento P1C1.	62
5.7	Valores de los desplazamientos para el experimento P1C2.	63
5.8	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P1C2.	64
5.9	Resumen de los desplazamientos para el experimento P1C2.	65
5.10	Valores de los desplazamientos para el experimento P2C1.	66
5.11	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P2C1.	68
5.12	Resumen de los desplazamientos para el experimento P2C1.	68
5.13	Valores de los desplazamientos para el experimento P2C2.	70
5.14	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P2C2.	70
5.15	Resumen de los desplazamientos para el experimento P2C2.	70
5.16	Valores de los desplazamientos para el experimento P3C1.	73
5.17	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P3C1.	74
5.18	Resumen de los desplazamientos para el experimento P3C1.	74
5.19	Valores de los desplazamientos para el experimento P3C2.	76
5.20	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P3C2.	77
5.21	Resumen de los desplazamientos para el experimento P3C2.	77

5.22	Valores de los desplazamientos para el experimento P3C3.	79
5.23	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P3C3.	79
5.24	Resumen de los desplazamientos para el experimento P3C3.	79
5.25	Valores de los desplazamientos para el experimento P4C1.	82
5.26	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P4C1.	83
5.27	Resumen de los desplazamientos para el experimento P4C1.	83
5.28	Valores de los desplazamientos para el experimento P4C2.	85
5.29	Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo en el experimento P4C2.	85
5.30	Resumen de los desplazamientos para el experimento P4C2.	85
6.1	Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C1.	91
6.2	Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C2.	92
6.3	Pruebas para la detección de los defectos usando la versión original del método.	95
6.4	Resultados del parámetro de desempeño Ψ para la probeta P2.	100
6.5	Resumen de la versión adaptativa del método en probeta P2 usando 3 zonas de medición.	102
6.6	Resumen de la versión adaptativa del método en probeta P2 usando 2 zonas de medición.	103
6.7	Resultados del parámetro de desempeño Ψ para la probeta P3.	110
6.8	Resumen de la versión adaptativa del método en probeta P3 usando 3 zonas de medición.	111
6.9	Resumen de la versión adaptativa del método en probeta P3 usando 2 zonas de medición.	112
6.10	Resultados del parámetro de desempeño Ψ para la probeta P4.	116
6.11	Resumen de la versión adaptativa del método en probeta P4 usando 3 zonas de medición.	118

6.12 Resumen de la versión adaptativa del método en probeta P4 usando 2 zonas de medición.	118
--	-----

RESUMEN

Un concepto de mucho interés en el área de la mecánica estructural es la detección de defectos o daños en los sólidos, particularmente la caracterización de tales defectos y su aplicación a elementos estructurales y mecánicos.

Esta Tesis presenta un estudio experimental de la detección de defectos en cuerpos elásticos en dos dimensiones basado en el trabajo elaborado por Mura y Gutiérrez (2011). En esta investigación se presenta un método que, mediante análisis numérico en el contexto de la elasticidad lineal, detecta inclusiones usando mediciones en el borde de la probeta obtenidas de ensayos estáticos. Se estudia el desempeño de tal método introduciendo las mediciones obtenidas de experimentos reales.

Para ello, se desarrolló un procedimiento experimental que permite evaluar los resultados de las mediciones de laboratorio a través de un estudio estadístico simple con el objetivo de obtener resultados satisfactorios para la detección de los defectos.

Los resultados de detección usando las mediciones experimentales, muestran que es posible utilizar este método en aplicaciones reales, pero con limitaciones. Entre ellas se pueden mencionar la necesidad de utilizar mayor información que la necesaria en las simulaciones numéricas con el fin de evitar posibles sesgos en la detección debido a los errores en el proceso de medición. En este sentido, también es necesaria la validación de las condiciones de apoyo y de carga utilizadas en los ensayos y las simulaciones.

Palabras Claves: Elasticidad, problemas inversos, mediciones experimentales, detección de defectos.

ABSTRACT

A concept of great interest in the area of structural mechanics is the detection of defects or damage in solids, particularly the characterization of these defects and their application to structural and mechanical elements.

This Thesis presents an experimental study of the detection of defects in elastic bodies in two dimensions based on the work done by Mura and Gutiérrez (2011). This research presents a method that, by numerical simulations in the context of linear elasticity, detects inclusions using boundary measurements obtained from static tests. We study the performance of this method by introducing measurements obtained from real experiments.

For this purpose, we developed an experimental procedure that allows the evaluation of laboratory measurements results through a simple statistical analysis in order to obtain satisfactory results for the detection of defects.

Detection results using experimental measurements shows that it is possible to use this method in real applications but with some limitations. Among them we can mention the need to use more information than used in numerical simulations in order to avoid potential bias in the detection of defects due to errors in measurement. In this sense, it is also necessary to validate the support and loading conditions used in the tests and simulations.

Keywords: Elasticity, inverse problems, experimental measurements, detection of defects.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y motivación

En la actualidad existe un gran interés en mejorar la capacidad de supervisar una estructura para evaluar las condiciones reales y detectar daños en la etapa más temprana que sea posible, junto con la utilización de procedimientos no destructivos para tal objetivo. Esta necesidad está presente en todas las áreas de la ingeniería civil, mecánica y aeroespacial.

En este contexto, el estudio de los problemas inversos resulta en un enfoque apropiado para el desarrollo de tales procedimientos. En palabras simples, estos problemas involucran generalmente la estimación de ciertos parámetros basados en mediciones indirectas de éstos (Vogel, 2002).

Una evaluación de las verdaderas condiciones de un componente estructural, como por ejemplo una viga o columna, sería el obtener propiedades tales como el módulo de Young, alguna característica de tipo geométrica o condición de contorno que podrían ser determinadas, a través de un problema inverso, basado en mediciones de desplazamientos o frecuencias naturales.

Debido a sus múltiples aplicaciones, los problemas inversos han experimentado un crecimiento explosivo, ejemplo de ello es que estas técnicas han sido largamente aplicadas en la detección de grietas o imperfecciones en vigas y placas. Existen además, varios conceptos que son utilizados en estos problemas, uno de ellos es el de diseño óptimo. Este enfoque consiste en localizar la distribución óptima de algún parámetro de interés físico en orden a minimizar un cierto criterio. La idea fundamental para determinar tal configuración óptima, en el caso de problemas inversos aplicados a detección de defectos o daño, es hacer coincidir las mediciones originadas por una distribución propuesta con las mediciones de laboratorio (Gutiérrez & Mura, 2008).

En general, los métodos para detectar daño, incluidos los que emplean problemas inversos, utilizan en una primera instancia simulaciones numéricas para validar sus resultados, sin embargo, un escaso avance se ha documentado en implementaciones de laboratorio y un progreso mucho menor en aplicaciones de campo.

Entre los principales inconvenientes en aplicaciones reales, pueden nombrarse las incertidumbres asociadas a las mediciones, los problemas asociados con la repetibilidad y reproducibilidad de las condiciones para los experimentos, las limitaciones de los instrumentos de medición y las acotadas zonas para medir. Además, la complejidad de las estructuras dificulta aún más la eficacia y fiabilidad de estos métodos. No obstante, la validación de estos procedimientos en aplicaciones reales es fundamental, no sólo para evaluar la robustez del método en relación a los errores en los procedimientos experimentales, si no que para estudiar la viabilidad de la aplicación en sí misma, los costos asociados a la implementación y el tiempo necesario en la ejecución. Todas estas ideas podrían ayudar a generar mejoras a estos métodos.

A pesar de las restricciones para la verificación experimental, existe una gran cantidad de métodos de detección de daño. En este sentido, el grupo de métodos de mayores avances y estudios son los métodos basados en el análisis de las vibraciones. La base de estos métodos es que estas características, como las frecuencias de vibración o las formas modales son dependientes de las propiedades físicas y mecánicas de los sólidos, a su vez, los defectos o imperfecciones generan variaciones de estas propiedades físicas y consecuentemente en las propiedades de las vibraciones.

Otros métodos menos estudiados son los basados en información de tipo estática. Aquí, las variaciones de las propiedades físicas y mecánicas son reportadas como variaciones de la rigidez de la estructura. En términos comparativos, los métodos basados en vibraciones requieren de las propiedades de rigidez, amortiguamiento y masas, en comparación a los estáticos que sólo necesitan de la rigidez. Otro aspecto importante a destacar es que los métodos dinámicos requieren de un adecuado control de la excitación que muchas veces es difícil de lograr en aplicaciones de campo (Bakhtiari-Nejad, Rahai, & Esfandiari, 2005).

En términos generales, los métodos de vibraciones requieren una preparación más compleja que los métodos estáticos, pero entregan una evaluación de los defectos o daños mucho más global, aunque sus resultados son menos confiables que los entregados por los métodos estáticos.

En el ámbito de los problemas inversos en mecánica, esta Tesis presenta un estudio experimental de la detección de defectos en cuerpos elásticos basado en el trabajo elaborado por Mura y Gutiérrez (2011). En esta investigación se presenta un método que, en una primera aproximación a nivel numérico, detecta inclusiones usando mediciones en los bordes de la probeta obtenidas de ensayos estáticos en el contexto de la elasticidad lineal. Se estudia el desempeño de tal método introduciendo las mediciones directamente de experimentos reales y no de simulaciones numéricas.

1.2. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de este trabajo es que el desarrollo de un análisis experimental para el método de detección de defectos permite validar la base teórica que sustenta el método. En esta misma dirección, el desarrollo de un estudio experimental permite la verificación de la implementación física del procedimiento, en relación a su factibilidad en aplicaciones prácticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

En relación a la hipótesis propuesta, el objetivo general de la Tesis es desarrollar un procedimiento experimental que permita validar el método propuesto para la detección de defectos. Este procedimiento debe ser aplicable a otros estudios experimentales y debe operar bajo condiciones habituales en un laboratorio evitando el uso de herramientas sofisticadas de medición, esto permitiría en un futuro evaluar su capacidad en aplicaciones de campo.

1.3.2. Objetivos específicos

En lo que respecta a los objetivos específicos podemos mencionar los siguientes:

- (i) Desarrollar aplicaciones de laboratorio utilizando herramientas de la ingeniería práctica con el objetivo de materializar empíricamente varias pruebas de detección de defectos utilizando el método propuesto por Mura y Gutiérrez (2011).
- (ii) Desarrollar un procedimiento experimental, con el objetivo de obtener resultados equivalentes a los obtenidos por las simulaciones numéricas, las cuales han logrado resultados satisfactorios en la localización de defectos.
- (iii) Evaluar consideraciones experimentales adicionales que deben ser estudiadas, orientadas a entregar una primera aproximación a futuras aplicaciones más complejas.

1.4. Alcance del trabajo

Esta Tesis presenta un estudio experimental que se refiere a la detección de defectos en elementos de tipo vigas rectangulares. Se ha usado como material el acero, puesto que es un material homogéneo y ampliamente utilizado en ingeniería.

Debido a la implementación del método de detección, esto es, problemas de tipo bi-dimensional y en condiciones de deformaciones planas en elasticidad lineal, la investigación estudia elementos de pequeño espesor. Particularmente, se utilizan placas de espesor igual a 10 *mm*.

Los defectos que se consideran en esta investigación son de tipo localizado, de forma circular y simulados a partir de reducciones de rigidez. Esto se logró disminuyendo el espesor de las placas a través de un mecanizado de éstas. Específicamente, se disminuyó el espesor en 3 *mm* por cada lado de la placa.

Se desarrolló un modelo computacional tridimensional del elemento ensayado y sus condiciones de apoyo en el software de elementos finitos ANSYS (*Theory Reference for the*

Mechanical APDL and Mechanical Application, 2009) con el objetivo de evaluar los desplazamientos que se producen en el contorno de apoyo de la viga patrón (viga no dañada), puesto que la obtención de estos valores con el sistema de sensores disponibles resulta impracticable y la precisión esperada es limitada. Estos valores son necesarios para la implementación final del algoritmo de detección programado por los autores en el *software* FreeFem++ (Pironneau, Morice, Le-Hyarc, & Ohtsuka, 2011). Las propiedades de los materiales usados en las modelaciones computacionales son los valores entregados por el proveedor de las probetas a ensayar. Se estudian el método de detección de defectos original propuesto por Mura y Gutiérrez (2011) y el procedimiento adaptativo (Gutiérrez & Mura, 2010).

En el trabajo experimental se utilizaron cuatro vigas rectangulares con dimensiones de 500 mm de largo y 200 mm de altura. La primera corresponde a una viga sin defectos; la segunda viga posee un defecto circular a la mitad de la luz, de diámetro 100 mm; la tercera tiene un defecto de diámetro 75 mm a un cuarto de la luz; y la cuarta tiene un defecto a la mitad de la luz, al igual que la segunda, pero más pequeño y con un diámetro de 50 mm.

El sistema de adquisición de datos (SAD) utiliza transductores para las mediciones de los desplazamientos verticales en las vigas y una celda de carga para las mediciones de la carga aplicada. La resolución del SAD corresponde a 0.0005 mm; este valor es de gran importancia pues condiciona de manera importante la magnitud de los defectos que se detecten en términos del mínimo tamaño, es decir, defectos que generan perturbaciones de las mediciones menores a 0.0005 mm son imperceptibles por el SAD, luego los defectos utilizados en este estudio experimental generan en alguna parte de las zonas de medición perturbaciones en el desplazamiento en el borde, con respecto a aquellos de la viga sin defecto, mayores a este valor con el objetivo de que puedan ser medidos.

1.5. Estructura de la Tesis

El presente trabajo se estructura en 7 capítulos y 5 anexos, agrupados en 4 temas como se puede apreciar en la Fig. 1.1. El primero de los temas, la introducción de la Tesis, agrupa

los capítulos que contextualizan y entregan los conceptos fundamentales para comprender el trabajo de Tesis. El segundo tema, definido como el cuerpo de la Tesis, describe detalladamente lo que se hizo, presenta la metodología para el análisis experimental, el plan de experimentos y los resultados de las mediciones de los desplazamientos. El tercer tema, denominado conclusión de la Tesis, entrega una completa descripción y discusión de los resultados de la detección de los defectos, los aportes del presente trabajo, las principales conclusiones y una propuesta de investigaciones futuras. El tema final corresponde a los anexos.

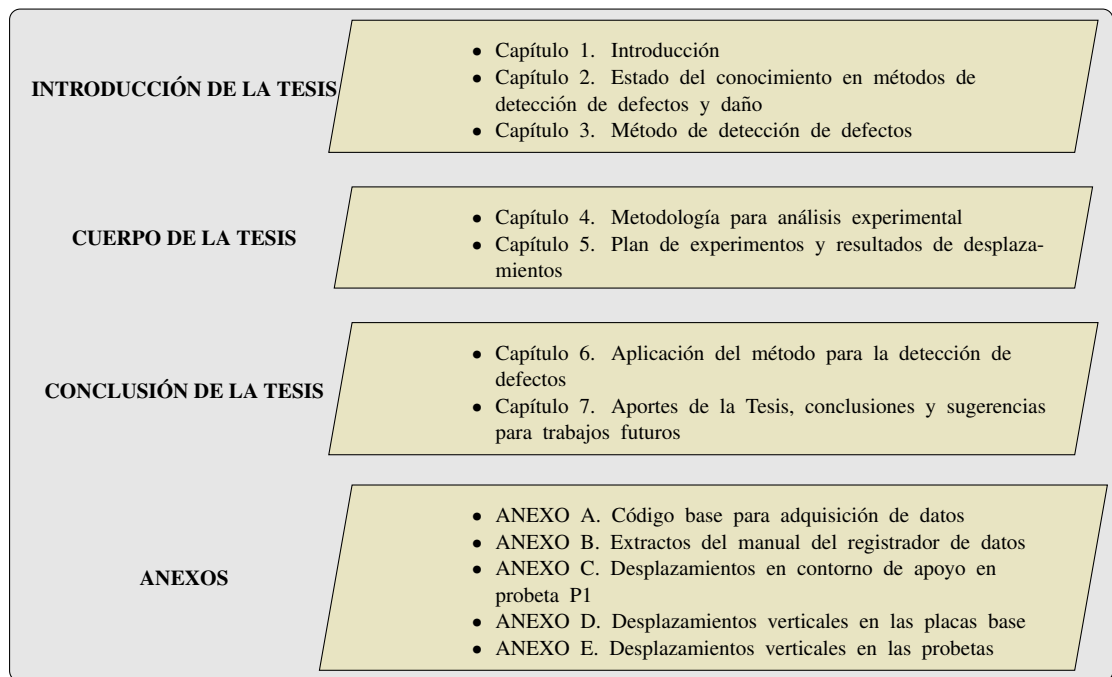


FIGURA 1.1. Estructura de la Tesis.

1.5.1. Introducción de la Tesis

En el capítulo 1, se entrega una visión general de la Tesis en términos de las motivaciones de ésta, el objetivo del estudio, el alcance del trabajo y la estructuración de la investigación.

En el capítulo 2, se realiza una completa revisión de los antecedentes y el estado del arte en los métodos de detección de defectos y/o daños. Se expone una breve reseña sobre

las diferencias en los conceptos de defecto, daño y también el de falla, se une esta discusión al desarrollo de los métodos no destructivos que se utilizan frecuentemente en la industria y se finaliza con una exposición de la literatura más reciente acerca de las técnicas de identificación de daños en el área de la mecánica estructural.

En el capítulo 3, se detalla el método de detección de defectos estudiado en esta Tesis, se describe de manera resumida la formulación del método, en su versión original y el procedimiento adaptativo del mismo.

1.5.2. Cuerpo de la Tesis

En el capítulo 4, se desarrolla en extenso toda la metodología para realizar el análisis experimental. Se describen los elementos del diseño de los experimentos relacionados a la adquisición de los datos y las metodologías para el tratamientos de éstos con el objetivo de ser usados en el método de detección de defectos. Además, se plantea el procedimiento experimental utilizado en este estudio, el cual se resume en un diagrama de flujo que permite visualizar de una manera más simple y global el proceso de medición.

En el capítulo 5, se detalla el plan experimental, algunos aspectos considerados son la descripción de materiales, el detalle del procedimiento de ensayos y el programa experimental (listado de experimentos) con los resultados de los desplazamientos verticales medidos.

1.5.3. Conclusiones de la Tesis

En el capítulo 6 se entregan los resultados de la detección de defectos utilizando las mediciones de los desplazamientos obtenidos de los experimentos presentados en el capítulo 5. En este capítulo, los resultados se dividen en los correspondientes a la versión original del método de detección y los resultados para el procesamiento adaptativo, junto con un análisis de éstos.

En el capítulo 7 se detallan los aportes de la Tesis, las principales conclusiones que pueden extraerse de ésta y algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

1.5.4. Anexos

El anexo A corresponde a un código base de programación para la adquisición de datos, el anexo B presenta tres extractos del manual del registrador de datos que son necesarios para el cálculo de las sensibilidades de los instrumentos para las mediciones, en el anexo C se exhiben los valores de los desplazamientos del contorno de apoyo de la probeta P1, en el anexo D se presentan todas las curvas de desplazamientos para las placas base obtenidas de los experimentos. En el anexo E, se entregan las curvas de los desplazamientos de las probetas.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN DETECCIÓN DE DEFECTOS Y DAÑOS

2.1. Introducción

Los niveles de tensiones y deformaciones que se presentan en las estructuras en su periodo de servicio, causadas por las solicitaciones a las que están expuestas, junto con otros agentes como los cambios de temperatura, humedad y otras variables del clima, pueden provocar en la estructura la aparición de defectos o pequeñas grietas. Con el paso del tiempo, estos defectos al ser expuestos a los mismos fenómenos, muy probablemente se convertirán en grietas de mayor tamaño que, unidas a la aparición de otros defectos, pueden convertirse en un real peligro y provocar desde un mal comportamiento de la estructura ante un evento crítico, hasta el colapso de ésta. En estas razones radica la importancia de la detección de defectos y daños pequeños, particularmente enfocada a edades tempranas para evitar los altos costos en las reparaciones.

2.2. Defectos y daño en los sólidos

El concepto de defecto en sólidos ha ido paulatinamente siendo estudiado y entendido, la importancia y el interés que ocasiona se debe al hecho de que los defectos pueden modificar las propiedades del sólido, a partir de ello es posible comprender la existencia de desórdenes a nivel microscópico de los materiales y atribuir estas perturbaciones la idea de defecto. Otro aspecto que debe ser estudiado es que las interacciones de estos defectos, su suma o agrupamiento, es de vital importancia.

Una definición preliminar de defecto podría ser la de un átomo localizado en el lugar equivocado o la presencia de una impureza en el lugar de un átomo (Tilley, 2008). Tiempo después de esta definición, se desarrolló el concepto de defectos lineales (luxaciones), como una manera de explicar una serie de características como las propiedades mecánicas de los materiales.

En base a su dimensión, los defectos pueden ser categorizados de la siguiente manera (Tilley, 2008):

- (i) Defectos de dimensión nula, llamados defectos puntuales.
- (ii) Defectos unidimensionales (lineales), llamados luxaciones.
- (iii) Defectos de dos dimensiones (planas), llamados defectos de superficies, que pueden ser de tipo externas e internas.
- (iv) Defectos en tres dimensiones (volumen), como agrupaciones de defectos puntuales o vacíos.

Los tipos de defectos enumerados anteriormente se definen como estructurales. Además de éstos, existen los llamados defectos electrónicos. Estos defectos son desórdenes en la estructura electrónica de los sólidos, las que influyen principalmente en sus propiedades ópticas, químicas y, por supuesto, eléctricas. A diferencia de los defectos atómicos, los cuales son debido a causas principalmente térmicas, los defectos electrónicos pueden producirse por la absorción de ondas electromagnéticas.

El concepto de defecto es ampliamente usado en las áreas de la ingeniería mecánica para agrupar a una gran cantidad de discontinuidades en los materiales, entre ellas, grietas, cavidades, inclusiones y otras. También se utiliza como manera de identificar el inicio de una discontinuidad de mayor magnitud. Por ejemplo, un defecto de tipo lineal como una dislocación de hélice o de *burgers* (ver Fig. 2.1), que se producen debido a esfuerzos tangenciales, podría provocar, a nivel macroscópico, una grieta de corte.

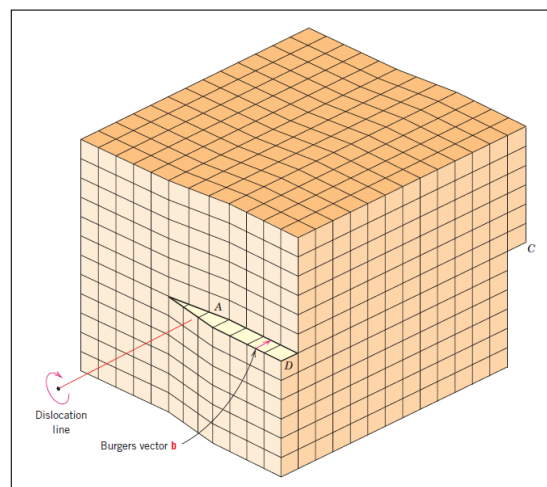


FIGURA 2.1. Dislocación de hélice o de *burgers* (Callister, 2006).

Es de suma importancia para una mejor comprensión de los alcances que pueda tener un método de identificación de defectos o daño, que esos conceptos se definan correctamente y, por ende, se traten de manera diferente. Este problema fue examinado por Worden y Dulieu-barton (2004), ellos dan importancia a usar correctamente y con precisión tales conceptos y entregan una clara definición de ellos. Los autores proponen las siguientes definiciones:

- El defecto es inherente al material y estadísticamente todos los materiales tienen alguna cantidad de defectos. Esto significa que la estructura puede operar en su estado ideal, aun cuando los materiales contengan defectos.
- El daño es un estado de la estructura en la cual ésta ya no es operativa en su estado ideal o inicial, pero es capaz de seguir funcionando de manera satisfactoria.
- La falla es definida como un estado en el que la estructura no puede funcionar de forma satisfactoria y es causada por una reducción inadmisible en la calidad de los requerimientos del usuario.

Estas definiciones permiten concluir que un daño siempre será precedido de algún tipo de defecto y, a su vez, que una falla siempre está precedida por un daño.

2.3. Métodos de identificación de defectos y/o daño y evaluación no destructiva

La detección de defectos y/o daños puede ser comprendida como el uso de procedimientos que van en la dirección de evaluar la existencia de tales deterioros y de ciertas características como su localización y geometría. A partir de ello, se puede evaluar la gravedad de éstos y las actividades necesarias para remediarlos.

Es muy necesario que los procedimientos para detección no generen un aumento de esos defectos o daños y mantengan las propiedades físicas y químicas del elemento. Es por esta razón que muchos de estos métodos son catalogados como métodos no destructivos o evaluaciones no destructivas.

2.3.1. Pruebas no destructivas más usadas

Entre las pruebas no destructivas más usadas en la actualidad se incluyen los métodos visuales y ópticos, las pruebas de corrientes de *Foucault*, los líquidos penetrantes, los métodos de campo magnético, las pruebas de radiografía, los métodos de campo térmico, entre otros. A continuación se entrega una breve descripción de cada uno de ellos.

2.3.1.1. Técnicas visuales y ópticas

Las técnicas visuales fueron las primeras técnicas no destructivas de evaluación y son ampliamente utilizadas en la industria. A pesar de que inicialmente se puede pensar que estas técnicas son altamente atractivas debido a su bajo costo, se consideran también subjetivas y que entregaban poca información que pudiera ser evaluada de manera formal y estructurada (Hellier, 2001). Esto se debía a que los resultados eran altamente dependientes de la persona que inspeccionaba, de las condiciones ambientales y de la calidad de la instrumentación óptica.

Como es de esperarse, la instrumentación es de vital importancia para estas evaluaciones, entre los principales instrumentos utilizados se encuentran los amplificadores visuales, el boroscopio, las cámaras fotográficas y de video. La principal limitación de cualquier técnica visual es que sólo es posible el análisis y estudio de perturbaciones exteriores o de superficie, además deben poseer la cualidad de ser accesible para su inspección.

2.3.1.2. Técnicas de corrientes de *Foucault*

En la técnica de corrientes de *Foucault* es posible medir la respuesta de un material a los campos electromagnéticos en un determinado rango de frecuencias. A partir de esta respuesta, podemos interpretar las condiciones materiales, como la dureza, el grosor, la presencia de corrosión o defectos tales como la porosidad y grietas (Shull, 2002).

La principal ventaja, aunque parezca extraño, también resulta ser su principal desventaja. Esto se refiere al hecho de que los métodos de corrientes de *Foucault* son muy sensibles a agentes externos como el espesor de los recubrimientos o revestimientos sobre los

metales bases, el tamaño de las discontinuidades de superficie, las variaciones en la conductividad del material y en la permeabilidad, entre otras. Además, los resultados tienden a empeorar debido a la suma de estas variables (Hellier, 2001).

2.3.1.3. Técnicas térmicas/infrarrojas

El test más utilizado en las aplicaciones para la detección de defectos a partir de técnicas térmicas e infrarrojas es la termografía infrarroja, ésta se basa en la detección de áreas calientes o frías mediante el análisis de la parte infrarroja del espectro electromagnético, en base a esto se genera un termograma que puede ser analizado en busca de imperfecciones.

El fundamento de estas técnicas es que los cambios en el flujo de calor causan diferencias localizadas en la temperatura de la superficie. De este modo, mediante la medición de las temperaturas de la superficie bajo condiciones de flujo de calor, hacia o desde el material, se puede determinar la presencia y localización de anomalías.

Entre las principales desventajas de este método podemos mencionar que sólo la superficie del material puede ser testeado, otra desventaja es que la imagen térmica debe ser analizada por personas expertas.

Entre las principales ventajas está su relativa facilidad de aplicación y el que la imagen térmica se genera con relativa rapidez y al ser examinada es posible obtener resultados de manera casi inmediata (Hellier, 2001).

2.3.1.4. Técnicas magnéticas

Estas técnicas de inspección hacen uso de las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos para localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en ellos. Estas imperfecciones, tales como grietas y juntas, causan una ruptura en la uniformidad magnética o un cambio repentino en la permeabilidad de la parte magnetizada. Estas interrupciones en la uniformidad crean polos magnéticos y líneas de fuga de flujo que atraen a las partículas finas de polvo magnético a la discontinuidad, esto ocasiona la formación de un indicador visual muy fiable del defecto (Mix, 2005).

Estos métodos poseen limitaciones que deben tenerse en cuenta, por ejemplo, las películas delgadas de pintura y otros recubrimientos no magnéticos, afectan adversamente la sensibilidad de la inspección. Además, el método sólo es útil en materiales ferromagnéticos.

2.3.1.5. Técnicas radiográficas

La radiografía es un método de inspección que se basa en la diferencia de la radiación penetrante que es absorbida por la pieza, esta variación indicará la existencia de una discontinuidad o imperfección. Debido a estas cualidades, esta técnica es usada para detectar variaciones de espesor o densidad en una cierta área de un material, la que se compara con aquella de una región vecina (Mix, 2005).

La radiografía es extremadamente sensible a la orientación de las imperfecciones. Si una discontinuidad está en un cierto ángulo con respecto a la fuente de la radiación, será difícil su detección. Estos aspectos referidos a la orientación de la discontinuidad se deben tomar en cuenta al estudiar la aplicación de esta técnica (Hellier, 2001).

2.3.1.6. Líquidos penetrantes

Estas pruebas se utilizan para reconocer discontinuidades en la superficie de los materiales. El procedimiento consiste en aplicar un líquido con ciertas características (fluorescente, por ejemplo) a la superficie del material, el cual penetra en cualquier defecto que pueda encontrarse en la superficie. Después de la aplicación del líquido y del retiro del exceso, se aplica un revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades, mostrando las grietas o fisuras.

Entre las principales ventajas está su bajo costo y su versatilidad, pues prácticamente cualquier material sólido no poroso puede ser inspeccionado.

Entre las principales desventajas tenemos la necesidad de preparar la superficie y que sólo las discontinuidades abiertas pueden ser detectadas (Hellier, 2001).

2.4. Métodos de identificación de daño basado en vibraciones

La investigación en la identificación de daño basado en vibraciones ha sido muy estudiada durante las últimas décadas. La idea básica detrás de estas técnicas es que los parámetros de las vibraciones, en particular las frecuencias y amortiguamientos son funciones de las propiedades físicas de la estructura. Por lo tanto, los cambios en estas propiedades causan cambios en las propiedades de las vibraciones.

Una categorización de estos métodos fue realizada por Yan (2007). En este artículo se presentan los métodos en dos categorías principales, los métodos de tipo tradicional y los de tipo moderno. En la primera categoría se incluyen los siguientes métodos de detección de daño:

- (i) Métodos basados en los cambios en las frecuencias naturales.
- (ii) Métodos basados en los cambios en los modos de vibración naturales.
- (iii) Métodos basados en los cambios en la rigidez o flexibilidad estructural.
- (iv) Métodos basados en la función de transferencia (función de respuesta en frecuencia).
- (v) Métodos basados en información estadística.
- (vi) Métodos basados en los flujos de energía.

Entre los métodos de tipo moderno encontramos:

- (i) Métodos basados en los análisis de onda.
- (ii) Métodos de redes neuronales.
- (iii) Métodos basados en algoritmos genéticos.

2.4.1. Métodos tradicionales de identificación de daño basado en vibraciones

Se realizará una breve descripción de los métodos basados en los cambios en las frecuencias naturales y de los cambios en los modos de vibración.

2.4.1.1. Métodos basados en los cambios en las frecuencias naturales

Existe una gran cantidad de métodos basados en los cambios en las frecuencias, esto debido a que la obtención de tales parámetros es un procedimiento que no requiere una preparación experimental tan compleja y sus resultados son bastante confiables. Como es de esperarse, el nivel de información que se puede extraer de las frecuencias es limitado.

Salawu (1997) presenta una reseña del uso de las frecuencias naturales de vibración en procedimientos para la detección de grietas, el interés que propone este resumen va en la dirección del bajo costo y fiabilidad que supone la adquisición de tales parámetros y los aspectos que podrían limitar su aplicación con éxito. Se discute además la relación que existe entre la variación de las frecuencias y el daño estructural.

He y Zhu (2011) utilizan un método basado en cambios en las frecuencias para detectar varios tipos de daños. Utilizan modelos de elementos finitos para simular las estructuras y un algoritmo inverso para detectar los daños. En esta investigación se da importancia a la precisión en la modelación computacional como un desafío de gran importancia y el desarrollo de un algoritmo robusto que pueda ser aplicado a estudios experimentales donde la presencia de ruidos en las mediciones es un aspecto central.

Entre las aplicaciones estudiadas se incluye el aflojamiento de las uniones atornilladas. También se aplica la técnica a varias estructuras, entre ellas una torre de iluminación de una subestación eléctrica, una tubería de acero y una estructura tridimensional de marcos a escala. Los resultados numéricos y experimentales muestran que esta metodología puede ser aplicada con éxito en la ubicación y la determinación de la extensión del daño.

2.4.1.2. Métodos basados en los cambios en los modos de vibración naturales

La forma de los modos de vibración puede verse modificada debido a la presencia de daños en la estructura. Una alternativa para evaluar dicha variación es determinando la diferencia de amplitudes en cada sección entre la curva del modo del estado de referencia y la del estado del modelo a examinar. El desempeño de estos métodos se relaciona directamente con la técnica con que se cuantifican los cambios en las formas modales.

Radzieński y Krawczuk (1997) presentan una validación experimental de varios métodos de detección de daño sobre la base de los cambios en las formas modales. Su estudio evaluó estos métodos en una placa de aluminio con atiesadores remachados. El estudio utilizó dos escenarios de daño, el primero de ellos se generó cortando varios remaches de la placa, el segundo esquema de daño fue generado a través de un corte del espécimen.

Entre las técnicas estudiadas en esta investigación tenemos la curvatura de la forma modal (MSC por sus siglas en inglés *modal shape curvature*), el criterio de la seguridad modal (MAC por sus siglas en inglés *modal assurance criterion*), la energía de la deformación (SE por sus siglas en inglés *strain energy*), el modificador del operador laplaciano (MLO), la dimensión fractal generalizada (DGA) y la transformada de ondas (WT). Se realizó una comparación de los métodos y se estudió el aumento de su eficacia a través de algunas técnicas de procesamiento de señales, tales como la interpolación y extrapolación de los puntos medidos. Algunos algoritmos de reducción del ruido fueron también probados. Entre las principales conclusiones se pueden mencionar la necesidad de una alta preparación del esquema experimental, en general el procesamiento de las señales no aumenta la efectividad de los métodos y la necesidad de realizar otros estudios experimentales para la verificación de la detección de múltiples daños.

2.4.2. Métodos modernos de identificación de daño basado en vibraciones

Se describen los métodos basados en redes neuronales y los basados en los algoritmos genéticos.

2.4.2.1. Métodos basados en redes neuronales

Las redes neuronales emulan el comportamiento de las neuronas y sus redes en el cerebro humano. Las principales características de una red neuronal es que funcionan a partir de procesos de aprendizaje y prueba basados en funciones como estructura base, debido a que no poseen una clara interpretación el uso se reduce a sistemas de cajas negras.

Bakhary (2010) presenta un método que aplica redes neuronales artificiales en conjunto con una técnica de subestructuración para detectar daño, los resultados son comparados

con otros métodos más convencionales. Para demostrar la eficacia de este método, el autor realiza simulaciones numéricas de una viga de concreto de dos vanos continuos y de un pórtico de tres niveles. Los diferentes escenarios de daños han sido incorporados como reducciones de la rigidez local de los elementos seleccionados en diferentes lugares en las estructuras. En base a estos ejemplos, se demuestra que esta técnica es eficaz en la detección de todos los daños simulados. Además, el enfoque propuesto es eficaz para reducir el tamaño de los modelos ANN (*Artificial Neuronal Network*) necesarios, y como resultado el esfuerzo de cálculo se puede reducir sustancialmente.

2.4.2.2. Métodos basados en algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son técnicas computacionales para la búsqueda de óptimos de funciones objetivo complejas, basados en un proceso que simula la teoría de Darwin de la evolución de las especies, pues se utiliza el concepto de supervivencia del más apto para llevar a cabo esta búsqueda. Debido a su aplicación a funciones objetivos muy complejas, estos algoritmos han tenido un gran éxito en áreas de la ciencia como los algoritmos de búsqueda computacionales, la optimización estructural, los problemas inversos, entre otras aplicaciones (Liu & Han, 2003).

2.5. Métodos de detección basado en mediciones estáticas

La mayoría de las investigaciones concernientes al desarrollo de técnicas de identificación de daño basado en información estática se han concentrado en elementos de tipo *frame* aplicados a estructuras de vigas, cerchas y marcos. La mayoría de ellos valida sus resultados a través de simulaciones numéricas donde se incluye algún tipo de análisis de errores en las mediciones, incluyendo ruido en los resultados de las modelaciones de las estructuras con daño.

Una pequeña revisión de algunas publicaciones más recientes se ha llevado a cabo para establecer un contexto en el estado actual de las técnicas disponibles. La revisión se enfoca a técnicas que incluyan validación experimental.

2.5.1. Ejemplos de detección de daño basado en mediciones estáticas

Bakhtiari-Nejad et al. (2005) presentan un algoritmo para la evaluación del daño estructural mediante el empleo del cambio en el desplazamiento estático medido. Este método utiliza cargas estáticas aplicadas en un subconjunto de grados de libertad (GDL) y desplazamientos medidos en otro subconjunto de GDL. En este algoritmo, el cambio en el desplazamiento estático de ciertos grados de libertad se expresa como una función de la ubicación y magnitud de los daños.

En este método, los cambios en la respuesta de los desplazamientos se expresan como una sistema de ecuaciones no lineales de los parámetros elementales. Dado que el número de ecuaciones (mediciones) es menor que el número de parámetros desconocidos, el sistema de ecuaciones es indeterminado. Debido a este problema de dimensión, estas ecuaciones se resuelven mediante la introducción de un método de optimización que minimiza la diferencia entre los vectores de carga de la estructura dañada y de la estructura sana.

El problema principal en el método estático es la selección de los casos de carga que influyen a todos los elementos de la estructura de una manera aproximadamente similar. En este trabajo, se define el índice de desviación (DI) como una manera de cuantificar este hecho. Este índice se basa en la energía de deformación almacenada. Pequeños valores de DI indican que la contribución de los elementos a la respuesta estática de la estructura es más uniforme que para un caso de carga con mayor DI. Además, los lugares de medición se seleccionan utilizando la matriz de información de Fisher.

Se realiza un estudio de simulaciones numéricas con y sin ruido para demostrar la eficacia en la localización y evaluación de la severidad del daño. Un estudio experimental de un marco muestra que el método es capaz de detectar el daño sin la necesidad de tener el modelo exacto de la estructura no dañada.

En (Choi et al., 2004) se desarrolla un enfoque para la identificación de daño estructural en vigas estáticamente determinadas. La validez del método propuesto se limita a estos problemas porque la forma del momento en estructuras estáticamente indeterminadas depende de la rigidez.

Los autores proponen el “Teorema de carga elástica de daño”, donde la forma de la variación de los desplazamientos en una viga real debido al daño es igual a la línea de influencia del momento de la viga conjugada en el punto donde el daño ocurre. Se estudia el desempeño del método en pruebas experimentales para vigas doble T simplemente apoyadas y una variedad de casos de daño. El método propuesto es, por lo tanto, más práctico en la identificación de daños en puentes, cuando se dispone de pruebas periódicas de carga estática.

En (Lee, Kim, Lee, Bae, & Eun, 2008) se propone un método para detectar el daño mediante la introducción de la curvatura del desplazamiento en las vigas. En concreto, el daño es evaluado por la relación de la curvatura del desplazamiento de las vigas con y sin daños. Además, este estudio proporciona un método sobre la base de los datos de la respuesta estática medida en un número limitado de lugares. Los desplazamientos medidos se amplían a todos los grados de libertad a través de un modelo de elementos finitos en base a la ecuación propuesta en el método. La validez de éste se ha demostrado en la evaluación de dos vigas simples interconectadas perpendicularmente en un punto. Se puede concluir que el método propuesto puede predecir correctamente la ubicación del defecto, aunque no de manera exacta.

3. MÉTODO DE DETECCIÓN DE DEFECTOS

3.1. Enunciado del método de detección

Consideremos un cuerpo bi-dimensional que puede ser modelado como un sólido y adicionalmente queremos estudiar su comportamiento cuando al interior existe un defecto. Este problema fue estudiado por Mura y Gutiérrez (2011), en este artículo se propone un algoritmo para minimizar la diferencia entre los desplazamientos del cuerpo real y de los que resultan de resolver el problema de elasticidad lineal con una supuesta inclusión, obtenida sobre parte del contorno. Para tal objetivo, los autores proponen capturar la región real, esto es, el defecto (fase 1) y el resto del cuerpo (fase 0) a través de una función característica denominada χ^r . Si ambas fases poseen tensores de elasticidad simétricos y positivo definidos $\mathbf{C}_1$ y $\mathbf{C}_0$, nos permite describir el tensor para todo el cuerpo como

$$\mathbf{C}^r(x) = (1 - \chi^r(x))\mathbf{C}_0 + \chi^r(x)\mathbf{C}_1 \quad \forall x \in \Omega.$$

Asumiendo que el contorno de Ω es suficientemente suave por partes y que, además, está dividido en dos partes disjuntas $\partial\Omega = \Gamma_D \cup \Gamma_N$, podemos definir el problema de condiciones de contorno para el sólido real, esto es

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div} \mathbf{C}^r \varepsilon(\mathbf{u}^r) &= f && \text{en } \Omega, \\ \mathbf{u}^r &= 0 && \text{sobre } \Gamma_D, \\ \mathbf{C}^r \varepsilon(\mathbf{u}^r) \mathbf{n} &= \mathbf{g} && \text{sobre } \Gamma_N. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

En orden a obtener la función real χ^r , los autores proponen construir una sucesión de suposiciones $\chi^{(k)}$, tal que converga a χ^r cuando $k \rightarrow \infty$. Si adicionalmente tenemos una región de mediciones en el cuerpo real u^r sobre $\Gamma \subset \Gamma_N$, es posible definir la función objetivo

$$J(\chi^{(k)}) = \int_{\Gamma} |u^{(k)} - u^r|^2 ds, \quad (3.2)$$

donde $u^{(k)}$ es solución de

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div} \mathbf{C}^{(k)} \varepsilon(\mathbf{u}^{(k)}) &= f & \text{en } \Omega, \\ \mathbf{u}^{(k)} &= 0 & \text{sobre } \Gamma_D, \\ \mathbf{C}^{(k)} \varepsilon(\mathbf{u}^{(k)}) \mathbf{n} &= g & \text{sobre } \Gamma_N, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

con $\mathbf{C}^{(k)}(x) = (1 - \chi^{(k)}(x))\mathbf{C}_0 + \chi^{(k)}(x) \mathbf{C}_1$ para todo $x \in \Omega$.

La idea es aproximar $\chi^{(k)}$ a χ^r con la información contenida en las mediciones u^r , para tal objetivo, se utiliza el método de homogeneización de amplitud pequeña, el que asume que el contraste entre las constantes de Lamé de la zona defectuosa (fase 1) y la restante zona no dañada (fase 0) es pequeña. En otras palabras, se definen las constantes de Lamé λ_1 y μ_1 asociadas al tensor $\mathbf{C}_1$, como $\lambda_1 = (1 + \eta)\lambda_0$ y $\mu_1 = (1 + \eta)\mu_0$. Usando la suposición de amplitud pequeña y considerando que los coeficientes del tensor $\mathbf{C}^{(k)}$ son una función afín de η , la solución $u^{(k)}$ es analítica con respecto a η y es posible escribir

$$u^{(k)} = u_0^{(k)} + \eta u_1^{(k)} + \eta^2 u_2^{(k)} + O(\eta^3). \quad (3.4)$$

Usando una formulación relajada, se puede obtener una sucesión de tal manera que $\chi^{(k)} \rightharpoonup \theta$ en forma débil y para un determinado θ produce una cascada de tres problemas de valores de contorno para (u_0, u_1, u_2) , según potencias de η :

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div} \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) &= f & \text{en } \Omega, \\ \mathbf{u}_0 &= 0 & \text{sobre } \Gamma_D, \\ \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) \mathbf{n} &= g & \text{sobre } \Gamma_N, \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div} (\mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_1)) &= \operatorname{div} (\theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0)) & \text{en } \Omega \\ \mathbf{u}_1 &= 0 & \text{sobre } \Gamma_D \\ \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_1) \mathbf{n} &= -\theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) \mathbf{n} & \text{sobre } \Gamma_N, \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div}(\mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_2)) &= -\operatorname{div}(\theta(1-\theta)\mathbf{C}_0 \mathbf{M} \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0)) \\ &\quad + \operatorname{div}(\theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_1)) \quad \text{en } \Omega \\ \mathbf{u}_2 &= 0 \quad \text{sobre } \Gamma_D \\ \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_2) \mathbf{n} &= \theta(1-\theta)\mathbf{C}_0 \mathbf{M} \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) \mathbf{n} \\ &\quad - \theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_1) \mathbf{n} \quad \text{sobre } \Gamma_N. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Se tiene en (3.5) que $u_0^{(k)} = u_0$, en (3.6) y (3.7) es posible demostrar que $u_1^{(k)} \rightharpoonup u_1$ y $u_2^{(k)} \rightharpoonup u_2$ respectivamente. Por otro lado, el tensor simétrico $\mathbf{M}$ en (3.7) se obtiene como

$$\mathbf{M}(x) A : B = \int_{\mathbb{S}^{N-1}} \left(\frac{A\xi \cdot B\xi}{\mu_0} - \frac{(\lambda_0 + \mu_0)(A\xi \cdot \xi)(B\xi \cdot \xi)}{\mu_0(2\mu_0 + \lambda_0)} \right) \nu(x, d\xi), \quad (3.8)$$

donde ν es una familia de medidas de probabilidad sobre la esfera unitaria $\mathbb{S}^{N-1}$ en $\mathbb{R}^N$ y están parametrizados por la posición al interior de Ω . A y B son matrices arbitrarias de dimensión $N \times N$ y $A : B = \operatorname{tr}(B^T A)$ es el producto interno habitual en un espacio de matrices.

Realizando una expansión de Taylor de la función objetivo en (3.2) y despreciando los términos de orden superior, se puede escribir la siguiente función objetivo relajada

$$\begin{aligned} J_{sa}^*(\theta, \nu) &= \int_{\Gamma} |u_0 - u^r|^2 ds + 2\eta \int_{\Gamma} (u_0 - u^r) \cdot u_1 ds \\ &\quad + \eta^2 \int_{\Gamma} u_1 \cdot u_1 ds + 2\eta^2 \int_{\Gamma} (u_0 - u^r) \cdot u_2 ds, \end{aligned}$$

donde u_0, u_1, u_2 son soluciones de (3.5), (3.6) y (3.7) respectivamente. Para simplificar la fórmula para $J_{sa}^*(\theta, \nu)$, que depende de ν sólo a través de u_2 , se introduce un problema adjunto p_0 , solución de

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div}(\mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{p}_0)) &= 0 && \text{en } \Omega \\ \mathbf{p}_0 &= 0 && \text{sobre } \Gamma_D \\ \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{p}_0) \mathbf{n} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_N \setminus \Gamma \\ \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{p}_0) \mathbf{n} &= 2(u_0 - u^r) && \text{sobre } \Gamma. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Entonces, podemos reescribir la función objetivo como

$$\begin{aligned}
J_{sa}^*(\theta) = & \int_{\Gamma} |u_0 - u^r|^2 ds - \eta \int_{\Omega} \theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) : \varepsilon(\mathbf{p}_0) \mathbf{dx} \\
& + \eta^2 \int_{\Gamma} u_1 \cdot u_1 ds - \eta^2 \int_{\Omega} \theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_1) : \varepsilon(\mathbf{p}_0) \mathbf{dx} \\
& + \eta^2 \int_{\Omega} \theta(1 - \theta) \Phi dx,
\end{aligned} \tag{3.10}$$

donde $\Phi(x) = \min_{\xi \in \mathbb{S}^{N-1}} \left(\frac{\sigma_0 \xi \cdot \tau_0 \xi}{\mu_0} - \frac{(\lambda_0 + \mu_0)(\sigma_0 \xi \cdot \xi)(\tau_0 \xi \cdot \xi)}{\mu_0(2\mu_0 + \lambda_0)} \right)$, $\sigma_0 = \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0)$ y $\tau_0 = \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{p}_0)$.

Es posible obtener la derivada $\frac{\partial J_{sa}^*}{\partial \theta}$ para obtener un método de gradiente y completar el algoritmo de optimización. Más detalles sobre el método de detección de defectos se pueden encontrar en el punto 3 de Mura y Gutiérrez (2011).

3.2. Versión adaptativa

El procedimiento adaptativo propone relocalizar la posición de las zonas de medición y de la zona de carga para mejorar la adivinanza actual de la configuración del defecto. El criterio para mover la zona de carga es una aproximación de la energía elástica de la supuesta inclusión ponderada en cada punto del dominio Ω por la función θ . En base a esta defición es posible escribir

$$\begin{aligned}
\mathcal{E}_{sa} &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} \theta \mathbf{C}^{\text{eff}} \varepsilon(\mathbf{u}) : \varepsilon(\mathbf{u}) \mathbf{dx} \\
&= \frac{1}{2} \int_{\Omega} \theta(1 + \eta\theta) \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) : \varepsilon(\mathbf{u}_0) \mathbf{dx} + \eta \int_{\Omega} \theta(1 + \eta\theta) \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) : \varepsilon(\mathbf{u}_1) \mathbf{dx} \\
&\quad - \frac{1}{2} \eta^2 \int_{\Omega} \theta^2 (1 - \theta) \mathbf{C}_0 \mathbf{M} \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) : \varepsilon(\mathbf{u}_0) \mathbf{dx} + \eta^2 \int_{\Omega} \theta \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) : \varepsilon(\mathbf{u}_2) \mathbf{dx} + o(\eta^2),
\end{aligned}$$

donde

$$\mathbf{C}^{\text{eff}} = \mathbf{C}_0 + \eta \theta \mathbf{C}_0 - \eta^2 \theta(1 - \theta) \mathbf{C}_0 \mathbf{M} \mathbf{C}_0 + o(\eta^2).$$

La zona de carga es elegida de un grupo de posiciones para la cual se obtiene el máximo valor de $\mathcal{E}_{sa}$.

Usando el hecho de que el método de detección de defectos tiene un mejor desempeño cuando la inclusión real se encuentra cercana a las zonas de medición, se selecciona la

posición de la zona de medición que obtiene el mínimo valor de la función

$$H(\Gamma) = \int_{\Omega} \theta(x) d(x, \Gamma) dx,$$

donde $\theta(x)$ es la adivinanza actual de la función característica del sólido real y $H(\Gamma)$ pondera $\theta(x)$ en x en base a la distancia geodésica de x a Γ . Si nosotros consideramos N zonas de medición para detectar el defecto, se seleccionarán de las N posiciones de Γ que obtienen los valores más bajos de $H(\Gamma)$.

4. METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS EXPERIMENTAL

4.1. Sistema de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos (SAD) son utilizados para medir y registrar señales que son originadas de dos fuentes principales: la primera de ellas, es la medición directa de cantidades eléctricas como voltaje, corriente o resistencia. La segunda es la que se origina de transductores, como las galgas extensométricas o las celdas de carga (Cooper & Helfrick, 1991).

Los SAD se clasifican en analógicos y digitales. En los sistemas analógicos las señales se representan mediante variables continuas; en los sistemas digitales, las señales no varían en forma continua, sino que cambian en pasos o en incrementos discretos. El tipo de SAD (analógico o digital) depende en su gran mayoría del uso que se le dará a los datos registrados. Los sistemas analógicos se utilizan cuando el ancho de banda es amplio y se puede tolerar poca exactitud, el sistema digital en cambio, es utilizado cuando el ancho de banda es pequeño y cuando se necesita mayor precisión (Cooper & Helfrick, 1991).

4.1.1. Descripción del SAD empleado en los experimentos

El SAD debe ser desarrollado en función de ciertas características que son propias de la aplicación en la cual será utilizado. En base a esto, se concluye que no todos los SAD son aplicables a todos los estudios experimentales y viceversa. El diseño del SAD propuesto en este trabajo consta de las siguientes partes:

- (i) Características de la medición
- (ii) Instrumentación para la medición

La caracterización de la medición pretende entregar los fundamentos del SAD que es aplicable a dicho estudio. Los componentes fundamentales de ésta son las cualidades que son propias de las magnitudes o variables a medir. Por ejemplo, si se realiza un estudio de niveles de temperaturas en un proceso termodinámico, se requerirá de instrumentos capaces de medir dicha variable, con la resolución y precisión necesaria. Para obtener la

medición que se requiere se deben utilizar los instrumentos y programas adecuados para dicha caracterización, lo que podría denominarse *instrumentación para la medición*.

El presente estudio experimental comprende la medición de las variables físicas de fuerza y desplazamientos, además el SAD es capaz de transmitir los datos medidos directamente hacia el computador para su procesamiento. En la Fig. 4.1 se puede apreciar la implementación final del conjunto de instrumentos para la adquisición de las mediciones.

En la Fig. 4.2 se muestra el digrama de instrumentos del SAD, la información de los experimentos es transmitida y transformada a través de los sensores que miden los desplazamientos (transductor de desplazamiento) y la carga aplicada (celda de carga). Esta información es adquirida con el registrador de datos TDS-302 y luego enviada hacia el computador a través del controlador GP-IB.



FIGURA 4.1. Fotografía de la implementación del sistema de adquisición de datos.

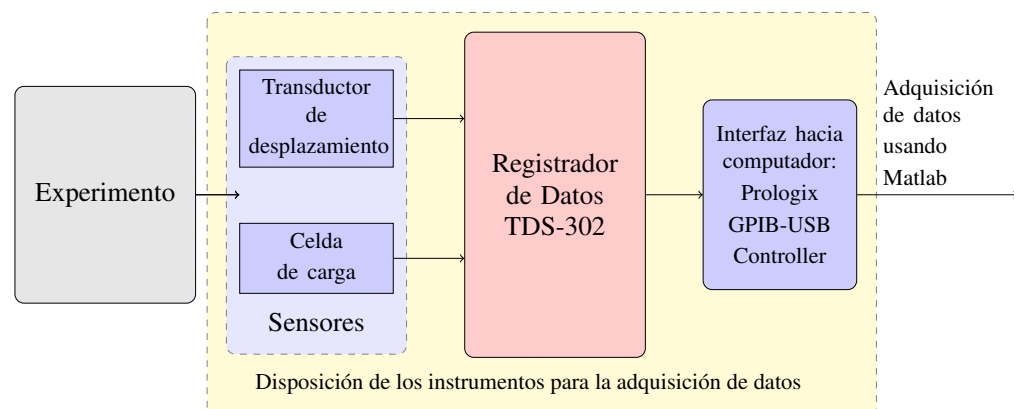


FIGURA 4.2. Instrumentación para la adquisición de datos.

4.1.2. Descripción de los instrumentos del SAD

Generalmente la variable de entrada de los sistemas de medición no es eléctrica. Con el fin de utilizar métodos eléctricos y técnicas de medición, manipulación o control, estas mediciones no eléctricas se convierten en eléctricas a través de dispositivos conocidos con el nombre de transductores (Cooper & Helfrick, 1991).

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal que la corresponda, pero de una forma física distinta. Existen seis tipos de señales: mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas, magnéticas y ópticas. Cualquier dispositivo que convierte una de éstas en otra, debiese ser considerado un transductor (Areny, 2008).

4.1.2.1. Transductores de desplazamiento del tipo galga extensométrica

En los transductores de desplazamiento del tipo galga extensométrica las variaciones de la posición que se quiere medir se convierten en variaciones de resistencia eléctrica, generalmente a través de un contacto móvil que se desplaza a lo largo de un material resistivo, como se puede apreciar en la Fig. 4.3. Dependiendo de la forma en que se mueve el contacto es posible definir transductores del tipo potenciómetros y rotatorios.

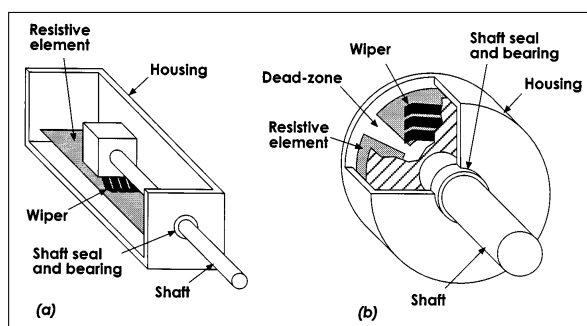


FIGURA 4.3. Transductor de desplazamiento resistivo de movimiento lineal, a) potenciómetro, b) rotatorio. Figuras extraídas de Webster (1998).

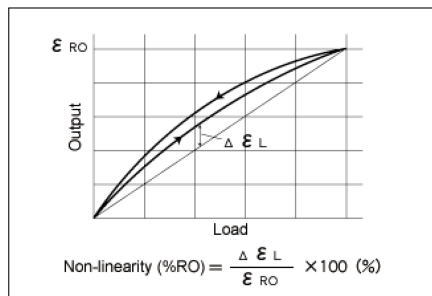
En la Tabla 4.1 se presentan las especificaciones técnicas del transductor de desplazamiento utilizado en los ensayos. Cabe destacar la alta resolución de éste, condición necesaria para el trabajo experimental. Con respecto a los valores de no-linealidad, si bien es cierto son pequeños, del orden de 0.15% de RO (*Rated output*), el comportamiento del instrumento depende en gran medida de las condiciones de apoyo de este dispositivo y por

lo tanto, de la aplicación en la cual será utilizado. Las fuentes de no-linealidad son de dos tipos: la histéresis y la no-linealidad propiamente tal. Las definiciones de ambos se presentan en la Fig. 4.4.

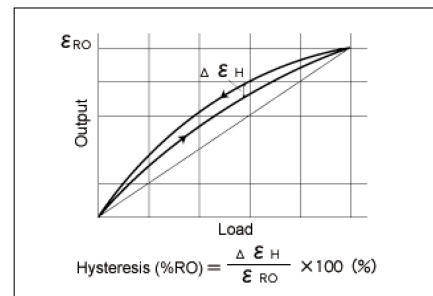
En la Fig. 4.5 se observa uno de los dos transductores del tipo CDP-5 usado en el estudio experimental; además se muestra un detalle con el factor de sensibilidad del instrumento.

TABLA 4.1. Especificaciones del transductor de desplazamiento. Valores extraídos de *Strain Gauge-type Transducers* (2002).

Tipo	Capacidad (mm)	Salida nominal(RO)	Sensibilidad (μ/mm)	No linealidad
CDP-5	5	5 mV/V	2000	0.15% de RO



(a) No-linealidad: Distancia máxima entre la línea de la curva de calibración y el punto de carga. La no-linealidad se expresa como un porcentaje de la potencia nominal (RO%).



(b) Histéresis: Distancia máxima entre la línea de la curva de carga y descarga. La histéresis se expresa como un porcentaje de la potencia nominal (RO%).

FIGURA 4.4. Tipos de no-linealidad en el transductor de tipo galga extensométrica. Figuras extraídas de *Strain Gauge-type Transducers* (2002).

4.1.2.2. Celda de carga

Las celdas de carga son instrumentos que miden fuerza aplicada. El método que utilizan está basado en mediciones de deformaciones. Específicamente, estas mediciones se vinculan a través de alguna relación matemática proveniente de un proceso físico en mediciones de fuerza.

La celda de carga usada en este estudio experimental corresponde a una celda de 200 kN de capacidad. Las especificaciones de la celda se muestran en la Tabla 4.2; ésta



(a) Sensor CDP-5A. (b) Detalle del factor de sensibilidad.

FIGURA 4.5. Transductor de desplazamiento utilizado en el estudio experimental.

es diseñada sólo para ser usada en compresión como puede apreciarse en la Fig. 4.6. Este instrumento, al igual que el transductor de desplazamientos de tipo galga extensométrica, posee un nivel de no-linealidad e histéresis, y como se observa en la Tabla 4.2, este valor es de 1% de RO.

TABLA 4.2. Especificaciones de la celda de carga. Valores extraídos de *Strain Gauge-type Transducers* (2002).

Tipo	Capacidad [kN]	Salida nominal(RO)	No linealidad
LCW-C-200KN	200	1 mV/V (2000 μ)	1% de RO



FIGURA 4.6. Celda de carga utilizada en el estudio experimental.

4.1.2.3. Registrador de datos

El TDS-302 es un instrumento de alta velocidad y alta estabilidad que mide deformación estática, usa un convertidor tri-integrado de alta estabilidad que remueve los efectos de las fuerzas termoelectromotrices generadas en las galgas extensométricas. El instrumento no sólo puede medir deformación, sino que voltaje de corriente continua y temperatura usando termocuplas. El dispositivo se observa en la Fig. 4.7, y en el anexo B.1 se presentan las principales características técnicas del registrador de datos para las mediciones de deformación.



FIGURA 4.7. Registrador de datos TDS-302.

4.1.3. Interfaz hacia el computador

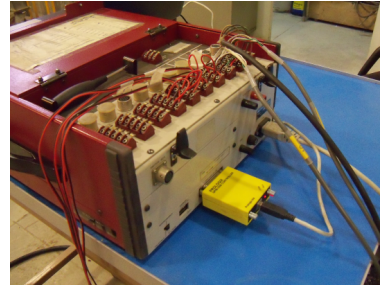
La interfaz del registrador de datos hacia el computador se realizó a través del dispositivo *GPIB-USB Controller* de Prologix (ver Fig. 4.8). Según *Prologix GPIB-USB Controller User Manual* (2009), este dispositivo convierte cualquier computador con un puerto USB en un controlador GP-IB. En el modo de controlador, este dispositivo puede controlar remotamente instrumentos como osciloscopios, analizadores lógicos, entre otros.

4.1.4. Programación utilizada para la adquisición de datos

Se utilizó el programa Matlab para programar la adquisición de datos y la automatización de las diferentes tareas. El toolbox usado para ello es el *Instrument Control Toolbox*



(a) Vista frontal.



(b) Dispositivo en registrador de datos.

FIGURA 4.8. Imágen del dispositivo *GPIB-USB Controller*.

(*MATLAB Instrument Control Toolbox User Guide*, 2010), que permite el control de instrumentos externos, en nuestro caso el TDS-302, y con ello adquirir los datos de las mediciones hacia el computador. Un código básico para la adquisición de datos se muestra en el anexo A. Este código se plantea en tres etapas principales. La primera es la preparación para la adquisición, donde se ejecutan las tareas para la comunicación entre el registrador de datos y el computador. La segunda etapa consiste en la definición del número de canales a utilizar y a mostrar en pantalla. La tercera etapa consiste en la adquisición propiamente tal de las mediciones. En base a este código es posible desarrollar aplicaciones más complejas dependiendo de las necesidades del usuario.

4.1.5. Análisis de resolución y sensibilidad del SAD

La resolución máxima del SAD se define como la mínima magnitud, de la variable de interés, que puede ser medida por éste. Esta mínima magnitud es entregada por los fabricantes o puede ser calculada en base a los parámetros entregados por ellos. Para determinar dicha cantidad se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Resolución del dispositivo de medición.
- Especificaciones técnicas de los transductores.

4.1.5.1. Resolución del dispositivo TDS-302 para medir deformación

La resolución del registrador de datos TDS-302 para medir deformación es definida por el fabricante, y en este caso es $\varepsilon_{min} = 1 \times 10^{-6}$. Este valor fue extraído del manual del instrumento, un extracto de éste se presenta en el anexo B.1.

4.1.5.2. Resolución del instrumento CDP-5A para medir desplazamientos

Según el manual de operación del TDS-302, la resolución para el transductor de desplazamiento del tipo galga extensométrica puede ser calculado, como se exhibe en el anexo B.2, según la siguiente ecuación:

$$\delta_{min} = \frac{F_1}{F_2 \times V_c} \times \varepsilon_{min} [mm] = \frac{5}{5 \times 10^{-3} \times 2} \times 10^{-6} [mm] = 0.0005 [mm], \quad (4.1)$$

donde

$$F_1 = 5mm \text{ (Rated Range),}$$

$$F_2 = 5mV/V \text{ (Rated output),}$$

$$V_c = 2.00V \text{ (Bridge voltage),}$$

$$\varepsilon_{min} = 10^{-6}.$$

Evalutando en términos de la sensibilidad del transductor S_t , tenemos:

$$\delta_{min} = \frac{1\mu}{S_t} = 0.0005 [mm], \quad (4.2)$$

donde

$$S_t = \frac{F_2 \times V_c}{F_1 \times \varepsilon_{min}} \left[\frac{\mu}{mm} \right] = \frac{5 \times 10^{-3} \times 2}{5 \times 10^{-6}} \left[\frac{\mu}{mm} \right] = 2000 \left[\frac{\mu}{mm} \right].$$

4.1.5.3. Sensibilidad para medir la fuerza aplicada

Según el manual de operación del TDS-302, la resolución para la celda de carga, como se exhibe en el anexo B.3, se calcula según la siguiente ecuación:

$$F_{min} = \frac{F_1}{F_2} [N], \quad (4.3)$$

donde F_1 es la capacidad de la celda de carga en *Newton* (N) y F_2 es el factor de salida (RO) en unidades de deformación (μ). Luego

$$F_{min} = \frac{200 \times 10^3}{2000} = 100 [N].$$

La sensibilidad de la celda de carga puede ser expresada como:

$$F_{min} = \frac{1\mu}{S_c} \Rightarrow S_c = \frac{1\mu}{F_{min}} = 0.01 \left[\frac{\mu}{N} \right].$$

4.2. Teoría de mediciones

Una cantidad medible es una característica de los fenómenos, los órganos o sustancias que se puede definir de manera cualitativa y cuantitativamente. Las primeras cantidades medibles son probablemente la longitud, la masa y el tiempo; estas son las cantidades que las personas emplean en la vida cotidiana y que de esta manera se introdujieron inconscientemente como conceptos comunes. Más tarde, con el desarrollo de la ciencia, las cantidades medibles llegaron a ser introducidas conscientemente en el estudio de las leyes correspondientes en la física, la química y la biología.

La característica principal de las cantidades es que pueden ser medidas. La medición es el proceso de determinar el valor de una cantidad experimental con la ayuda de medios técnicos especiales llamados instrumentos de medida. Los instrumentos de medición son creados por los seres humanos y cada medición, en general, es un procedimiento experimental. Por lo tanto, los resultados de las mediciones no pueden ser absolutamente exactos.

Las medidas son tan comunes e intuitivamente comprensibles que uno podría pensar que no hay necesidad de determinar las reglas sobre las que las mediciones se basan; sin embargo, una clara comprensión de las premisas de partida es necesaria para el desarrollo de cualquier ciencia, y por esta razón, es conveniente examinar los postulados de la teoría de las mediciones. Los postulados de la teoría de la medición son los siguientes (Rabinovich, 2009):

- (i) El valor verdadero de la cantidad medible existe.
- (ii) Existe un único valor verdadero en cada medición.

- (iii) El valor verdadero de la cantidad medible es constante.
- (iv) El valor verdadero no se puede encontrar.

La discrepancia entre el modelo y el objeto se empleó como justificación del postulado (iv). Sin embargo, también existen otras restricciones inevitables sobre la aproximación del valor verdadero de una cantidad mensurable. Por ejemplo, la exactitud de los instrumentos de medida está inevitablemente limitada.

4.2.1. Términos usados frecuentemente en la medición

Entendemos que existen muchos conceptos de uso común en el contexto de las mediciones y que un gran número de ellas son ampliamente utilizadas, desde situaciones muy cotidianas a las más complejas. Es por esta razón que es de suma importancia determinar una base conceptual para comprender el proceso de medición. Los conceptos fundamentales que pueden extraerse de Cooper y Helfrick (1991), Areny (2008) y Kirkup y Frenkel (2006), esenciales para comprender el proceso de medición y adquisición de datos experimentales son:

Medición: La medición es un proceso por el cual una cantidad, como la temperatura ambiental o la velocidad de un automóvil en una carretera, es obtenida.

Calibración: Para que un instrumento o artefacto indique con precisión el valor de una cantidad, el instrumento o artefacto requiere una calibración. Este procedimiento es esencial para establecer la trazabilidad del instrumento u objeto con base en un patrón primario. La calibración se define como el conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de magnitudes indicados por un instrumento de medición, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes determinados por medio de patrones (JCGM, 2008b).

Un patrón es una medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o más valores de una magnitud que sirva como referencia.

Error: El término error es sin duda una de las mayores fuentes de confusión cuando se habla de la medición. En el lenguaje cotidiano se utiliza comúnmente para referirse a una equivocación. En el contexto de la medición, el error se define como la diferencia entre el valor medido y el valor real:

$$error = valor_{medido} - valor_{real}. \quad (4.4)$$

En términos de la teoría de la medición, el valor verdadero de la cantidad que se mide es imposible de conocer, por lo que se deduce que el error, tal como se define en (4.4), también es desconocido.

Incertidumbre: La incertidumbre de la medición es un intervalo en el que el valor verdadero de la medición se encuentra con una determinada probabilidad. La incertidumbre es definida con límites que se leen a partir del resultado de la medición de acuerdo con la probabilidad mencionada. Al igual que un error, la incertidumbre se puede especificar en forma absoluta o relativa.

Repetibilidad: En muchos casos, las mediciones se hacen bajo las mismas condiciones (en la medida de lo posible). Cuando esto sucede, es posible que los valores obtenidos exhiban poca variación o dispersión. En estos casos podemos decir que las mediciones se repiten.

Reproducibilidad: Experimentadores en diferentes lugares alrededor del mundo necesitan comparar sus mediciones con las de otros experimentadores. Si la cantidad sometida a medición está bien definida, existe una expectativa de que, cuando una medida es realizada y se utiliza cualquier técnica para ello, el mismo valor se debe obtener para la magnitud sometida a medición con independencia de quién hace la medición y el instrumento que se utiliza. Si hay coherencia entre los valores obtenidos por diferentes experimentadores, decimos que el valor es reproducible.

Exactitud (*accuracy* en inglés): Aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al valor real.

Fidelidad (*precision en inglés*): Dado el valor fijo de una variable, la fidelidad es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas difieren una de la otra.

Resolución: La resolución o discriminación es el incremento mínimo de la entrada para obtener un cambio en la salida.

Histéresis: La histéresis se refiere a la diferencia en la salida para una misma entrada, según la dirección en que se ésta se aplica.

Desviación de cero (*Offset en inglés*): Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el *Offset*.

Sensor: Es definido como un dispositivo capaz de reflejar el valor de una característica o de una propiedad en un ente físico (por ejemplo, la temperatura de un material) y responder a éste con una señal eléctrica de salida, mediante alguna relación definida.

Transductor: El transductor se define como un dispositivo que transforma una variable física (fuerza, presión, temperatura, velocidad, aceleración, etc.) en otra.

4.2.2. Tipos de error en la medición

Un método experimental debe contener algún tipo de análisis del error; para ello, se deben definir las características y fuentes de los errores. Los componentes de cualquier medición son el método de medición, los instrumentos de medida, y adicionalmente, la persona que lleva a cabo la medición. La imperfección de cada componente de la medición, contribuye al error en la medición (Rabinovich, 2009). Por esta razón, la forma general del error se estima como:

$$\xi = \xi_m + \xi_i + \xi_p, \quad (4.5)$$

donde ξ es el error en la medición, ξ_m es el error metodológico, ξ_i es el error instrumental, y ξ_p es el error personal o grueso. Cada tipo de error puede ser definido como:

- (i) **Errores metodológicos:** Pueden surgir como resultado de una teoría inadecuada de los fenómenos en los que la medición se basa y la inexactitud de las relaciones que se emplean para encontrar una estimación de la cantidad medida. En particular, el error causado por la diferencia de umbral entre el modelo de un objeto específico y el objeto en sí es un error metodológico.
- (ii) **Errores instrumentales:** Son causados por la imperfección de los instrumentos de medida. Normalmente, el error intrínseco de los instrumentos de medida, es decir, el error obtenido en condiciones de referencia considerado normal, se distingue de los errores adicionales, es decir, los errores causados por la desviación de las condiciones de referencia.
- (iii) **Errores personales o gruesos:** Son de origen humano, como mala lectura de instrumentos, ajuste incorrecto y aplicación inapropiada, así como equivocación en los cálculos. Cuando el hombre participa en las mediciones, se cometen inevitablemente algunos errores graves. Aunque es imposible eliminarlos todos, se debe intentar anticiparlos y corregirlos (Cooper & Helfrick, 1991).

4.2.2.1. Naturaleza de los errores en la medición

La clasificación anterior de los errores de medición según (4.5) se basa en la causa de la errores. Otra clasificación importante de los errores de medición se basa en sus propiedades. En este sentido, se distinguen los errores aleatorios y sistemáticos.

Errores aleatorios

Los errores aleatorios se deben a causas desconocidas y ocurren incluso cuando todos los errores sistemáticos se han considerado. En experimentos bien diseñados, por lo general, se presentan pocos errores aleatorios, pero llegan a ser importantes en trabajos de gran exactitud. La única forma de compensar estos errores es incrementar el número de lecturas y usar medios estadísticos para obtener la mejor aproximación del valor real de la cantidad medida.

Errores sistemáticos

Un error de medición se dice que es sistemático si se mantiene constante o cambia de manera regular en las mediciones repetidas de la misma cantidad. Los errores sistemáticos se tratan de eliminar mediante la introducción de correcciones, sin embargo, de esta manera es imposible eliminar por completo el error sistemático, puesto que una parte de él se mantendrá como error residual.

Las condiciones ambientales son una fuente de errores sistemáticos, básicamente estos efectos externos afectan la operación de los dispositivos. La forma más simple de evaluar este tipo de error es realizar repeticiones en las mediciones con cambios en las condiciones ambientales (tiempo, temperatura, etc.), por ejemplo, mediciones en la mañana y en la tarde o mediciones en un día caluroso y en otro más helado. De esta manera se podrá evaluar la sensibilidad de los instrumentos frente a estos cambios.

Otra fuente de errores sistemáticos son los errores instrumentales. El análisis de estos errores se divide en dos etapas, la primera de ellas tiene que ver con la corrección de los instrumentos, lo que se realiza a través de un factor de corrección. La otra dirección en que se evalúan los errores instrumentales es la calibración de éstos; la manera básica para realizar este análisis es el ajuste a través de curvas de calibración.

4.3. Métodos de medición y análisis estadístico

El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor (JCGM, 2008a). La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas. Algunas contribuciones son inevitables por la definición del propio mensurando, mientras otras pueden depender del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionado para la medición (Lira, 2002).

La incertidumbre se agrupa en dos categorías dependiendo del método de evaluación de las mediciones, llamadas de tipo A y B. El método de evaluación Tipo A está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones; en cambio, en una evaluación Tipo B

de la incertidumbre se usa información externa u obtenida por experiencia. Las fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- Normas o literatura.
- Valores de mediciones anteriores.
- Conocimiento sobre el comportamiento del sistema de medición.

Un buen uso de la evaluación Tipo B requiere de una visión basada en la experiencia y en el conocimiento general, y es una habilidad que puede aprenderse con la práctica. Una evaluación Tipo B de la incertidumbre puede ser tan fiable como una de Tipo A, especialmente en una situación donde una evaluación de Tipo A se basa en un número relativamente pequeño de observaciones.

4.3.1. Medición directa de cantidades primarias: Análisis Tipo A

Consideremos una cantidad P que se desea medir a partir de algún instrumento o sistema de medición, el proceso de medición genera la cantidad Q que se define como el valor medido. En general, la relación entre P y Q implicará una corrección adicional, denominada C o M . De esta manera, es posible definir una relación básica entre las cantidades (Lira, 2002):

$$P = Q + C \quad (4.6)$$

o

$$P = M \times Q. \quad (4.7)$$

Si P es una cantidad estable y que no posee grandes variaciones en las repeticiones de las mediciones es posible generar una serie de cantidades independientes $\theta = (q_1, \dots, q_n), n \geq 2$. El procedimiento recomendado para hacer frente a este tipo de información se basa en

la teoría del muestreo o estadísticas. El procedimiento se basa en el supuesto de la existencia de una distribución de frecuencias $f(q)$, donde q representa un elemento genérico que pertenece a una población infinita de valores calibrados. Si bien el valor esperado y la varianza de $f(q)$ no se conocen, sus valores pueden ser estimados a partir de la información proporcionada por la serie θ , que se denomina una muestra aleatoria de la población.

Luego, si tomamos en cuenta una serie de variables aleatorias independientes $\Theta = (Q_1, \dots, Q_n)$, donde la distribución de los Q_i 's es igual a $f(q)$ y el valor q_i se toma como el valor particular asumido por la correspondiente variable de Q_i podemos calcular la media de la población como

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N Q_i$$

y la varianza de la población

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2.$$

Después de que la secuencia de medición se ha llevado a cabo, estas estadísticas asumen los valores

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N q_i \quad (4.8)$$

y

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2 \quad (4.9)$$

respectivamente. Ahora vemos que si μ es la esperanza de $f(q)$ y σ^2 su varianza, se puede demostrar que, con independencia de la forma de esta distribución

$$\mathbb{E}(\bar{Q}) = \mu \quad (4.10)$$

y

$$\mathbb{E}(S^2) = \sigma^2. \quad (4.11)$$

De acuerdo con (4.10), $\bar{q}$ es un estimador insesgado de μ y se toma como la mejor estimación de Q , por consiguiente

$$q_e = \bar{q}. \quad (4.12)$$

Del mismo modo, (4.11) establece que s^2 es un estimador insesgado de la varianza σ^2 , o equivalentemente, que s estima la desviación estándar σ (se debe recalcar que s no es un estimador insesgado de σ). Este último es considerado como la propagación típica de un miembro individual de la población, en otras palabras, si se toma al azar un valor q_i es de esperar, en promedio, que se desvíe de $\bar{q}$ la cantidad s . Por lo tanto, s representa una indicación cuantitativa de la fidelidad de la muestra aleatoria. Ahora bien, la mejor estimación de la propagación típica de la media de q ($\bar{q}$), es la varianza experimental de la media, para ello utilizamos el hecho de que

$$\mathbb{V}(\bar{Q}) = \frac{\sigma^2}{n} \quad (4.13)$$

y por lo tanto la desviación típica $S(\bar{Q})$ se calcula por

$$u_q = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.14)$$

que se identifica con la incertidumbre típica asociada a q_e .

Se debe tener en cuenta que u_q puede llegar a ser cero. En base a los modelos definidos en (4.6) y (4.7), esto no significa necesariamente que la cantidad medida Q es perfectamente conocida. Ahora bien, si u_q no se anula, es porque al menos uno de los q_i es diferente del resto (Lira, 2002).

Los valores que se obtienen a partir de las ecuaciones descritas en (4.8) y (4.14) representan la mejor estimación y la incertidumbre del mensurando respectivamente. Específicamente, el valor de la incertidumbre descrito por (4.14) representa la incertidumbre asociada a las variaciones aleatorias en observaciones repetidas bajo condiciones “aparentemente” iguales. Existen otras fuentes de incertidumbre que también deben ser consideradas, tal es el caso de las incertidumbres asociadas a la resolución, linealidad e histéresis de los instrumentos, entre otras.

En aplicaciones de ingeniería suele utilizarse a la desviación estándar como una medida de la calidad de la medición, por sobre el concepto de incertidumbre. En esta Tesis, se utilizará la desviación estándar como instrumento para cuantificar la calidad del resultado de las mediciones.

4.3.2. Varianza de la suma de dos variables aleatorias

Debido a que la medición de desplazamiento es una medida indirecta, es decir, calculada a partir de cantidades del Tipo A (medición directa de cantidades primarias) es necesario poseer una metodología para evaluar su varianza y consecuentemente su desviación estándar, como una medida de la fiabilidad de la medición.

Consideremos dos variables aleatorias independientes $\Theta^a = (Q_1^a, \dots, Q_m^a)$ y $\Theta^b = (Q_1^b, \dots, Q_n^b)$, suponemos que la variable aleatoria Θ^a tiene esperanza μ_a y varianza σ_a^2 , de la misma manera Θ^b posee esperanza μ_b y varianza σ_b^2 . Es posible demostrar que la varianza asociada a la variable aleatoria $Y = \alpha(\Theta^a \pm \Theta^b)$, con $\alpha \in \mathbb{R}$ es:

$$\mathbb{V}(Y) = \alpha^2(\sigma_a^2 + \sigma_b^2). \quad (4.15)$$

Basado en lo anterior, es posible definir una desviación estándar de manera aproximada de la variable Y como:

$$s_Y = |\alpha| \sqrt{s_a^2 + s_b^2}. \quad (4.16)$$

Aquí, s_a^2 y s_b^2 representan las varianzas muestrales de las variables aleatorias Θ^a y Θ^b respectivamente.

4.4. Procedimiento para el análisis de detección de defectos

En la Fig. 4.9 se presenta el esquema completo para la evaluación de defectos diseñado para el presente estudio experimental. Consta de las siguientes partes principales:

- (i) **Diseño del experimento:** Se enuncian los tópicos adicionales que deben ser incorporados al algoritmo de detección de defectos y que provienen directamente del análisis experimental.
- (ii) **Mediciones experimentales:** Se describe el procedimiento para la obtención de las mediciones de los desplazamientos en las probetas a ensayar. A partir de estos resultados es posible realizar las pruebas de detección de defectos y evaluar el desempeño del método.
- (iii) **Validación del modelo computacional:** Todo estudio de detección de defectos que utilice modelaciones computacionales para ello, debe contener algún tipo de validación de éstas.
- (iv) **Pruebas de detección de defectos:** Se estudian los métodos de detección en su versión original (Mura & Gutiérrez, 2011) y la versión adaptativa (Gutiérrez & Mura, 2010).
- (v) **Evaluación del acierto:** Es necesario cuantificar los resultados de detección para realizar un estudio comparativo del desempeño del método en aplicaciones reales.

4.4.1. Diseño del experimento

4.4.1.1. Limitaciones del proceso de medición

En las aplicaciones reales en ingeniería es muy común que una componente del desplazamiento sea demasiado pequeña y/o muy difícil de medir con el SAD de que se dispone. Por ejemplo, para una aplicación del tipo viga se tendrá, muy probablemente, que los desplazamientos horizontales sean muy pequeños.

Particularmente, las aplicaciones presentadas en esta Tesis corresponden a vigas y, por tanto, sólo se consideró el desplazamiento vertical en el algoritmo de detección. Este hecho hace que el término de orden cero de la función objetivo en (3.10) sea aproximado a

$$\int_{\Gamma} |u_0 - u^r|^2 ds \approx \int_{\Gamma} |u_{0\alpha} - u_{\alpha}^r|^2 ds$$

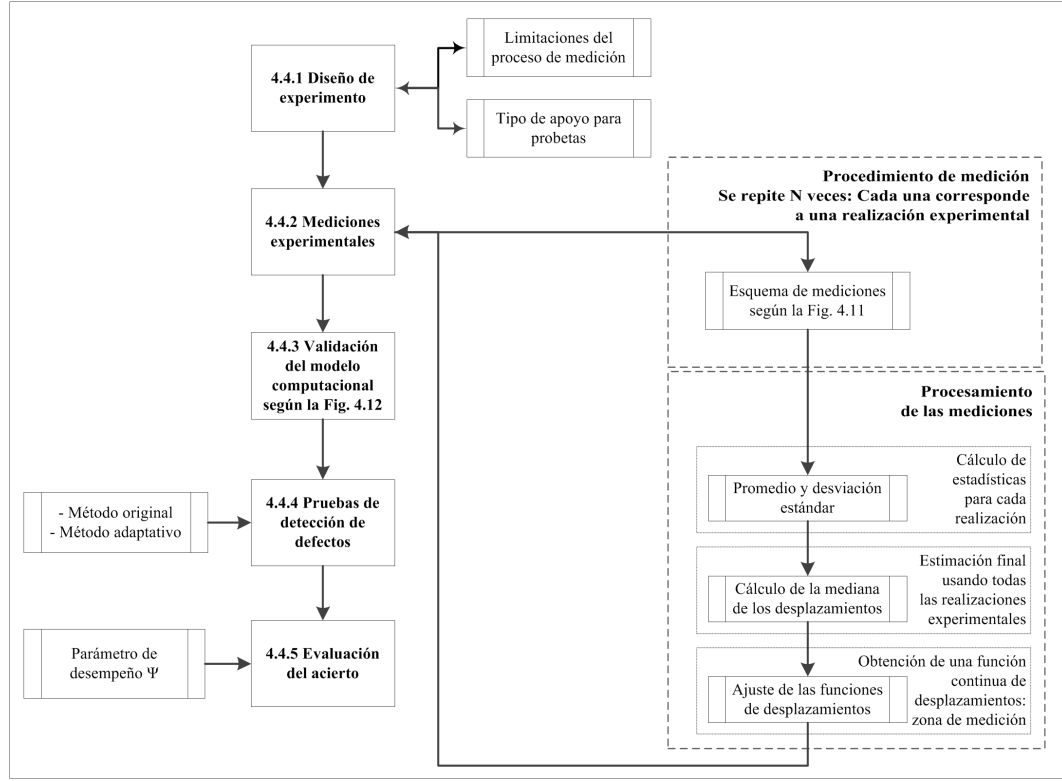


FIGURA 4.9. Diagrama de flujo del procedimiento para la detección de defectos.

y en (3.9) la expresión usada es

$$\mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{p}_0) \mathbf{n} = 2(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}^r) \Rightarrow \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{p}_0) \mathbf{n} \approx 2(\mathbf{u}_{0\alpha} - \mathbf{u}_\alpha^r) \hat{\mathbf{y}} \text{ sobre } \Gamma,$$

siendo $\hat{\mathbf{y}} = (0, -1)$ y el subíndice α indica la dirección vertical del sistema de coordenadas.

4.4.1.2. Tipo de apoyo utilizado para las probetas

Un aspecto a considerar en las modelaciones computacionales dice relación con las condiciones de soporte de las estructuras. En aplicaciones reales puede darse el caso de que la suposición de deformaciones o desplazamientos nulos no sea verdadera. Por ejemplo, en aplicaciones 2D los desplazamientos pueden ser particularmente pequeños, más aún, cuando es necesario mantener los elementos en el rango del comportamiento lineal-elástico; también puede darse el caso en que la rigidez del elemento es comparable a la rigidez del apoyo considerado para él. Todo esto genera una dificultad adicional en el

problema descrito en (3.5), pues provoca que los desplazamientos en el contorno de soporte Γ_D no se puedan aproximar a cero (*a priori*) en relación con u_0 en Γ_N y, por lo tanto, estos desplazamientos deban ser medidos o calculados de alguna forma. Esta condición en (3.5) se expresa como

$$\mathbf{u}_0 = 0 \Rightarrow \mathbf{u}_0 = \mathbf{h}(x, y, g) \text{ sobre } \Gamma_D. \quad (4.17)$$

Como se presenta en (4.17), la manera más correcta es plantear una función para las condiciones de apoyo de manera general y calcular su valor. Esta función generalmente depende de las coordenadas y de la condición de carga que se aplica a la estructura. En la mayoría de los casos estos desplazamientos pueden ser pequeños y despreciados en relación a los que se obtienen de los elementos que forman la estructura, en otros casos esta aproximación puede producir errores en las modelaciones computacionales.

En esta Tesis, la configuración del apoyo para las probetas limita la obtención de estos desplazamientos usando el esquema de medición; debido a ello, se desarrolló un modelo 3D en el programa de elementos finitos ANSYS para obtener esta función de desplazamientos.

4.4.2. Mediciones experimentales

4.4.2.1. Procedimiento de medición

En la Fig. 4.10 se muestran los pasos básicos para obtener las mediciones de desplazamientos. Estos son:

- Se decide el esquema de carga a utilizar.
- Se decide el número de puntos a medir (N_p).
- Se realizan dos repeticiones ($nr=2$) de carga y descarga para cada par de mediciones simultáneas (se poseen dos transductores $nt=2$). Cada repetición contiene las mediciones de seis niveles de carga ($nc=6$).
- En total se efectúan $(N_p/nt)*nr$ ciclos de carga y descarga, esto con el objetivo de obtener las mediciones para los N_p puntos seleccionados.

Se realizan dos repeticiones para obtener un número de mediciones de desplazamientos para cada nivel de carga mayor a 10 con el objetivo de realizar un análisis Tipo A, como se recomienda internacionalmente (JCGM, 2008a).

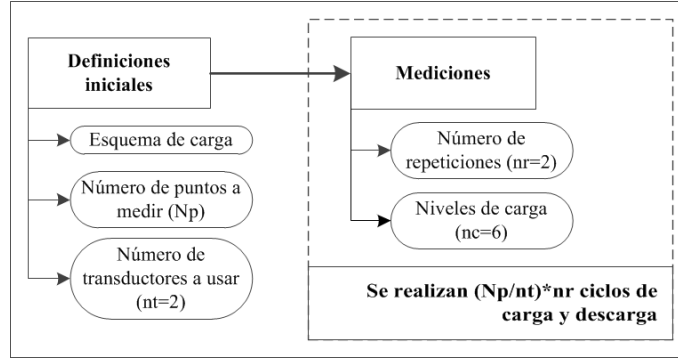


FIGURA 4.10. Esquema básico del procedimiento de medición.

4.4.2.2. Procesamiento de datos

Promedio y desviación estándar

En este ítem se obtienen la media y la desviación estándar s como se indica en (4.8) y (4.9). Estos cálculos se realizan para cada uno de los 6 niveles de carga y para cada realización experimental. La realización experimental corresponde a la obtención de una muestra aleatoria donde se varía concientemente un parámetro del proceso de medición, en este caso la ubicación del gato hidráulico.

El valor del desplazamiento final en cada punto de medición es una medida indirecta calculada en base a la siguiente relación de cantidades primarias

$$\delta = \frac{1}{S_t} \times (\delta_{final} - \delta_{inicial}), \quad (4.18)$$

donde S_t corresponde a la sensibilidad del transductor calculada en la sección 4.1.5.2, $\delta_{inicial}$ y δ_{final} son las mediciones directas del transductor en el nivel inicial y final de carga aplicada. Luego, calculamos la desviación estándar de manera aproximada según (4.16) utilizando las propiedades de la varianza poblacional como se indica en la sección 4.3.2.

Cálculo de la mediana de los desplazamientos

Para obtener la mejor estimación del desplazamiento en los puntos medidos se utiliza la mediana de las realizaciones experimentales. Esto se debe a que este estadístico es menos sensible a valores extremos (estadísticamente más robusto) y, en consecuencia, más apto para el método experimental diseñado.

Ajuste de las funciones de desplazamientos

Puesto que en el procedimiento de medición se obtienen valores puntuales de los desplazamientos, es necesario obtener una función continua de éstos con el objetivo de ser incorporados en el algoritmo de detección de defectos. Esta función se contruye a través de una interpolación de los datos, y para ello se utiliza una *spline* cúbica usando el programa Matlab. La definición de los desplazamientos de forma continua es la base para la definición de las zonas de medición que se ocupan en las pruebas de detección.

4.4.3. Validación del modelo computacional

La configuración de los soportes para las probetas limita la recopilación de los desplazamientos en los bordes de apoyo de la probeta sin defectos con el SAD, sobre todo en lo que respecta a la precisión, por ello, un modelo 3D fue desarrollado para obtener estos desplazamientos.

En la Fig. 4.11 se exhibe el esquema para la validación del modelo computacional: utilizando el modelo 3D en ANSYS es posible obtener los desplazamientos en los bordes de apoyo, y éstos se incluyen en el modelo 2D en FreeFem++. Luego, ambos modelos pueden ser validados comparándolos con los resultados experimentales.

4.4.4. Pruebas de detección de defectos

Las pruebas de detección de defectos consisten en utilizar el algoritmo de detección junto con los resultados de los ajustes de las funciones de desplazamientos (interpolación de los puntos medidos usando una *spline* cúbica). Se estudian los métodos de detección en

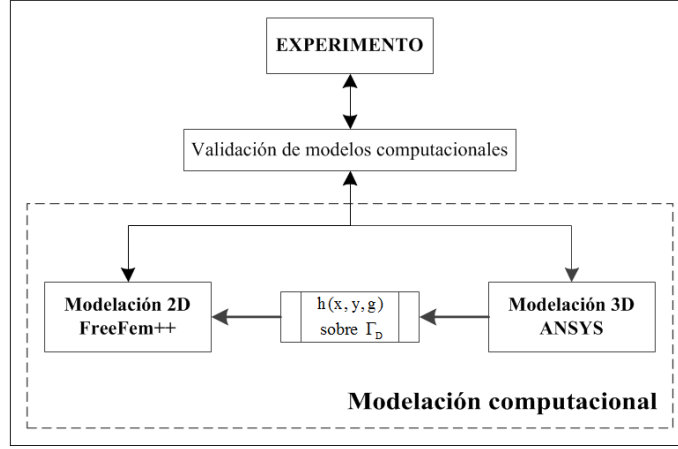


FIGURA 4.11. Validación del modelo computacional en la probeta sin defectos.

su versión original (Mura & Gutiérrez, 2011) y la versión adaptativa (Gutiérrez & Mura, 2010).

4.4.5. Evaluación del nivel de acierto

Para obtener una cantidad de comparación con respecto al desempeño del método se utiliza un número positivo que entrega un valor de cómo el defecto es ubicado por el método con respecto a su posición real. Este valor se define como (Gutiérrez & Mura, 2010):

$$\Psi(\theta) = \frac{\int_{\Omega} (1 + \rho)(1 - \chi^r) \theta \, dx + \int_{\Omega} (1 - \theta) \chi^r \, dx}{\int_{\Omega} (1 + \rho)(1 - \chi^r) \, dx + \int_{\Omega} \chi^r \, dx}.$$

Donde ρ es la función de la distancia euclidiana en $\mathbb{R}^N$ de un punto en Ω con respecto a la posición real del defecto. Por lo tanto, un Ψ más pequeño significa que tenemos un mejor desempeño del método, tomando el valor cero si y sólo si $\theta = \chi^r$.

5. PLAN DE EXPERIMENTOS Y RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS

5.1. Descripción de materiales

Se utilizó el acero como material para la fabricación de las probetas y de los apoyos para éstas. La elección del acero obedece a la necesidad de utilizar un material con un comportamiento lo más cercano al lineal e isotrópico. La Tabla 5.1 muestra las principales características mecánicas de los tipos de aceros usados.

TABLA 5.1. Características mecánicas del acero usado en el estudio experimental.

Elemento	Tipo de acero	Fluencia (F_y)	Resistencia última (F_u)	Módulo de young (E)	Coefficiente de Poisson (ν)
Apoyo	SAE 1020	43 ksi(295 MPa)	57 ksi(395 MPa)	190-200 GPa	0.27-0.3
Viga	SAE 1045	49 ksi(340 MPa)	93 ksi(640 MPa)	195 GPa	0.3

El acero SAE1020 se empleó para los apoyos y el acero SAE1045 para las probetas. El uso de un acero para las probetas con propiedades mecánicas mayores que para el apoyo está destinado a evitar la fluencia del material en las regiones cercanas a la zona de carga debido a las concentraciones de tensiones.

Basado en la información contenida en la Tabla 5.1 se seleccionaron para los modelos computacionales los parámetros elásticos $E=195 \text{ GPa}$ y $\nu=0.3$ para los dos aceros.

5.2. Procedimiento de ensayo

5.2.1. Implementación de experimentos

Para la ejecución de los experimentos se implementó un marco de carga, como se muestra en la Fig. 5.1. El montaje para los experimentos se centra en dos aspectos: el primero dice relación con la estructura que genera las condiciones de contorno del espécimen a ensayar; en este caso se utilizaron elementos de apoyo a los cuales la probeta fue soldada. La configuración del apoyo se muestra en la Fig. 5.2. Éste fue apernado

a la base de hormigón armado con una llave de torque, para asegurar la misma pretensión en todos los pernos. El nivel de torque se fijó en 300 Nm .

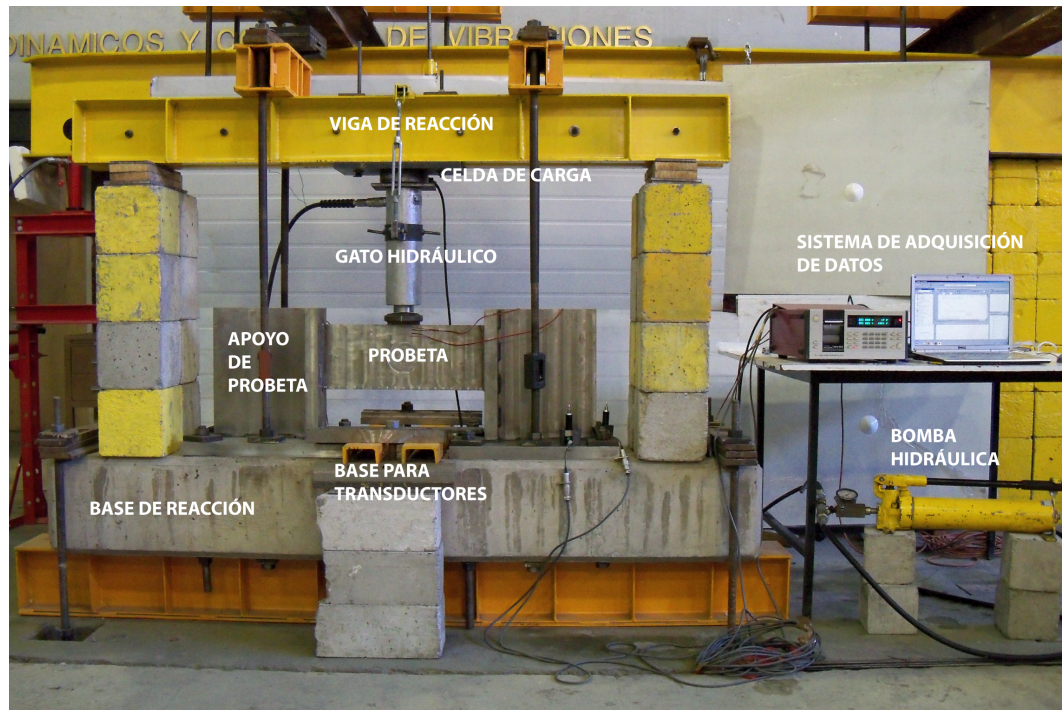


FIGURA 5.1. Montaje para los experimentos.

Para soldar las probetas al apoyo se utilizó un procedimiento de tipo semi-automático MIG (*Metal Inert Gas*) y una soldadura del tipo ranurada cuadrada donde la unión de los elementos fue en forma de “T”, como se muestra en la Fig. 5.3a y Fig. 5.3b.

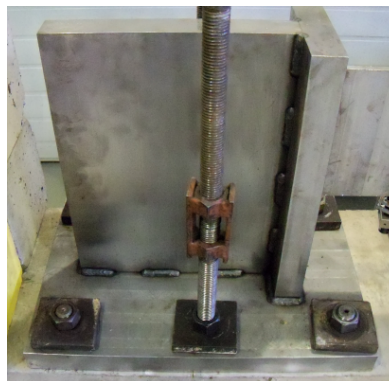


FIGURA 5.2. Detalle del apoyo para las probetas y de la conexión apernada.

El patrón de la soldadura se realizó en 8 pasos de longitud igual a la mitad de la altura de la probeta, ver Fig. 5.3b. En cada arista vertical se llevaron a cabo 4 pasos de soldadura, cuya secuencia fue desarrollada con el fin de reducir las tensiones y deformaciones residuales. La Fig. 5.3c muestra la soldadura en su etapa final, cuando ya se ha retirado el exceso de material sobre ella.

El segundo aspecto del montaje de los experimentos se relaciona con la manera de aplicar la carga a las probetas. En este estudio experimental se usó una carga vertical y para su aplicación se montó una viga de reacción, como se observa en la Fig. 5.1. Para completar el dispositivo de carga fue utilizado un sistema proporcionado por una bomba hidráulica y un gato hidráulico. El mecanismo de funcionamiento es simple, pues el gato hidráulico reacciona contra la viga de acero para transferir la carga a la probeta.

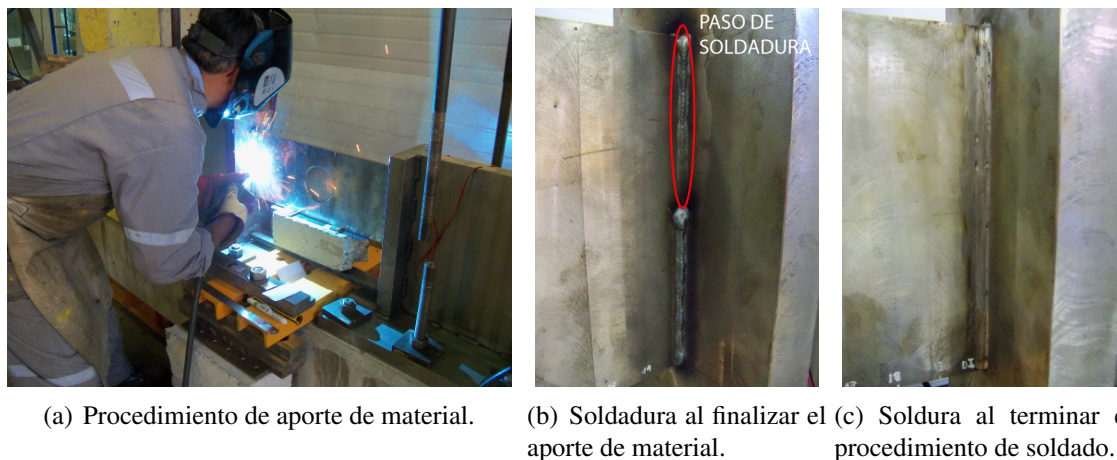


FIGURA 5.3. Esquema del proceso de soldadura en sus distintas etapas.

Para las mediciones de la carga aplicada y de los desplazamientos se utilizó un registrador de datos de tipo estático conectado al computador a través de la interfaz GP-IB, como se expuso en la sección 4.1. Los desplazamientos verticales se midieron con un transductor de tipo galga extensométrica con una sensibilidad de $2000 \mu/mm$, lo que significa que este instrumento tiene una resolución de $0.0005 mm$. La fuerza aplicada se midió a través de una celda de carga con una capacidad de $200 kN$ y sensibilidad de $0.01 \mu/N$.

5.2.2. Aplicación de la carga

En la Fig. 5.4 se presenta en detalle la forma en que se aplicó la carga. Se utilizó una barra cuadrada de 100 mm de largo y de lado igual a 10 mm para la transferencia de la fuerza de manera uniforme en todo el largo de aplicación. En la Fig. 5.5 se muestran las posiciones de la carga utilizadas en los experimentos; por la simetría del problema, todos los esquemas de carga se posicionan a la izquierda.

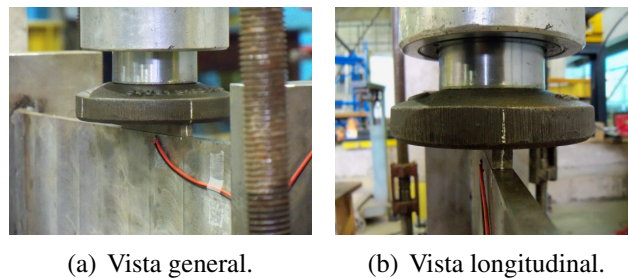


FIGURA 5.4. Aplicación de la carga.

El protocolo de carga usado para todos los experimentos se exhibe en la Tabla 5.2, se utilizaron seis niveles de carga para evaluar el comportamiento de la probeta durante el ciclo de carga y descarga. En base a la ecuación descrita en (4.2), podemos obtener los niveles de carga asociadas a las lecturas del registrador de datos.

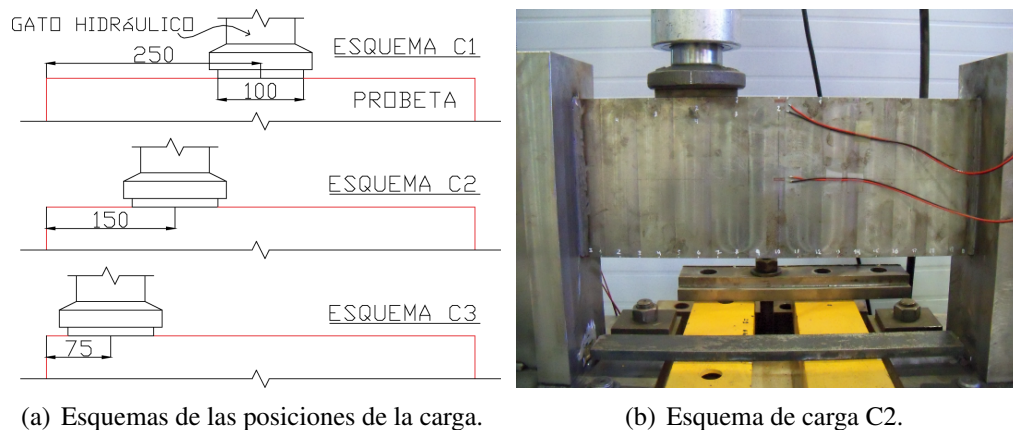


FIGURA 5.5. Posiciones de la carga, unidades en mm .

TABLA 5.2. Niveles de carga para análisis tipo A de mediciones.

Nivel i-ésimo de carga	Magnitud [kN]	Lectura celda [μ]
1	0	15
2	20	-185
3	40	-385
4	60	-585
5	80	-785
6	100	-985

5.2.3. Posiciones del transductor de desplazamiento

Las mediciones de desplazamiento vertical se clasificaron en un grupo de 19 puntos, los que se definieron como el conjunto $P_i = \{(x_i, 0) \in \partial\Omega : x_i = i \times 25 \text{ mm}, i = 1, 2, \dots, 19\}$, y dependiendo de la prueba de detección de defectos, un subconjunto de este grupo de puntos fue seleccionado para ser medido. La Fig. 5.6a exhibe el conjunto de puntos en relación a la probeta; como se observa, sólo se midió en la arista horizontal inferior.

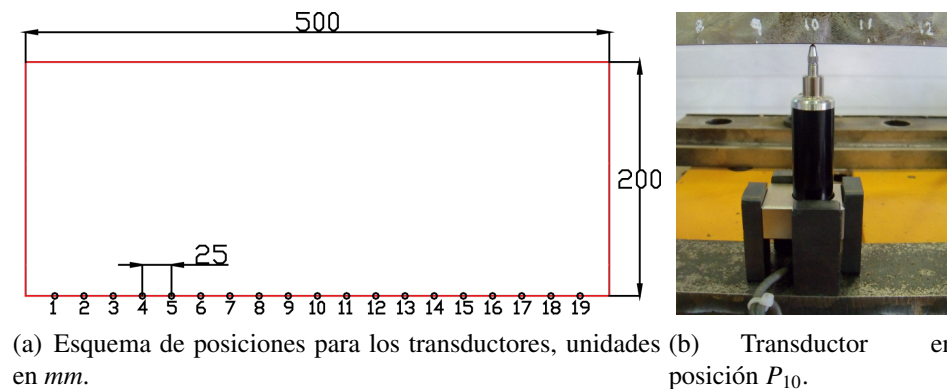


FIGURA 5.6. Detalle de las posiciones del transductor.

El transductor se posicionó en un soporte rígido para evitar el comportamiento no-lineal y la histéresis de este instrumento producido por el efecto de la flexibilidad de los soportes magnéticos (estos soportes son los que comúnmente se ocupan en estos casos) y por los acomodos del transductor durante la aplicación de la carga. El soporte para los

transductores se muestra en la Fig. 5.1 y Fig. 5.6b, tiene una base rígida apernada al suelo y utiliza imanes cerámicos para darle al instrumento estabilidad lateral.

5.2.4. Desplazamientos en la interacción acero-hormigón

Es necesario evaluar los desplazamientos que se producen en las placas base de apoyo, particularmente el desplazamiento vertical, esto debido a las condiciones irregulares y la deformación elástica que se produce en la base de hormigón armado utilizada para apoyar la estructura de acero. Este desplazamiento no está considerado en los modelos computacionales y su magnitud no puede ser despreciada.

En la Fig. 5.7 es posible observar la configuración típica para realizar la medición, el transductor mide el desplazamiento relativo entre el sistema inercial de mediciones y la placa horizontal del apoyo de la probeta (placa base de apoyo).

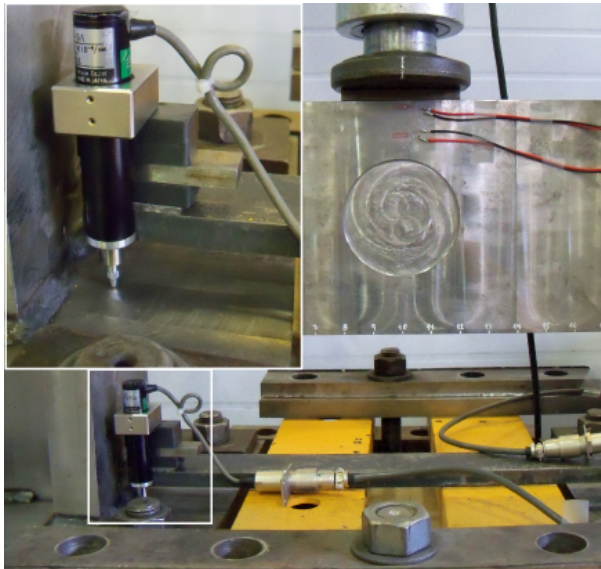


FIGURA 5.7. Esquema de medición del desplazamiento del apoyo de las probetas.

En la Fig. 5.8 se presenta la ubicación en planta de los puntos en los que se realizaron las mediciones, una en la placa base izquierda y otra en la de la derecha.

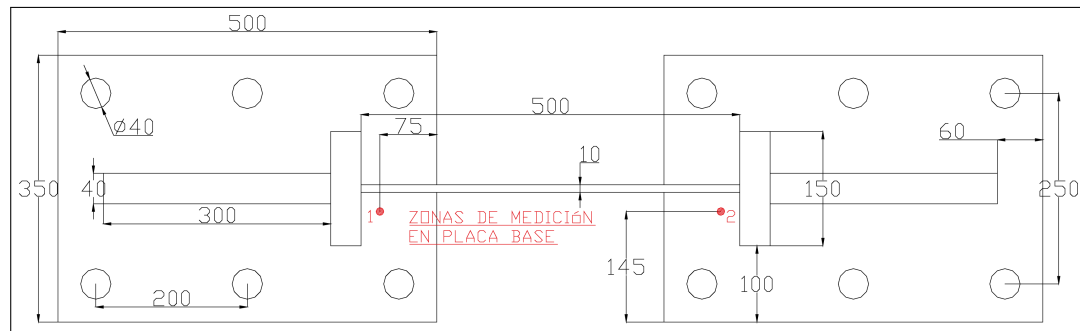


FIGURA 5.8. Esquema en planta de medición de desplazamientos en las placas base, unidades en *mm*.

Luego de obtener estos desplazamientos en ambas placas base, se realizó una regresión lineal para obtener los desplazamientos en la probeta. Cabe notar que esta es una aproximación pues se considera que el apoyo se desplaza verticalmente como un cuerpo rígido.

5.3. Programa de experimentación

5.3.1. Descripción de las probetas

Un total de 4 probetas se utilizaron para estudiar el comportamiento del método de detección en aplicaciones reales. Todas las probetas consideran una placa de acero con un largo de 500 mm, 200 mm de altura y un espesor de 10 mm.

La probeta P1 se utilizó para validar el modelo computacional en ANSYS (3D) y Freefem++ (2D), la probeta P2 se utilizó para evaluar el desempeño del método de detección en un experimento sencillo con un gran defecto, la probeta P3 para evaluar la capacidad del método para detectar un defecto excéntrico de tamaño medio y la probeta P4 para evaluar el desempeño con un defecto pequeño.

La geometría del defecto consiste en una reducción circular del espesor de 3 mm en cada lado de la placa, lo que significa un $\eta = -0.6$. La geometría completa del defecto para cada probeta se describe esquemáticamente en la Fig. 5.9.

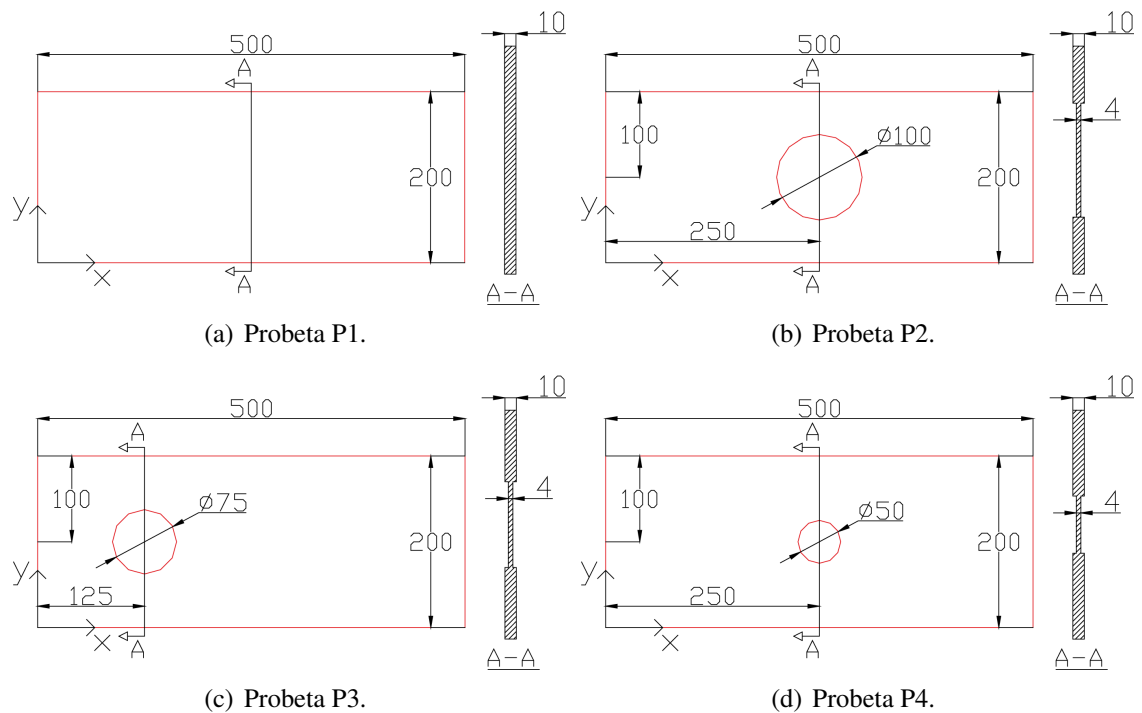


FIGURA 5.9. Descripción de las probetas, unidades en mm.

5.3.2. Descripción de los experimentos de mediciones de desplazamientos

En la Tabla 5.3 se muestran los puntos donde se realizaron las mediciones, para cada probeta y esquema de carga.

TABLA 5.3. Puntos medidos para cada experimento de mediciones de desplazamientos.

Esp.	Carga	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}
P1	C1				✓		✓		✓		✓		✓		✓					
	C2		✓		✓		✓		✓		✓		✓							
P2	C1				✓		✓		✓		✓		✓		✓					
	C2		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓			
P3	C1	✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	
	C2	✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	
	C3	✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	
P4	C1		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓			
	C2		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓			

5.3.2.1. Evaluación de la fiabilidad de las mediciones

Para evaluar las mediciones se considera el cálculo de las desviaciones estándar asociadas a cada realización experimental para las cantidades medidas directamente. Estos valores fueron rotulados como s_{dir} y se calcula a partir de la raíz del valor que se obtiene de la ecuación (4.9). Para las mediciones indirectas, que son el cálculo final de los desplazamientos utilizados en el método de detección de defectos, considera su cálculo según la ecuación (4.16), y es llamada s_{ind} .

Además, se incorpora la desviación estándar asociada a todas las realizaciones experimentales para un punto de medición en particular, este es el P_{10} , con el objetivo de evaluar el efecto de la instalación del gato hidráulico, que como muestran los resultados de los desplazamientos verticales, interviene de manera importante en la dispersión de éstos. Esta desviación estándar se calcula con la ecuación (4.9), y es llamada s_r .

5.4. Experimentos en la probeta P1

5.4.1. Resultados para la posición de carga C1

En la Fig. 5.10 y en la Tabla 5.4 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P1 para las 10 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C1. En términos cualitativos, observamos que para cada realización hay una dispersión relativamente pequeña, pero al compararse con la variabilidad entre cada realización, advertimos una banda de resultados mucho mayor. Al evaluar las curvas es posible atribuir esta dispersión a influencias de tipo sistemáticas, pues cada una de ellas se encuentra desplazada con respecto a las otras.

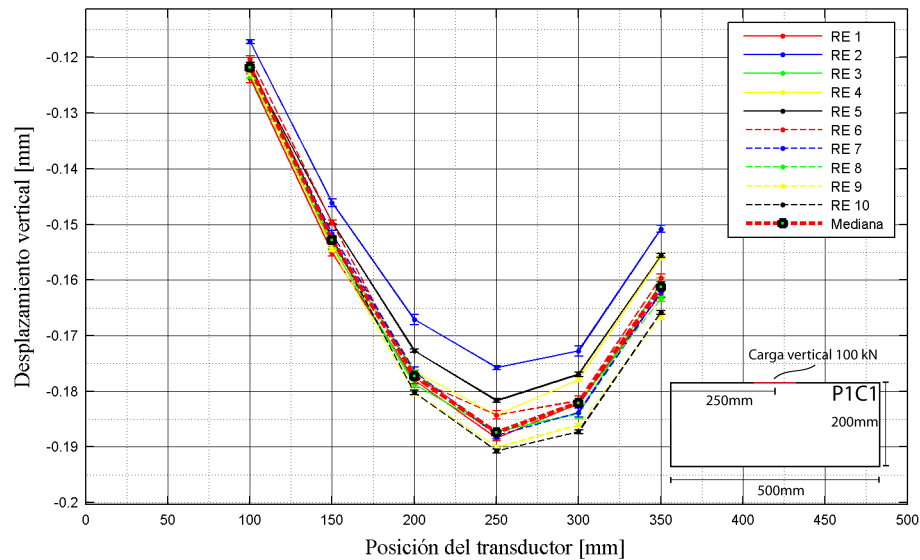


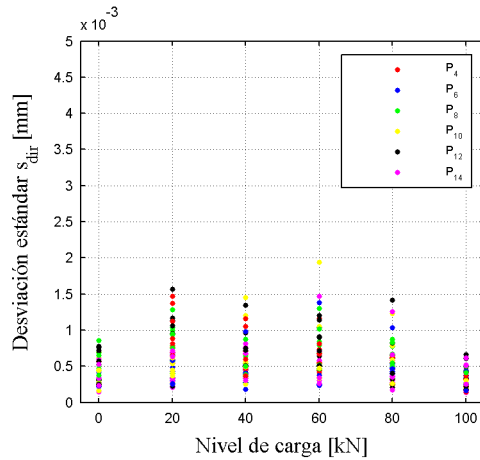
FIGURA 5.10. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P1C1. RE: Realización experimental.

En la Fig. 5.11a se presenta la desviación estándar s_{dir} de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios. Esto se debe a las características de los instrumentos de medición utilizados, como se explicó en la sección 4.1.2.1 y 4.1.2.2, la no-linealidad y la histéresis introducen variabilidad a las mediciones cuando se utilizan los datos de la curva de carga y descarga. De la

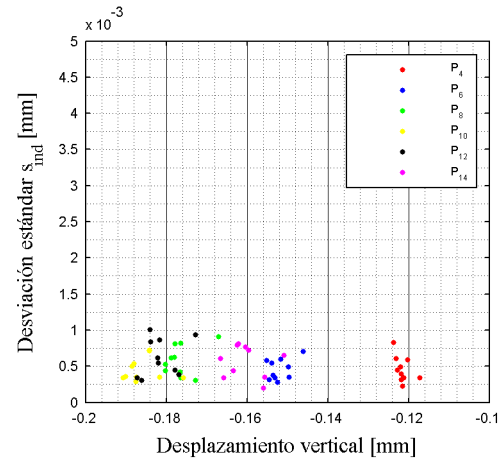
Fig. 5.11a es posible extraer que para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.002 mm .

TABLA 5.4. Valores de los desplazamientos para el experimento P1C1 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en mm .

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	RE 6	RE 7	RE 8	RE 9	RE 10	Mediana
4	100	-0.124	-0.117	-0.123	-0.122	-0.122	-0.120	-0.122	-0.121	-0.123	-0.121	-0.122
6	150	-0.155	-0.146	-0.154	-0.154	-0.150	-0.150	-0.152	-0.153	-0.155	-0.152	-0.153
8	200	-0.178	-0.167	-0.179	-0.176	-0.173	-0.178	-0.176	-0.177	-0.180	-0.180	-0.177
10	250	-0.188	-0.176	-0.187	-0.184	-0.182	-0.184	-0.188	-0.188	-0.190	-0.191	-0.187
12	300	-0.182	-0.173	-0.184	-0.178	-0.177	-0.182	-0.184	-0.182	-0.186	-0.187	-0.182
14	350	-0.162	-0.151	-0.160	-0.156	-0.156	-0.160	-0.162	-0.163	-0.167	-0.166	-0.161



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado.



(b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 kN .

FIGURA 5.11. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P1C1.

La Fig. 5.11b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 kN ; según lo que se observa la dispersión es constante y no depende de la magnitud del desplazamiento calculado. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.001 mm .

Con respecto al comportamiento global incluyendo todas las realizaciones experimentales y, para el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.0044 mm , que es un 340% mayor a la desviación estándar s_{ind} máxima (0.001 mm) asociada a todas las realizaciones experimentales.

En la Tabla 5.5 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que a pesar de la simetría del experimento, esto es, una placa sin defectos y cargada de manera simétrica, el resultado para la placa derecha (coordenada de medición de 500 mm) es un 20% mayor a la placa izquierda.

En la Tabla 5.6 se exhibe el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P1 evaluada bajo el esquema de carga C1; se exponen los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos. Estas mediciones presentan diferencias en puntos que deberían ser iguales o muy parecidos producto de la simetría; por ejemplo, para el caso de los valores medidos en la probeta, los desplazamientos para los puntos de medición P_{12} y P_{14} son mayores a los puntos P_6 y P_8 respectivamente, en términos de diferencias absolutas tenemos valores de 0.005 mm y 0.008 mm . La falta de simetría de los desplazamientos de las placas base concuerda con los resultados en las mediciones para la probeta; pues, si evaluamos los resultados luego de restar los desplazamientos de las placas base, estos valores se reducen a 0.003 mm y 0.006 mm .

TABLA 5.5. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P1C1, unidades en mm .

Coordenada de medición	Desplazamiento de la base
0	-0.0401
500	-0.0482

TABLA 5.6. Resumen de los desplazamientos para el experimento P1C1, unidades en *mm*.

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
4	100	-0.0417	-0.122	-0.080
6	150	-0.0425	-0.153	-0.110
8	200	-0.0433	-0.177	-0.134
10	250	-0.0441	-0.187	-0.143
12	300	-0.0450	-0.182	-0.137
14	350	-0.0458	-0.161	-0.116

5.4.2. Resultados para la posición de carga C2

En la Fig. 5.12 y en la Tabla 5.7 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P1 para las 10 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C2. En términos cualitativos y al igual que lo observado en el experimento P1C1, cada realización exhibe una dispersión relativamente pequeña, pero al compararse con la variabilidad entre cada realización, ésta resulta ser mucho mayor.

La Fig. 5.13a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado, a partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios, al igual que en el caso P1C1. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.002 *mm*.

La Fig. 5.13b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 *kN*, de esta figura es posible extraer que para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.002 *mm*. Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.0044 *mm*, que es un 120% mayor que la desviación s_{ind} máxima (0.002 *mm*) asociada a todas las realizaciones experimentales.

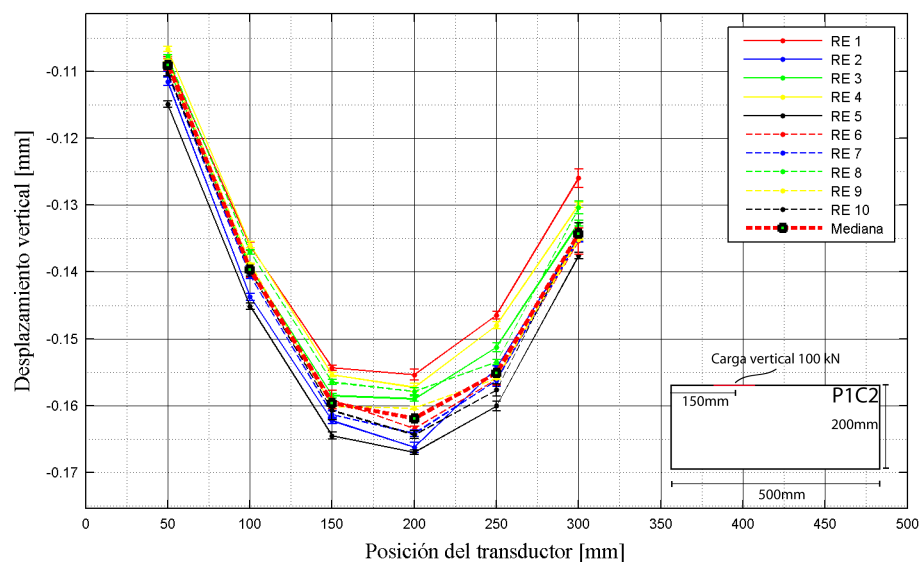


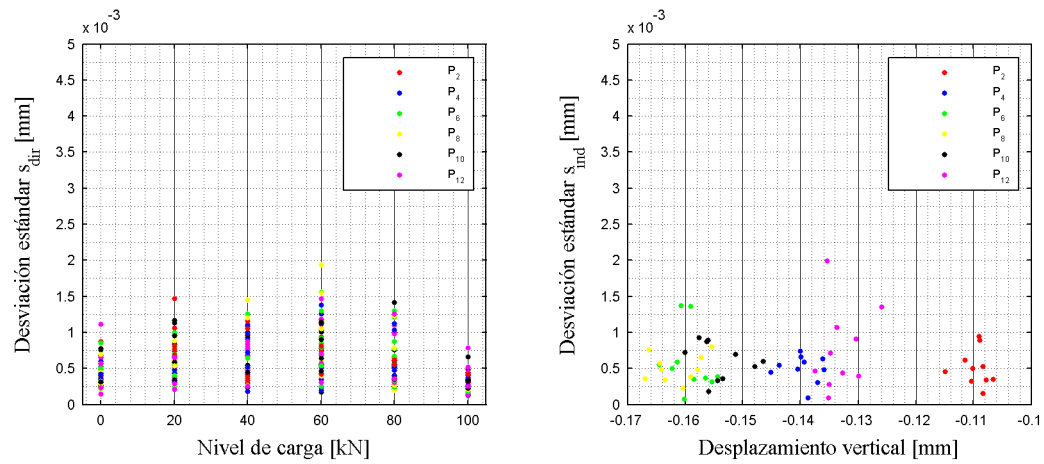
FIGURA 5.12. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P1C2. RE: Realización experimental.

TABLA 5.7. Valores de los desplazamientos para el experimento P1C2 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en *mm*.

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	RE 6	RE 7	RE 8	RE 9	RE 10	Mediana
2	50	-0.108	-0.112	-0.109	-0.107	-0.115	-0.109	-0.110	-0.108	-0.108	-0.110	-0.109
4	100	-0.136	-0.144	-0.139	-0.136	-0.145	-0.140	-0.141	-0.137	-0.139	-0.140	-0.140
6	150	-0.154	-0.162	-0.159	-0.155	-0.165	-0.159	-0.161	-0.156	-0.160	-0.161	-0.160
8	200	-0.155	-0.166	-0.159	-0.157	-0.167	-0.163	-0.164	-0.158	-0.160	-0.164	-0.162
10	250	-0.146	-0.154	-0.151	-0.148	-0.160	-0.156	-0.156	-0.153	-0.156	-0.158	-0.155
12	300	-0.126	-0.135	-0.133	-0.130	-0.138	-0.135	-0.135	-0.130	-0.135	-0.134	-0.134

En la Tabla 5.8 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que el valor para la placa izquierda (coordenada de medición de 0 *mm*) es mayor a la placa derecha, lo que resulta esperable pues el esquema de carga C2 está posicionado hacia el lado izquierdo.

En la Tabla 5.9 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P1 evaluada bajo el esquema de carga C2. Observamos los resultados de la regresión



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado.

(b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 kN.

FIGURA 5.13. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P1C2.

lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

TABLA 5.8. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P1C2, unidades en *mm*.

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0547
500	-0.0259

TABLA 5.9. Resumen de los desplazamientos para el experimento P1C2, unidades en *mm*.

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
2	50	-0.0518	-0.109	-0.057
4	100	-0.0490	-0.140	-0.091
6	150	-0.0461	-0.160	-0.114
8	200	-0.0432	-0.162	-0.119
10	250	-0.0403	-0.155	-0.115
12	300	-0.0374	-0.134	-0.097

5.5. Experimentos en la probeta P2

5.5.1. Resultados para la posición de carga C1

En la Fig. 5.14 y en la Tabla 5.10 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P2 para las 5 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C1. En términos cualitativos, observamos que para cada realización hay una dispersión pequeña y al contrario de lo observado en los experimentos en la probeta P1, para los cuales existe una alta variabilidad entre cada realización, en este caso la variabilidad es mucho menor y en general no se observa una banda de resultados.

La Fig. 5.15a presenta la dispersión de las mediciones s_{dir} para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios, como se ha observado y explicado en los experimentos realizados en la probeta P1. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.0021 *mm*.

La Fig. 5.15b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 *kN*. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.00125 *mm*. Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada

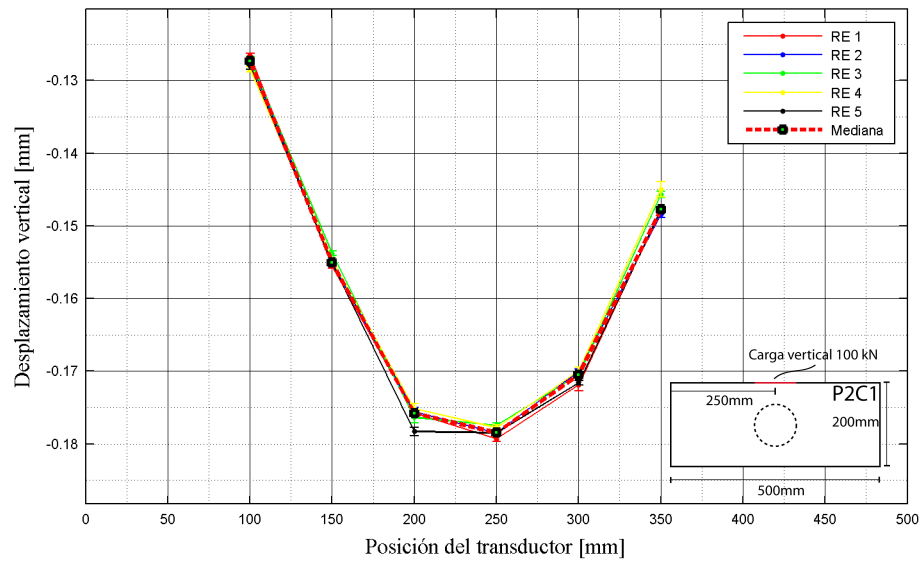


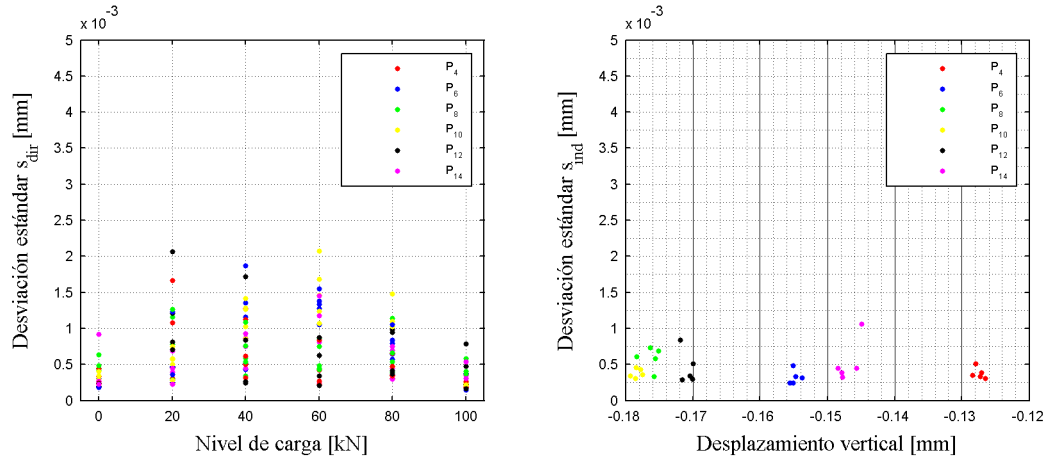
FIGURA 5.14. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P2C1. RE: Realización experimental.

a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.00084 mm , que es un 33% menor a la desviación estándar s_{ind} máxima (0.00125 mm) asociada a todas las realizaciones experimentales.

TABLA 5.10. Valores de los desplazamientos para el experimento P2C1 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en mm .

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	Mediana
4	100	-0.127	-0.127	-0.127	-0.128	-0.128	-0.127
6	150	-0.156	-0.155	-0.154	-0.155	-0.155	-0.155
8	200	-0.176	-0.176	-0.176	-0.175	-0.178	-0.176
10	250	-0.179	-0.179	-0.177	-0.178	-0.178	-0.178
12	300	-0.172	-0.170	-0.170	-0.170	-0.172	-0.170
14	350	-0.148	-0.148	-0.146	-0.145	-0.148	-0.148

En la Tabla 5.11 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que debido a la simetría del experimento, esto es, una placa con un defecto al centro del vano y cargada de manera simétrica, el resultado para la placa derecha



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado. (b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 kN.

FIGURA 5.15. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P2C1.

(500 mm) es similar al de la placa izquierda, lo que no se observa en el experimento P1C1, que también es simétrico. En este caso, el desplazamiento de la placa izquierda es un 2.5% menor que el de la placa derecha.

En la Tabla 5.12 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P2 evaluada bajo el esquema de carga C1. Observamos los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

La simetría de los desplazamientos de las placas base, como se aprecia en la Tabla 5.11, mantiene los resultados en las mediciones de los desplazamientos en la probeta. Para el caso de los valores medidos en la probeta, los desplazamientos para los puntos de medición P_{12} y P_{14} son menores a los puntos P_8 y P_6 respectivamente; en términos de diferencias absolutas tenemos 0.006 mm y 0.008 mm. Si evaluamos los resultados luego de restar los desplazamientos de las placas base estos valores son 0.005 mm y 0.008 mm. Se espera por la simetría del experimento que las diferencias entre estos puntos sean pequeñas, lo que en este caso no ocurre.

TABLA 5.11. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P2C1, unidades en mm .

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0391
500	-0.0401

TABLA 5.12. Resumen de los desplazamientos para el experimento P2C1, unidades en mm .

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
4	100	-0.0393	-0.127	-0.088
6	150	-0.0394	-0.155	-0.116
8	200	-0.0395	-0.176	-0.136
10	250	-0.0396	-0.178	-0.139
12	300	-0.0397	-0.170	-0.131
14	350	-0.0398	-0.148	-0.108

5.5.2. Resultados para la posición de carga C2

En la Fig. 5.16 y en la Tabla 5.13 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P2 para las 5 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C2. En términos cualitativos y al igual que lo observado en el experimento anterior (P2C1), cada realización exhibe una dispersión relativamente pequeña, al igual que la variabilidad entre cada realización. Particularmente, los puntos P_{14} (350 mm) y P_{16} (400 mm) presentan una variabilidad entre cada realización mucho menor al resto de los puntos medidos.

La Fig. 5.17a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.002 mm .

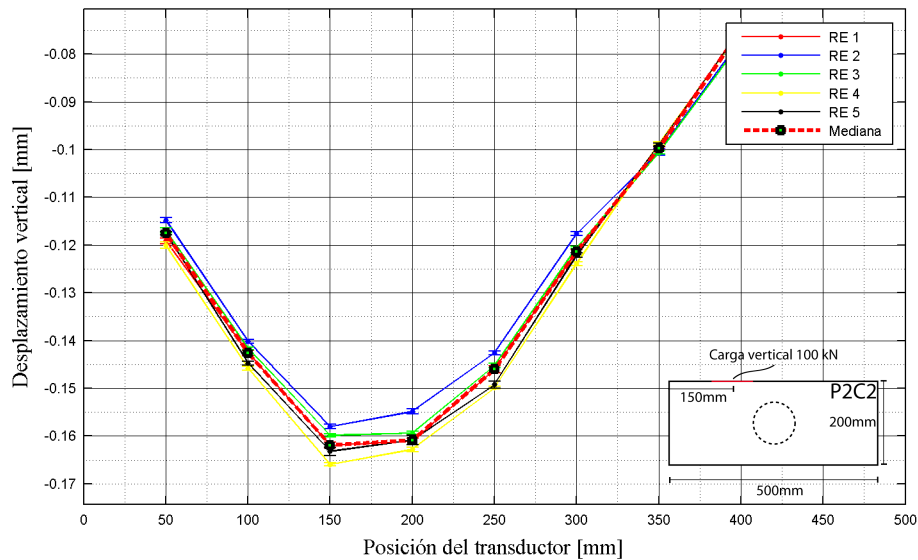


FIGURA 5.16. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P2C2. RE: Realización experimental.

La Fig. 5.17b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 kN , según lo que se observa la dispersión es en general constante. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.001 mm . Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.0029 mm , que es un 190% mayor a la desviación estándar s_{ind} máxima (0.001 mm) asociada a todas las realizaciones experimentales.

En la Tabla 5.14 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que el valor para la placa izquierda (0 mm) es mayor a la placa derecha, lo que resulta apropiado pues el esquema de carga C2 está posicionado excéntricamente hacia el lado izquierdo.

En la Tabla 5.15 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P2 evaluada bajo el esquema de carga C2. Observamos los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

TABLA 5.13. Valores de los desplazamientos para el experimento P2C2 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en *mm*.

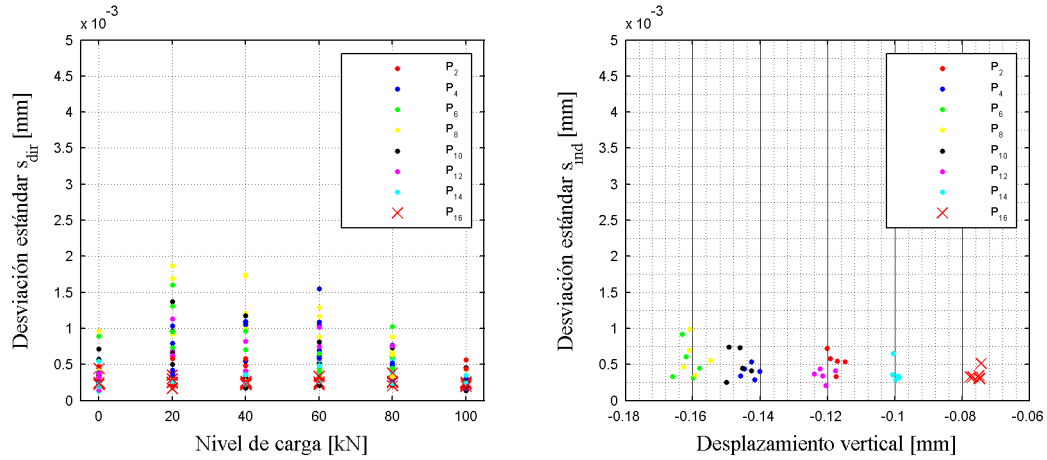
Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	Mediana
2	50	-0.119	-0.115	-0.117	-0.120	-0.117	-0.117
4	100	-0.143	-0.140	-0.142	-0.146	-0.145	-0.143
6	150	-0.162	-0.158	-0.160	-0.166	-0.163	-0.162
8	200	-0.161	-0.155	-0.159	-0.163	-0.161	-0.161
10	250	-0.146	-0.143	-0.145	-0.150	-0.149	-0.146
12	300	-0.121	-0.118	-0.121	-0.124	-0.122	-0.121
14	350	-0.100	-0.101	-0.101	-0.099	-0.099	-0.100
16	400	-0.074	-0.077	-0.078	-0.075	-0.075	-0.075

TABLA 5.14. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P2C2, unidades en *mm*.

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0565
500	-0.0210

TABLA 5.15. Resumen de los desplazamientos para el experimento P2C2, unidades en *mm*.

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
2	50	-0.0529	-0.117	-0.065
4	100	-0.0494	-0.143	-0.093
6	150	-0.0458	-0.162	-0.116
8	200	-0.0423	-0.161	-0.119
10	250	-0.0387	-0.146	-0.107
12	300	-0.0352	-0.121	-0.086
14	350	-0.0317	-0.100	-0.068
16	400	-0.0281	-0.075	-0.047



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado. (b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 kN.

FIGURA 5.17. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P2C2.

5.6. Experimentos en la probeta P3

5.6.1. Resultados para la posición de carga C1

En la Fig. 5.18 y en la Tabla 5.16 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P3 para las 5 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C1. En términos cualitativos, observamos que para cada realización hay una dispersión pequeña. Para este caso, la realización experimental número 4 está alejada de las restantes, lo que podría ser denominada como una realización atípica.

La Fig. 5.19a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios, como se ha observado y explicado en los experimentos realizados en las probetas P1 y P2. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor o igual a 0.005 mm.

La Fig. 5.19b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga 100 kN, según lo que se observa la dispersión es en general constante. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.002 mm. Si analizamos el caso particular del

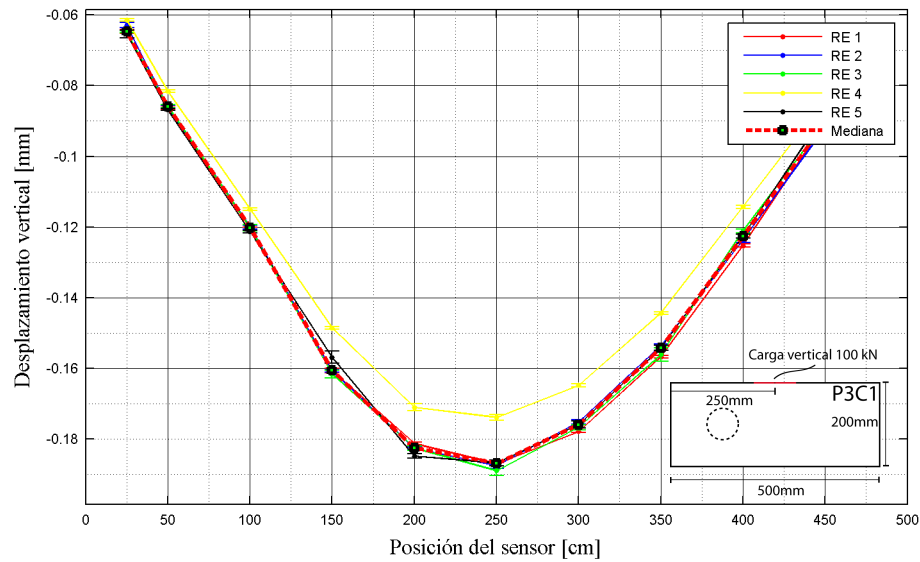


FIGURA 5.18. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P3C1. RE: Realización experimental.

punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.0062 mm , que es un 210% mayor a la desviación s_{ind} máxima (0.002 mm) asociada a todas las realizaciones experimentales. El valor de s_r para el punto de medición P_{10} está influenciado por la realización atípica, es por esta razón que es un valor alto en comparación a s_{ind} .

En la Tabla 5.17 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que debido al defecto excéntrico en esta probeta el resultado para la placa derecha (500 mm) es un 8% mayor al de la placa izquierda, lo que muestra que el defecto genera una asimetría en los resultados, a pesar de que el esquema de carga es simétrico.

En la Tabla 5.18 se exhibe el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P3 evaluada bajo el esquema de carga C1, se exponen los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

TABLA 5.16. Valores de los desplazamientos para el experimento P3C1 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en *mm*.

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	Mediana
1	25	-0.065	-0.063	-0.065	-0.061	-0.065	-0.065
2	50	-0.086	-0.086	-0.086	-0.082	-0.087	-0.086
4	100	-0.120	-0.120	-0.120	-0.115	-0.121	-0.120
6	150	-0.161	-0.161	-0.162	-0.149	-0.157	-0.161
8	200	-0.181	-0.183	-0.183	-0.171	-0.185	-0.183
10	250	-0.187	-0.188	-0.189	-0.174	-0.187	-0.187
12	300	-0.178	-0.175	-0.177	-0.165	-0.176	-0.176
14	350	-0.157	-0.154	-0.156	-0.144	-0.154	-0.154
16	400	-0.125	-0.124	-0.121	-0.114	-0.123	-0.123
18	450	-0.090	-0.092	-0.090	-0.084	-0.088	-0.090

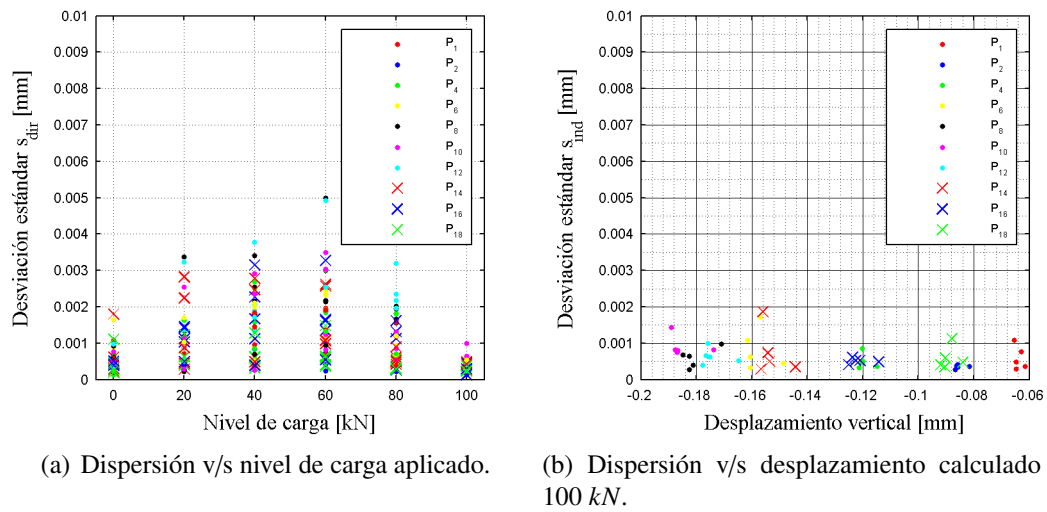


FIGURA 5.19. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P3C1.

5.6.2. Resultados para la posición de carga C2

En la Fig. 5.20 y en la Tabla 5.19 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P3 para las 3 realizaciones experimentales sujeto al esquema de

TABLA 5.17. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P3C1, unidades en mm .

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0342
500	-0.0369

TABLA 5.18. Resumen de los desplazamientos para el experimento P3C1, unidades en mm .

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
1	25	-0.0344	-0.065	-0.030
2	50	-0.0345	-0.086	-0.051
4	100	-0.0348	-0.120	-0.085
6	150	-0.0350	-0.161	-0.126
8	200	-0.0353	-0.183	-0.147
10	250	-0.0356	-0.187	-0.151
12	300	-0.0359	-0.176	-0.140
14	350	-0.0361	-0.154	-0.118
16	400	-0.0364	-0.123	-0.086
18	450	-0.0367	-0.090	-0.054

carga C2. En términos cualitativos, cada realización exhibe una dispersión relativamente pequeña, al igual que la variabilidad entre cada realización.

La Fig. 5.21a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado, a partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.003 mm .

La Fig. 5.21b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 kN . Según lo

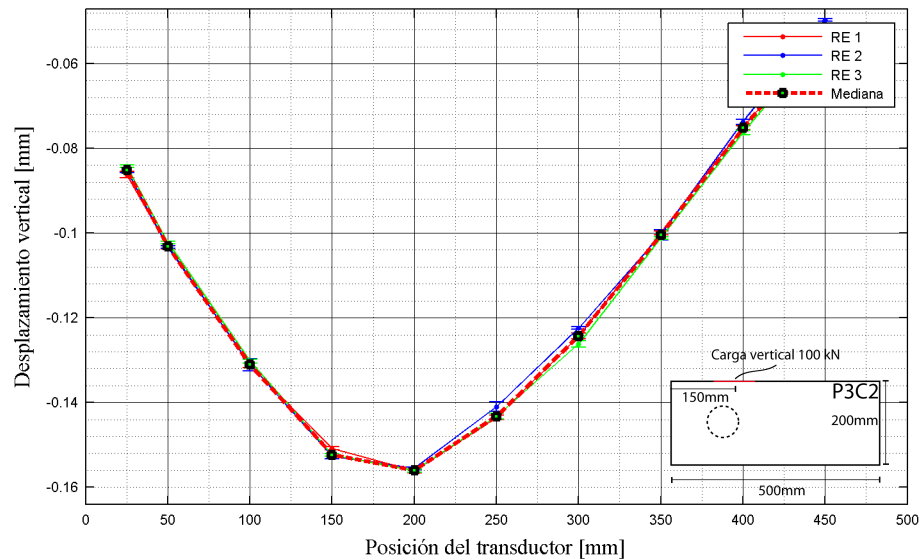


FIGURA 5.20. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P3C2. RE: Realización experimental.

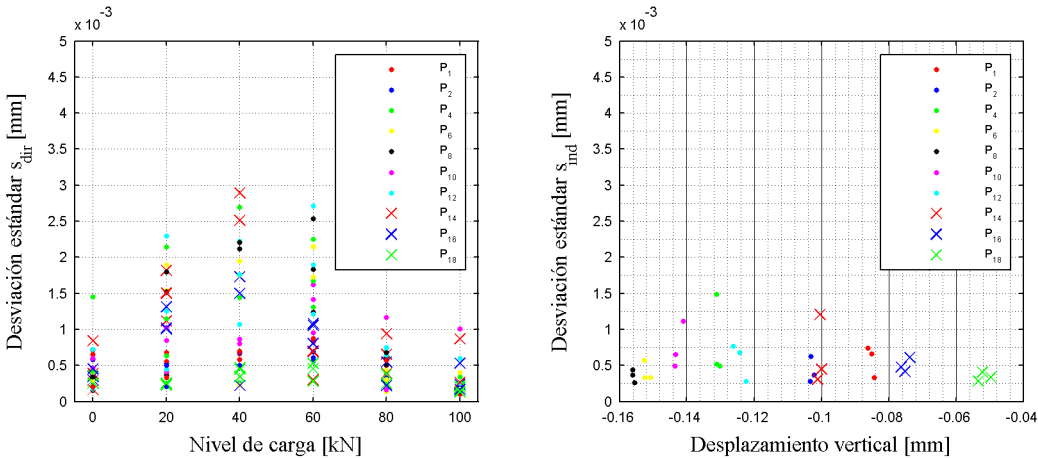
que se observa, la dispersión es en general constante, lo que se ha observado en todos los experimentos. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor a 0.0015 mm . Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.0015 mm , que es igual a la desviación s_{ind} máxima asociada a todas las realizaciones experimentales.

En la Tabla 5.20 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que el valor para la placa izquierda (0 mm) es mayor a la placa derecha, lo que resulta esperado para el esquema de carga C2.

En la Tabla 5.21 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P3 evaluada bajo el esquema de carga C2. Observamos los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

TABLA 5.19. Valores de los desplazamientos para el experimento P3C2 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en *mm*.

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	Mediana
1	25	-0.086	-0.085	-0.084	-0.085
2	50	-0.103	-0.103	-0.102	-0.103
4	100	-0.131	-0.131	-0.130	-0.131
6	150	-0.151	-0.153	-0.152	-0.152
8	200	-0.156	-0.156	-0.156	-0.156
10	250	-0.144	-0.141	-0.143	-0.143
12	300	-0.124	-0.122	-0.126	-0.124
14	350	-0.100	-0.100	-0.101	-0.100
16	400	-0.075	-0.074	-0.076	-0.075
18	450	-0.052	-0.050	-0.053	-0.052



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado. (b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 *kN*.

FIGURA 5.21. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P3C2.

5.6.3. Resultados para la posición de carga C3

En la Fig. 5.22 y en la Tabla 5.22 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P3 para las 3 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C3. En términos cualitativos y al igual que lo observado en el experimento P3C2, cada

TABLA 5.20. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P3C2, unidades en mm .

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0521
500	-0.0124

TABLA 5.21. Resumen de los desplazamientos para el experimento P3C2, unidades en mm .

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
1	25	-0.0501	-0.085	-0.035
2	50	-0.0481	-0.103	-0.055
4	100	-0.0441	-0.131	-0.087
6	150	-0.0402	-0.152	-0.112
8	200	-0.0362	-0.156	-0.120
10	250	-0.0322	-0.143	-0.111
12	300	-0.0282	-0.124	-0.096
14	350	-0.0243	-0.100	-0.076
16	400	-0.0203	-0.075	-0.055
18	450	-0.0163	-0.052	-0.036

realización exhibe una dispersión relativamente pequeña al igual que la variabilidad entre cada realización. Particularmente, el punto P_{14} (350 mm) presenta una variabilidad entre cada realización mayor.

La Fig. 5.23a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto inicial y final son menores a los valores en niveles de carga intermedios. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.0025 mm .

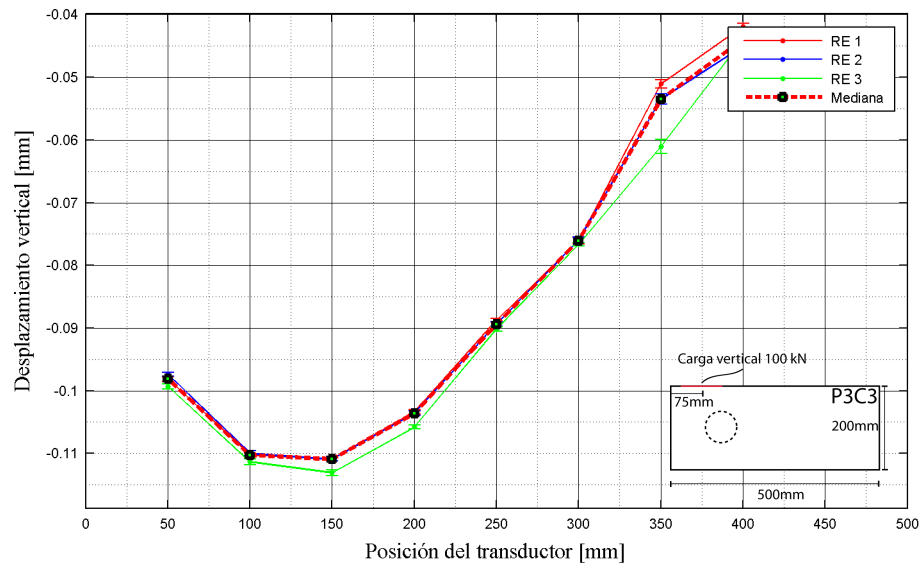


FIGURA 5.22. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P3C3. RE: Realización experimental.

La Fig. 5.23b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 kN . Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.00125 mm . Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.00058 mm , que es un 54% menor a la desviación s_{ind} máxima asociada a todas las realizaciones experimentales.

En la Tabla 5.23 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que el valor para la placa izquierda (0 mm) es mayor a la placa derecha, lo que resulta apropiado pues el esquema de carga C3 está posicionado excéntricamente hacia el lado izquierdo.

En la Tabla 5.24 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P3 evaluada bajo el esquema de carga C3. Observamos los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

TABLA 5.22. Valores de los desplazamientos para el experimento P3C3 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en *mm*.

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	Mediana
2	50	-0.098	-0.097	-0.099	-0.098
4	100	-0.110	-0.110	-0.111	-0.110
6	150	-0.111	-0.111	-0.113	-0.111
8	200	-0.103	-0.104	-0.106	-0.104
10	250	-0.089	-0.089	-0.090	-0.089
12	300	-0.076	-0.076	-0.077	-0.076
14	350	-0.051	-0.053	-0.061	-0.053
16	400	-0.042	-0.045	-0.044	-0.044

TABLA 5.23. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P3C3, unidades en *mm*.

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0590
500	-0.0128

TABLA 5.24. Resumen de los desplazamientos para el experimento P3C3, unidades en *mm*.

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
2	50	-0.0544	-0.098	-0.044
4	100	-0.0498	-0.110	-0.060
6	150	-0.0452	-0.111	-0.066
8	200	-0.0405	-0.104	-0.063
10	250	-0.0359	-0.089	-0.053
12	300	-0.0313	-0.076	-0.045
14	350	-0.0267	-0.053	-0.027
16	400	-0.0220	-0.044	-0.022

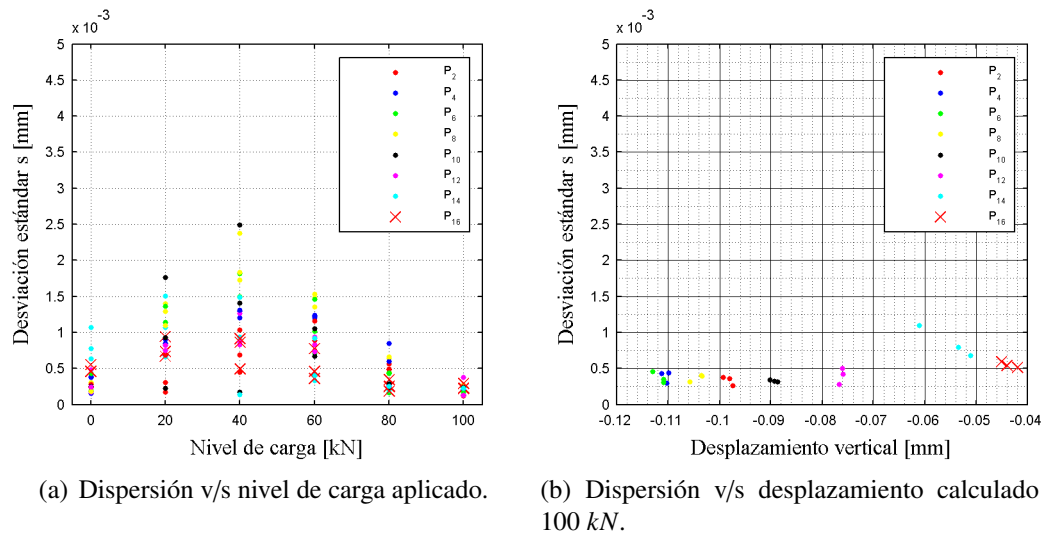


FIGURA 5.23. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P3C3.

5.7. Experimentos en la probeta P4

5.7.1. Resultados para la posición de carga C1

En la Fig. 5.24 y en la Tabla 5.25 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P4 para las 5 realizaciones experimentales sujeto al esquema de carga C1. En términos cualitativos, observamos que para cada realización hay una dispersión pequeña. Para este caso, la realización experimental número 1 está alejada de las restantes, lo que podría ser denominada como una realización atípica.

La Fig. 5.25a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto final es menor a los valores en los niveles de carga restantes, esto difiere de los observado en las probetas anteriores (P_1 , P_2 y P_3) donde al punto inicial también posee una dispersión pequeña muy parecida al punto final. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.0035 mm.

La Fig. 5.25b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento calculado para el nivel de carga de 100 kN. Según lo

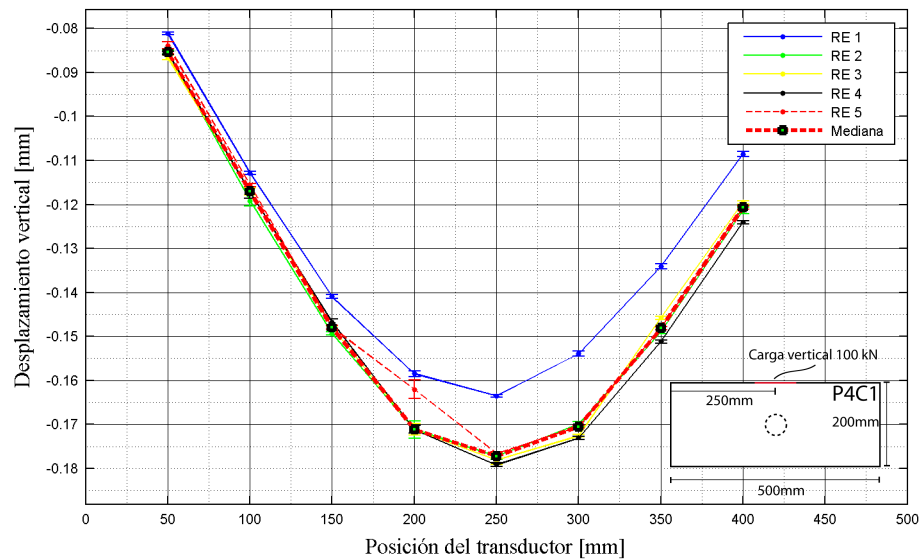


FIGURA 5.24. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P4C1. RE: Realización experimental.

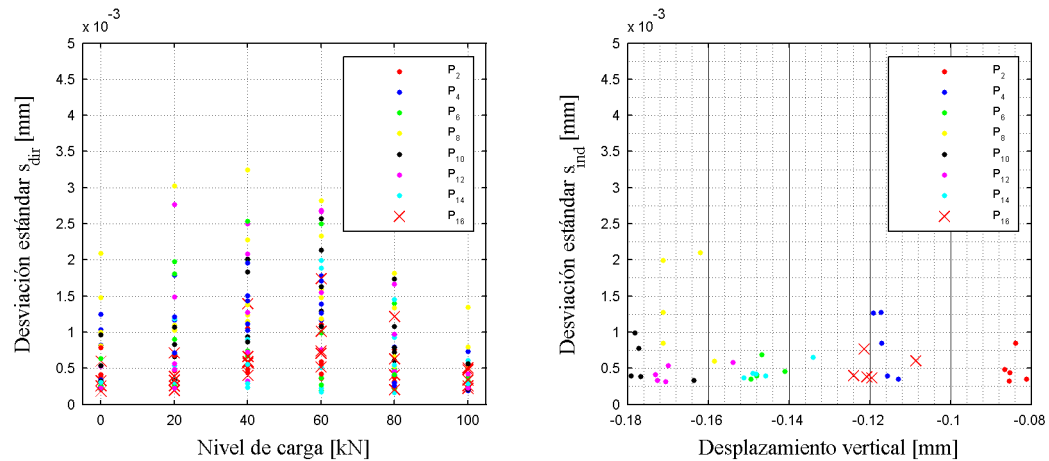
que se observa, la dispersión es en general constante. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.00225 mm . Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.0062 mm , que es un 176% mayor a la desviación s_{ind} máxima asociada a todas las realizaciones experimentales. El valor de s_r para el punto de medición P_{10} está influenciado por la realización atípica, es por esta razón que es un valor alto en comparación a s_{ind} .

En la Tabla 5.26 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que a pesar de la simetría del experimento, esto es, una placa con un defecto centrado y cargada de manera simétrica, el resultado para la placa derecha (coordenada de medición de 500 mm) es un 18% mayor a la placa izquierda.

En la Tabla 5.27 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P4 evaluada bajo el esquema de carga C1. Observamos los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos. Se espera por la

TABLA 5.25. Valores de los desplazamientos para el experimento P4C1 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en mm .

Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	Mediana
2	50	-0.081	-0.085	-0.087	-0.086	-0.084	-0.085
4	100	-0.113	-0.119	-0.117	-0.117	-0.116	-0.117
6	150	-0.141	-0.149	-0.148	-0.147	-0.148	-0.148
8	200	-0.159	-0.171	-0.171	-0.171	-0.162	-0.171
10	250	-0.164	-0.177	-0.178	-0.179	-0.177	-0.177
12	300	-0.154	-0.170	-0.173	-0.173	-0.171	-0.171
14	350	-0.134	-0.149	-0.146	-0.151	-0.148	-0.148
16	400	-0.109	-0.121	-0.120	-0.124	-0.121	-0.121



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado.

(b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 kN.

FIGURA 5.25. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P4C1.

simetría del experimento que las diferencias entre los puntos de medición P_{12} , P_{14} y P_{16} sean pequeñas a los puntos P_8 , P_6 y P_4 respectivamente, lo que en este caso se logra.

5.7.2. Resultados para la posición de carga C2

En la Fig. 5.26 y en la Tabla 5.28 se muestran los desplazamientos medidos directamente en la probeta P4 para las 5 realizaciones experimentales sujeto al esquema de

TABLA 5.26. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P4C1, unidades en *mm*.

Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0337
500	-0.0392

TABLA 5.27. Resumen de los desplazamientos para el experimento P4C1, unidades en *mm*.

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
2	50	-0.0342	-0.085	-0.051
4	100	-0.0348	-0.117	-0.082
6	150	-0.0353	-0.148	-0.113
8	200	-0.0359	-0.171	-0.135
10	250	-0.0364	-0.177	-0.141
12	300	-0.0370	-0.171	-0.134
14	350	-0.0375	-0.148	-0.111
16	400	-0.0381	-0.121	-0.083

carga C2. En términos cualitativos, cada realización exhibe una dispersión relativamente pequeña, pero al compararse con la variabilidad entre cada realización, ésta resulta ser mucho mayor.

La Fig. 5.27a presenta la dispersión de las mediciones para cada realización con respecto al nivel de carga aplicado. A partir de la figura podemos concluir que la dispersión en el punto final es menor a los valores en los niveles de carga restantes, al igual de lo observado en el experimento P4C1. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{dir} es menor a 0.00355 *mm*.

La Fig. 5.27b exhibe los resultados de la dispersión para cada realización con respecto a la magnitud del desplazamiento medido para el nivel de carga de 100 *kN*. Según lo que se

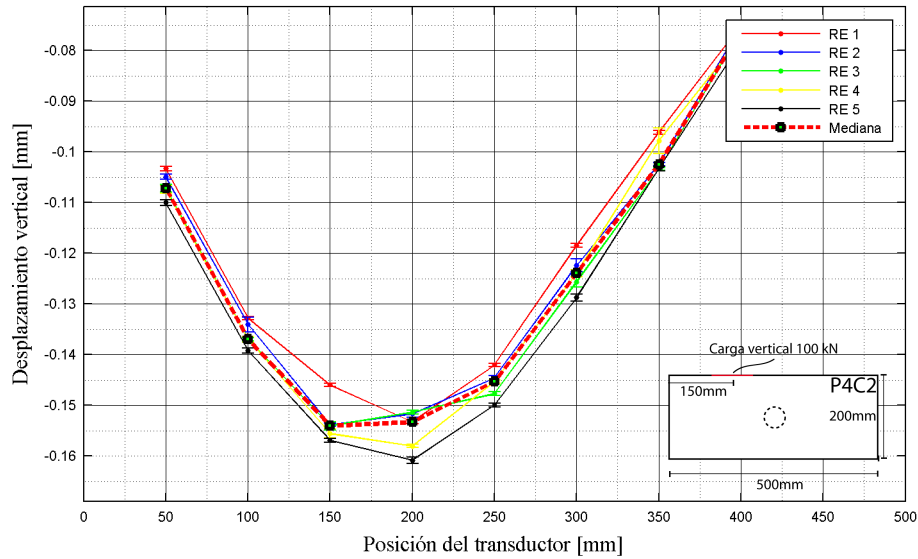


FIGURA 5.26. Gráfico de los desplazamientos para el experimento P4C2. RE: Realización experimental.

observa, la dispersión es en general constante. Para todas las realizaciones experimentales la desviación estándar s_{ind} es menor o igual a 0.0015 mm . Si analizamos el caso particular del punto de medición P_{10} , la desviación estándar s_r calculada a partir de los valores promedio para cada realización es de 0.003 mm , que es un 100% mayor a la desviación s_{ind} máxima asociada a todas las realizaciones experimentales.

En la Tabla 5.29 se presentan los resultados de los desplazamientos medidos para cada placa base. Observamos que el valor para la placa izquierda (0 mm) es mayor a la placa derecha, lo que resulta apropiado pues el esquema de carga C2 está posicionado excéntricamente hacia el lado izquierdo.

En la Tabla 5.30 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para la probeta P4 evaluada bajo el esquema de carga C2, observamos los resultados de la regresión lineal de los desplazamientos de la placa base para cada punto, el desplazamiento medido directamente en la probeta y el resultado final, que es la resta de ambos.

TABLA 5.28. Valores de los desplazamientos para el experimento P4C2 junto al valor de la mediana de los datos, unidades en *mm*.

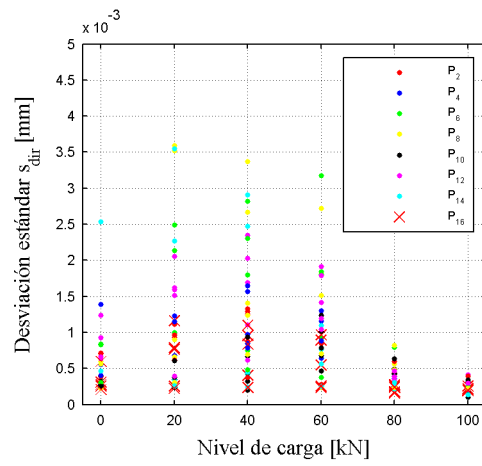
Punto P_i	x_i	RE 1	RE 2	RE 3	RE 4	RE 5	Mediana
2	50	-0.103	-0.105	-0.107	-0.107	-0.110	-0.107
4	100	-0.133	-0.134	-0.137	-0.137	-0.139	-0.137
6	150	-0.146	-0.154	-0.154	-0.156	-0.157	-0.154
8	200	-0.153	-0.152	-0.151	-0.158	-0.161	-0.153
10	250	-0.142	-0.145	-0.148	-0.145	-0.150	-0.145
12	300	-0.118	-0.122	-0.126	-0.124	-0.129	-0.124
14	350	-0.096	-0.102	-0.103	-0.098	-0.103	-0.102
16	400	-0.075	-0.075	-0.076	-0.077	-0.079	-0.076

TABLA 5.29. Valores de los desplazamientos en las placas de apoyo para el experimento P4C2, unidades en *mm*.

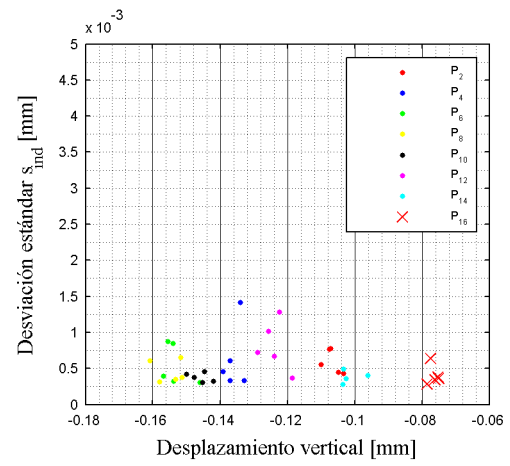
Posición de medición	Desplazamiento medido
0	-0.0488
500	-0.0251

TABLA 5.30. Resumen de los desplazamientos para el experimento P4C2, unidades en *mm*.

Punto P_i	Coordenada de medición	Desplazamiento de la base	Desplazamiento en Probeta	Desplazamiento final
2	50	-0.0464	-0.107	-0.061
4	100	-0.0440	-0.137	-0.093
6	150	-0.0416	-0.154	-0.112
8	200	-0.0393	-0.153	-0.114
10	250	-0.0369	-0.145	-0.108
12	300	-0.0345	-0.124	-0.089
14	350	-0.0322	-0.102	-0.070
16	400	-0.0298	-0.076	-0.046



(a) Dispersión v/s nivel de carga aplicado.



(b) Dispersión v/s desplazamiento calculado en 100 kN.

FIGURA 5.27. Dispersión de los resultados de las mediciones para el experimento P4C2.

6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS

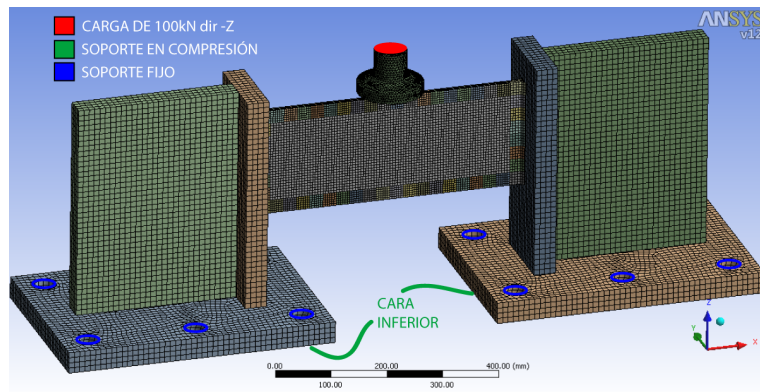
6.1. Validación del modelo computacional

En esta sección se exponen los resultados de los experimentos y de las modelaciones numéricas para la probeta P1, la probeta sin defecto. Los resultados de los modelos computacionales corresponden a los obtenidos en ANSYS (3D) y FreeFem++ (2D). Este último utiliza los desplazamientos en la frontera de apoyo obtenidos del modelo computacional en ANSYS. Los desplazamientos experimentales son corregidos debido a la deformación de la base de los apoyos, que no es considerada en el modelo 3D, como se detalla en la sección 5.2.4.

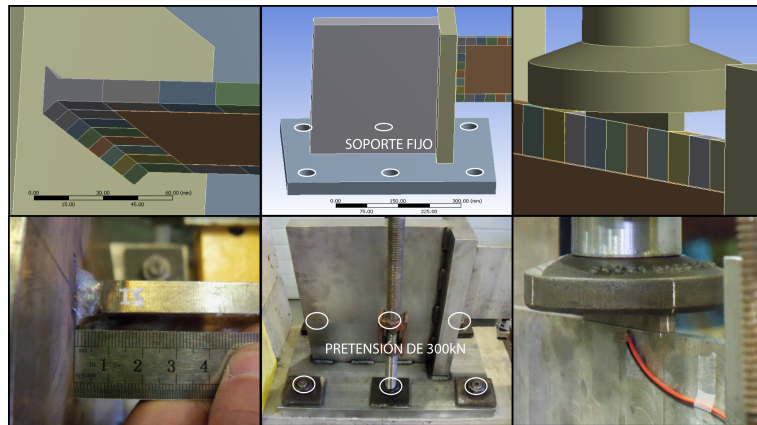
6.1.1. Detalles de la modelación 3D en ANSYS

El modelo computacional considerado corresponde a un modelo en 3D desarrollado en la plataforma ANSYS Workbench (*Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Application*, 2009), que se muestra en la Fig. 6.1a. La modelación consideró que los apoyos sólo actúan en compresión (se aplica una restricción en la dirección normal a la compresión) para simular la interacción de las placas base y la viga de hormigón armado. El efecto de la pretensión de los pernos se modeló como un soporte rígido, como se aprecia de forma esquemática en las circunferencias de color azul en la Fig. 6.1a. El pistón del gato hidráulico se representó como un cilindro y en la parte superior del mismo se aplicó la carga uniforme de $100kN$.

La Fig. 6.1b presenta algunos detalles geométricos relevantes de la estructura y otros detalles de la modelación que se incluyeron en el modelo de elementos finitos, tales como el material adicional generado en el proceso de soldadura (izquierda de la Fig. 6.1b), un detalle de la conexión apernada (centro de la Fig. 6.1b) y la disposición de la aplicación de la carga (a la derecha de la Fig. 6.1b).



(a) Vista general y detalles del mallado.



(b) Detalles de la modelación. Izquierda: soldadura, centro: conexión apornada, derecha: esquema de carga.

FIGURA 6.1. Modelo 3D de elementos finitos en ANSYS.

6.1.2. Condiciones de borde para el problema 2D en Freefem++

Las limitaciones del SAD utilizado en este estudio experimental debido a la configuración geométrica de la estructura ensayada, en el sentido de la dificultad de obtener los desplazamientos en algunas zonas de medición, obligan al desarrollo de un modelo computacional auxiliar, en nuestro caso en el programa ANSYS, con el objeto de estimar los desplazamientos en las fronteras de apoyo de la probeta P1. La necesidad surge producto de que estos desplazamientos no pueden ser despreciados y por lo tanto deben ser incorporados al método de detección.

Considerando que la probeta defectuosa puede ser representada por el problema de condiciones de contorno

$$\left. \begin{aligned} -\text{div} \mathbf{C}^r \varepsilon(\mathbf{u}^r) &= f && \text{en } \Omega, \\ \mathbf{u}^r &= \mathbf{h}_r(x, y, g) && \text{sobre } \Gamma_D, \\ \mathbf{C}^r \varepsilon(\mathbf{u}^r) \mathbf{n} &= g && \text{sobre } \Gamma_N, \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

donde las condiciones de apoyo son representadas por la función $\mathbf{h}_r(x, y, g) \neq \mathbf{0}$. Luego, el método de detección necesita del problema

$$\left. \begin{aligned} -\text{div} \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) &= f && \text{en } \Omega, \\ \mathbf{u}_0 &= \mathbf{h}_0(x, y, g) && \text{sobre } \Gamma_D, \\ \mathbf{C}_0 \varepsilon(\mathbf{u}_0) \mathbf{n} &= g && \text{sobre } \Gamma_N, \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

que representa a la probeta P1 (sin defecto). El SAD posee limitaciones para obtener con la precisión requerida la función de desplazamientos $\mathbf{h}_0(x, y, g)$ en el contorno Γ_D . Es por esta razón, que es necesario un modelo computacional auxiliar que nos permita obtener tal función.

Ahora, con base en el modelo computacional en ANSYS podemos escribir $\mathbf{h}_0(x, y, g) \equiv \mathbf{h}_0^{ANSYS}(x, y, g)$, la cual se descompone en cuatro funciones

$$\mathbf{u}_{01} = \begin{cases} \mathbf{h}_0^{ANSYS}(x, g) & \text{en } \Gamma_{Dizq}, \\ \mathbf{h}_0^{ANSYS}(x, g) & \text{en } \Gamma_{Dder}, \end{cases} \quad (6.3)$$

y

$$\mathbf{u}_{02} = \begin{cases} \mathbf{h}_0^{ANSYS}(y, g) & \text{en } \Gamma_{Dizq}, \\ \mathbf{h}_0^{ANSYS}(y, g) & \text{en } \Gamma_{Dder}, \end{cases} \quad (6.4)$$

donde las etiquetas de la frontera de soporte pueden ser observadas en la Fig. 6.2. Los resultados obtenidos indican que los desplazamientos horizontales en la frontera de apoyo pueden ser representados por una relación lineal; los desplazamientos verticales en cambio,

poseen un comportamiento más complejo, que es modelado por una función polinómica de cuarto orden. Los resultados de estos desplazamientos y los ajustes pueden ser observados en el anexo C.

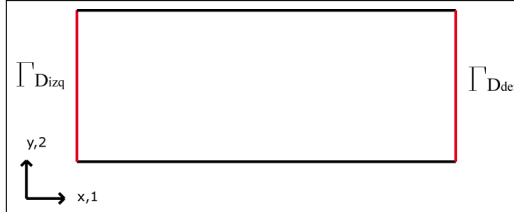


FIGURA 6.2. Etiquetas para las condiciones de borde de la probeta P1.

6.1.3. Resultados para la posición de carga C1

En la Fig. 6.3 se exhiben los resultados de los desplazamientos obtenidos de los experimentos y los provenientes de las simulaciones numéricas en la probeta P1 para la condición de carga C1. Es posible advertir de la figura la simetría en los resultados numéricos producto del esquema de carga, mientras que en el caso de los experimentales, ésta tiende a perderse. Al analizar las diferencias entre los resultados numéricos, se aprecia que los desplazamientos obtenidos en el modelo 3D son menores a los calculados en el modelo simplificado 2D; esta diferencia varía entre 0.004 mm y 0.005 mm (diferencia absoluta).

Es posible extraer de la información contenida en la Tabla 6.1 que el máximo error entre el modelo experimental y el modelo ANSYS es de 4.12% , y si analizamos el error promedio entre todos los puntos, este se reduce a 1.61% .

El modelo FreeFem++ se ajusta al modelo experimental con una precisión similar al modelo anteriormente mencionado, en este caso, el error máximo es de -4.52% . Si calculamos el error promedio este se reduce a 2.55% .

6.1.4. Resultados para la posición de carga C2

Los resultados de los desplazamientos se presentan en la Fig. 6.4, al analizar las diferencias entre los resultados numéricos, se aprecia que los desplazamientos obtenidos en el modelo 3D son menores a los calculados en el modelo simplificado 2D, al igual que lo

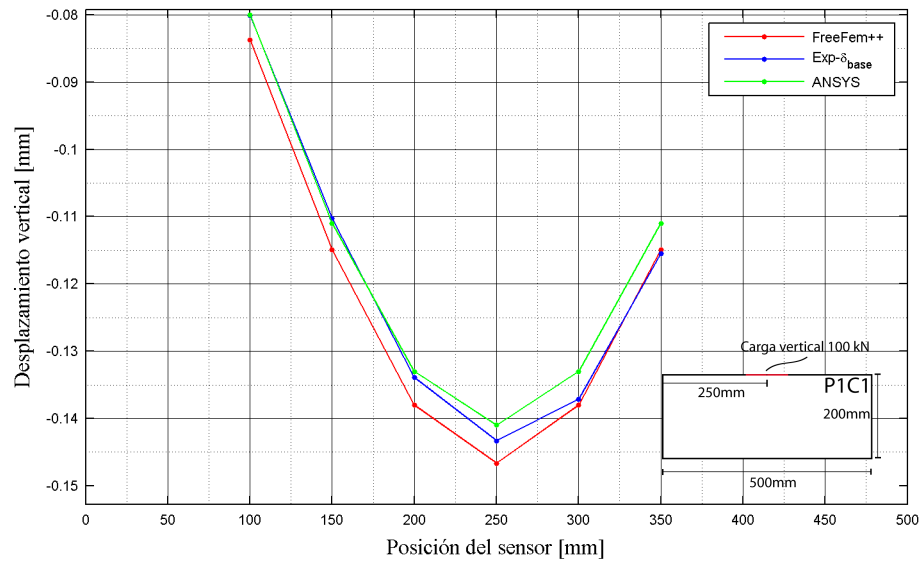


FIGURA 6.3. Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C1.

TABLA 6.1. Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C1.

Punto	x [mm]	δ_{base} [mm]	Exp [mm]	Exp- δ_{base} [mm]	Freefem++ [mm]	Error _{Freefem++} %	ANSYS [mm]	Error _{ANSYS} %
4	100	-0.042	-0.122	-0.080	-0.084	-4.52	-0.080	0.12
6	150	-0.043	-0.153	-0.110	-0.115	-4.23	-0.111	-0.65
8	200	-0.043	-0.177	-0.134	-0.138	-3.06	-0.133	0.68
10	250	-0.044	-0.187	-0.143	-0.147	-2.33	-0.141	1.61
12	300	-0.045	-0.182	-0.137	-0.138	-0.64	-0.133	3.01
14	350	-0.046	-0.161	-0.116	-0.115	0.49	-0.111	3.91

observado en la posición de carga C1. La diferencia en este caso, varía entre 0.002 mm y 0.006 mm (diferencia absoluta). Se puede advertir de la figura que los resultados experimentales se encuentran entre los valores numéricos.

El máximo error para el modelo computacional ANSYS en comparación a los resultados experimental es de 4.32% , si calculamos el error promedio este se reduce a 2.19% . Para el caso del modelo FreeFem++, el error máximo es de -4.85% y el error promedio es de 2.39% .

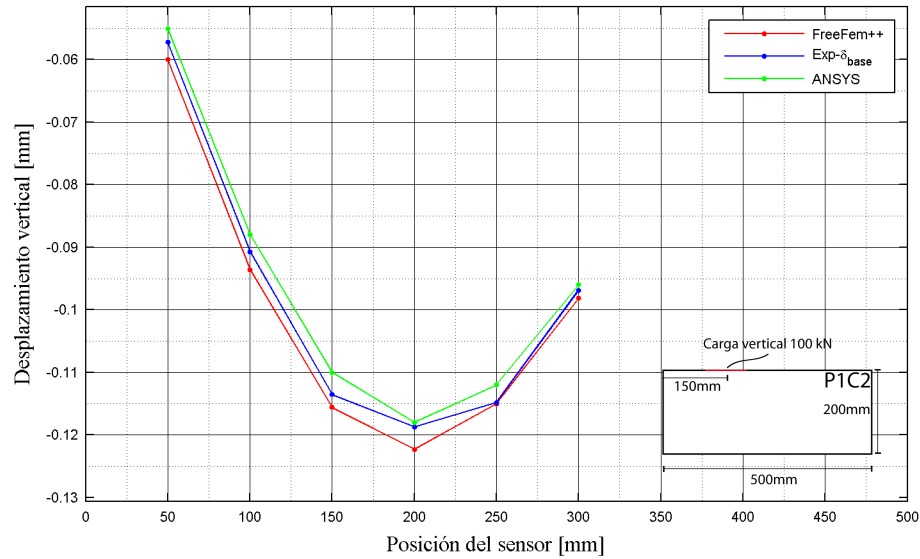


FIGURA 6.4. Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C2.

TABLA 6.2. Desplazamientos experimentales y numéricos para la probeta P1 y carga C2.

Punto	x [mm]	δ_{base} [mm]	Exp [mm]	Exp- δ_{base} [mm]	Freefem++ [mm]	Error _{Freefem++} %	ANSYS [mm]	Error _{ANSYS} %
4	100	-0.052	-0.109	-0.057	-0.060	-4.85	-0.055	3.85
6	150	-0.049	-0.140	-0.091	-0.094	-3.17	-0.088	2.97
8	200	-0.046	-0.160	-0.114	-0.116	-1.80	-0.110	3.13
10	250	-0.043	-0.162	-0.119	-0.122	-3.04	-0.118	0.62
12	300	-0.040	-0.155	-0.115	-0.115	-0.14	-0.112	2.48
14	350	-0.037	-0.134	-0.097	-0.098	-1.36	-0.096	0.88

6.1.5. Análisis de los resultados

Las diferencias entre los resultados de las modelaciones computacional puede ser atribuido a que el modelo 3D considera deformación fuera del plano, lo que puede repercutir en diferencias en los desplazamientos. Existen además pequeñas diferencias en la modelación de la carga: en el modelo 2D la carga de 100 kN se distribuye de manera uniforme y directa sobre la probeta (en un largo de 100 mm y posicionado según el esquema de carga), en el modelo 3D en cambio, la carga es uniforme en el pistón y luego se distribuye a la probeta a través de elementos intermedios, como se observa en la Fig. 6.1b. La

utilización de distintos tipos de elementos finitos en los mallados también puede ser una fuente de diferencias.

Con respecto a las diferencias presentadas entre los resultados experimentales y los numéricos (ambos modelos 2D y 3D), las fuentes de éstos pueden ser razonablemente atribuidos a:

- Si bien los transductores utilizados en este estudio experimental poseen una sensibilidad de fábrica, nunca se han recalibrado como especifica el fabricante.
- Las condiciones de apoyo en el modelo 3D son simplificaciones de las condiciones de los experimentos. Específicamente, se modela una conexión apernada simplificada en condiciones de apoyo fijo.
- Las uniones de los elementos de acero en la estructura montada para los experimentos son soldadas en tramos, en el modelo 3D éstas son uniones monolíticas.
- Las diferencias también pueden ser atribuidas a discrepancias en los parámetros elásticos de los aceros usados en los modelos computacionales y los correspondientes a la estructura real.
- Como es de esperarse, los errores en el proceso de medición juegan también un rol importante.

6.2. Descripción de las pruebas para la detección de defectos

Las pruebas de detección de defectos realizadas en este estudio experimental se clasifican en dos grandes grupos dependiendo del método de detección utilizado: el método en su versión original expuesto en la sección 3.1 y la versión adaptativa enunciada en 3.2.

6.2.1. Pruebas de detección usando la versión original del método

En base a los experimentos llevados a cabo en las probetas, es posible desarrollar diferentes pruebas para la detección de los defectos. En general, estas pruebas difieren unas de las otras en términos de la probeta a utilizar, la posición de la carga y las características

de la zona de medición. De manera adicional, se estudia el efecto de utilizar los criterios del mínimo (F_{min}) en la función Φ , es decir

$$\Phi(x) = \min_{\xi \in \mathbb{S}^{N-1}} \left(\frac{\sigma_0 \xi \cdot \tau_0 \xi}{\mu_0} - \frac{(\lambda_0 + \mu_0)(\sigma_0 \xi \cdot \xi)(\tau_0 \xi \cdot \xi)}{\mu_0(2\mu_0 + \lambda_0)} \right),$$

y del máximo (F_{max})

$$\Phi(x) = \max_{\xi \in \mathbb{S}^{N-1}} \left(\frac{\sigma_0 \xi \cdot \tau_0 \xi}{\mu_0} - \frac{(\lambda_0 + \mu_0)(\sigma_0 \xi \cdot \xi)(\tau_0 \xi \cdot \xi)}{\mu_0(2\mu_0 + \lambda_0)} \right).$$

El uso del mínimo permite a la función de densidad $\theta(x)$ tener valores en el rango de 0 a 1, para el caso del uso del máximo esta función privilegia tener el valor 0 ó 1, es decir, los resultados de la detección muestran zonas sin defectos o con defectos “macizos”.

Según las probetas descritas en la sección 5.3.1 y las posiciones de carga expuestas en 5.2.2, se hace necesaria la definición de la posición de las zonas de medición. En la Tabla 6.3 se describen las zonas de medición utilizadas en las pruebas de detección de defectos usando la versión original del método. Se emplean dos zonas de medición, la rotulada con la letra a con un largo de 250 mm que para todas las probetas se posiciona en la misma coordenada y una zona de medición rotulada con la letra b con un largo de 100 mm, que fue ubicado cerca de la posición real del defecto.

La descripción de los casos de estudio se hace mediante cuatro niveles; por ejemplo, el caso de estudio para la probeta P2, la condición de carga C2, la zona de medición S2a y el criterio F_{min} se representa entonces con el rótulo P2C2S2a F_{min} . Si se desea representar los casos, F_{min} y F_{max} y la zona de medición S2a, éstos serán rotulados como los casos P2C2S2a que agruparán estos dos casos. Ahora, si se desea agrupar además la zona de medición S2b, los casos serán rotulados como P2C2, que reúnen los cuatro casos.

6.2.2. Pruebas de detección usando la versión adaptativa del método

La versión adaptativa del método consiste en utilizar una serie determinada de veces el método original actualizando la posición de la carga y de las zonas de medición con el

TABLA 6.3. Pruebas para la detección de los defectos usando la versión original del método.

Probeta	Posición de la carga	Zona de medición	Descripción de la zona de medición
P2	C1	S2a	$S2a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P2	C1	S2b	$S2b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [250, 350] \text{ mm}\}$
P2	C2	S2a	$S2a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P2	C2	S2b	$S2b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [250, 350] \text{ mm}\}$
P3	C1	S3a	$S3a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P3	C1	S3b	$S3b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [50, 150] \text{ mm}\}$
P3	C2	S3a	$S3a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P3	C2	S3b	$S3b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [50, 150] \text{ mm}\}$
P3	C3	S3a	$S3a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P3	C3	S3b	$S3b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [50, 150] \text{ mm}\}$
P4	C1	S4a	$S4a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P4	C1	S4b	$S4b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [250, 350] \text{ mm}\}$
P4	C2	S4a	$S4a=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [100, 350] \text{ mm}\}$
P4	C2	S4b	$S4b=\{(x, 0) \in \partial\Omega : x \in [250, 350] \text{ mm}\}$

objetivo de mejorar la suposición inicial sobre el defecto. En los casos desarrollados en este estudio experimental el número de iteraciones seleccionado fue de cinco.

La posición inicial de carga fue seleccionada con el objetivo de evaluar la capacidad del método adaptativo de acercarse a la posición real del defecto. La distribución inicial de las zonas de medición fue realizada de manera de cubrir todo el largo de la viga, con el objetivo de detectar el defecto en una posición arbitraria.

Se realizaron dos pruebas usando esta versión: la primera fue llevada a cabo usando tres zonas de medición y la segunda usando dos zonas, ambas pruebas con zonas de medición de un largo igual a 50 mm . Se utilizaron dos esquemas de carga para evaluar la energía elástica, éstas son las posiciones C1 y C2. Para la prueba usando tres zonas de medición los centros de éstos en la iteración inicial (iter=0) fueron $a_{ix} = \{125 \text{ mm} + (i - 1) \times 125 \text{ mm}; i = 1, 2, 3\}$. Para la prueba usando dos zonas de medición, los centros en la iteración inicial fueron $a_{ix} = \{150 \text{ mm} + (i - 1) \times 200 \text{ mm}; i = 1, 2\}$. Estas coordenadas son iguales para todas las probetas con defectos examinadas.

6.3. Resultados de la detección de defectos para la probeta P2

6.3.1. Método original

6.3.1.1. Solución obtenida para P2C1S2a

Es importante mencionar que para todos los resultados de detección presentados en este capítulo, el círculo de línea segmentada de color verde representa la ubicación del defecto real, la “mancha” corresponde al defecto encontrado por el método, la línea roja es el esquema de carga y la azul la zona de medición.

Los resultados de la detección pueden observarse en la Fig. 6.5. En este caso, la detección es satisfactoria. Observamos que existen cuatro zonas donde se distribuye cierta parte del defecto de manera errada, al examinar con detensión es posible advertir que usando el criterio F_{min} se posiciona menor cantidad del defecto en estas zonas erradas.

La Fig. 6.6 muestra la evolución de la función objetivo y del parámetro Ψ de desempeño del método. Es claro que el criterio F_{max} converge en menos iteraciones que el criterio F_{min} , necesita un 7% de iteraciones que el segundo criterio.

En términos del desempeño, en cambio, los resultados muestran que se obtiene una solución más cercana a la real cuando se utiliza el criterio de F_{min} . Esto se puede concluir en base a que $\Psi_{F_{min}} < \Psi_{F_{max}}$ para la iteración final, lo que se observa por simple inspección de la Fig. 6.6b.

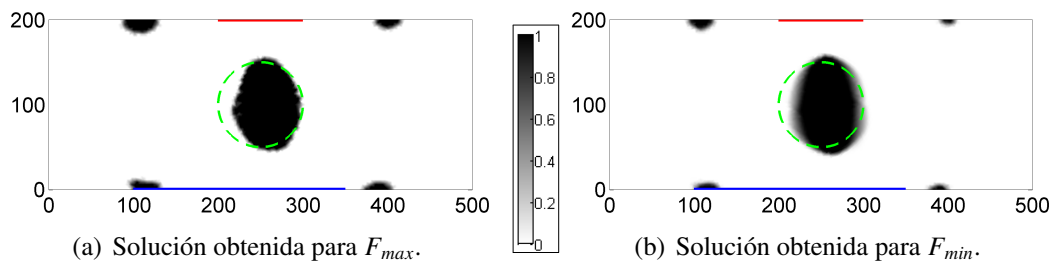


FIGURA 6.5. Resultados de detección para la prueba P2C1S2a.

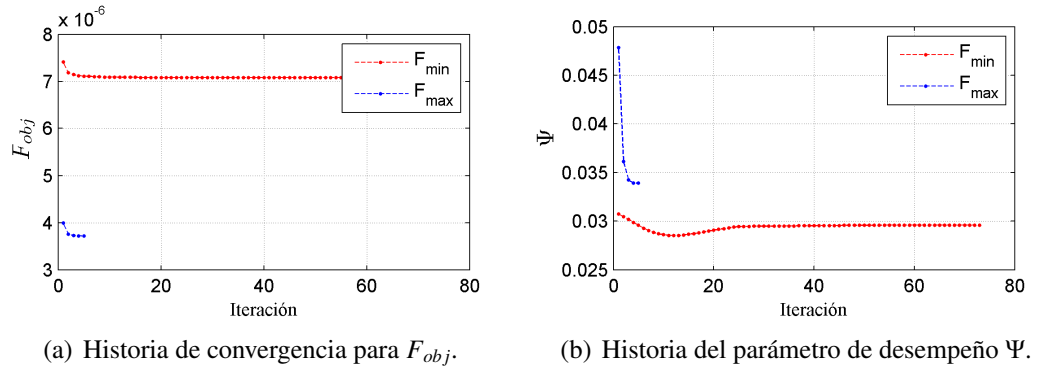


FIGURA 6.6. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P2C1S2a.

6.3.1.2. Solución obtenida para P2C1S2b

Los resultados de detección pueden observarse en la Fig. 6.7. En este caso, la detección es algo menos satisfactoria que para el caso P2C1S2a. Observamos que se pierde la forma circular del defecto a una más ovalada y el método tiende a posicionar el defecto levemente hacia la derecha de la posición del defecto real.

La Fig. 6.8 muestra la evolución de la función objetivo y del parámetro Ψ . Se observan comportamientos similares al caso P2C1S2a donde el criterio F_{max} converge en menos iteraciones (un 8%) que el criterio F_{min} , siendo los resultados, en términos del desempeño, mejores para el criterio F_{min} . De cuatro defectos “espurios” que se detectan por parte del método cuando se ocupa el criterio de F_{max} , éstos se reducen a dos al usar el criterio F_{min} .

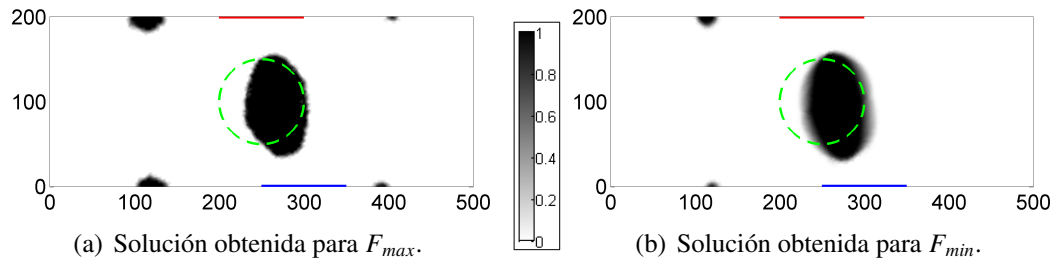


FIGURA 6.7. Resultados de detección para la prueba P2C1S2b.

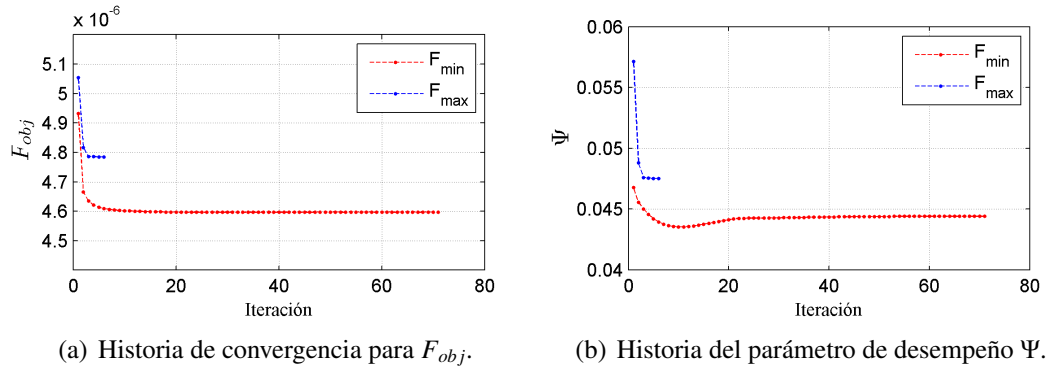


FIGURA 6.8. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P2C1S2b.

6.3.1.3. Solución obtenida para P2C2S2a

Los resultados de detección pueden ser examinados en la Fig. 6.9. En este caso, se produce un leve corrimiento hacia la izquierda con respecto a la ubicación real del defecto, lo que hace pensar que la posición del defecto está un tanto influenciada por la posición de la carga. Aun así, los resultados indican claramente la presencia de la inclusión en una posición y forma concordante a la real.

Analizando la Fig. 6.10a, observamos que F_{max} necesita un 50% menos de iteraciones y además obtiene un mejor desempeño que el criterio F_{min} , como se evidencia de la Fig. 6.10b. Estos resultados son contrarios a los obtenidos en las pruebas P2C1, donde la diferencia entre las iteraciones era mayor y donde el criterio F_{min} obtiene mejores desempeños.

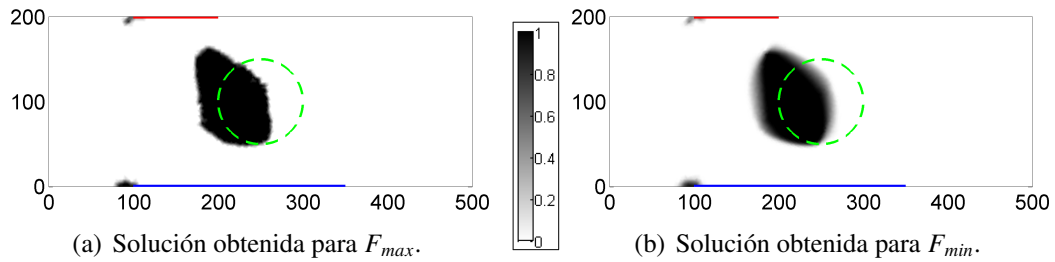


FIGURA 6.9. Resultados de detección para la prueba P2C2S2a.

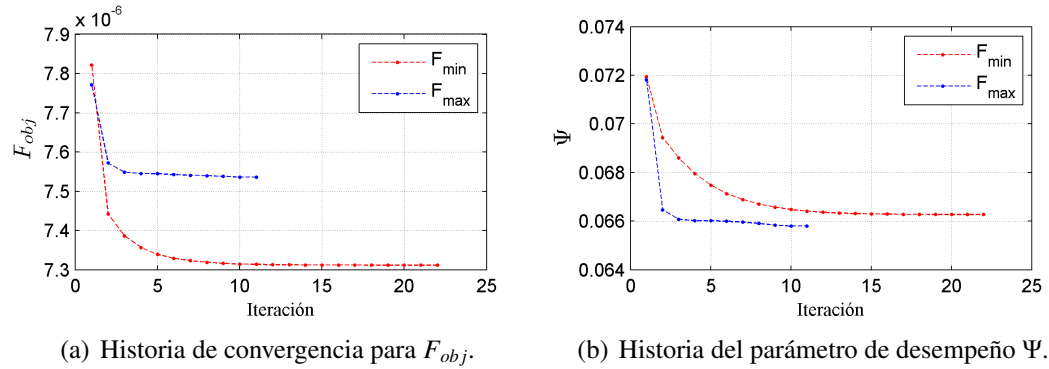


FIGURA 6.10. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P2C2S2a.

6.3.1.4. Solución obtenida para P2C2S2b

Los resultados de detección pueden observarse en la Fig. 6.11. Al comparar con los resultados presentados en el caso P2C2S2a, observamos una mejora en la posición del defecto, influenciada por la ubicación de la zona de medición. A pesar de la pequeña influencia de la posición de carga y de las zonas de medición en el resultado de detección, se mantiene la tendencia en cuanto a la forma y localización del defecto.

Analizando la Fig. 6.12a, se obtiene conclusiones similares con respecto al comportamiento de la función objetivo que los descritos para el caso P2C2S2a. El criterio F_{max} necesita un 52% menos de iteraciones al ser comparado con el criterio F_{min} . En cuanto al desempeño, se repite el comportamiento descrito en las pruebas P2C1, donde el criterio F_{min} obtiene mejores resultados.

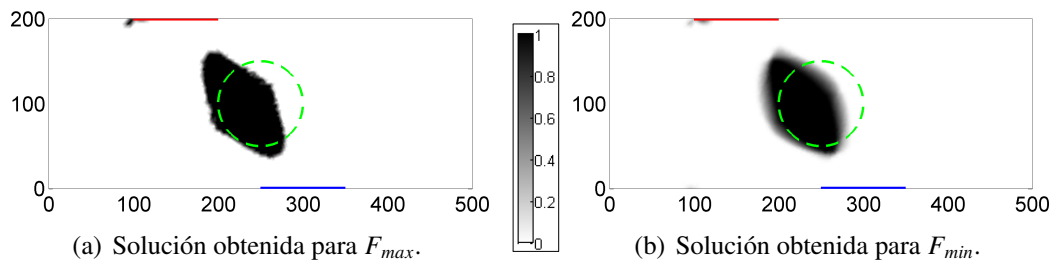


FIGURA 6.11. Resultados de detección para la prueba P2C2S2b.

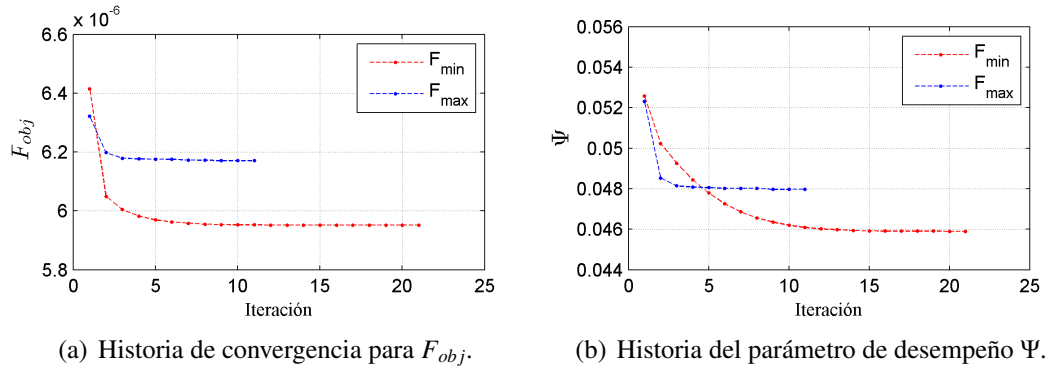


FIGURA 6.12. Evolución de la función F_{obj} y Ψ para la prueba P2C2S2b.

6.3.1.5. Análisis de los resultados

En base a los resultados anteriores resumidos en la tabla Tabla 6.4, se concluye que el criterio F_{min} obtiene mejores resultados en el 75% de los casos evaluados (3 de los 4 casos estudiados), en cuanto a la efectividad del método en la detección. Es importante mencionar que los resultados para el caso de la posición de carga C1 resultan con valores de Ψ menores a la posición C2, lo que coincide con los resultados numéricos y con el análisis teórico del método, donde se manifiesta que éste tiene un mejor desempeño mientras más cercano al defecto se encuentra la carga aplicada.

También es posible concluir que al usar zonas de medición más pequeños (en este caso un 60% más pequeño), pero cercanos a la posición del defecto real, se obtienen desempeños equivalentes o mejores a los logrados por las zonas de medición de mayor dimensión. Un ejemplo claro se observa al evaluar el valor de Ψ para los experimentos P2C2S2a y P2C2S2b, en donde los resultados con la zona de medición de mayor dimensión S2a producen un valor de Ψ mayor que con la zona de medición S2b, lo que significa una detección del defecto de menor calidad, independiente de si se usa el criterio F_{max} o F_{min} .

TABLA 6.4. Resultados del parámetro de desempeño Ψ para la probeta P2.

Función	P2C1S2a	P2C1S2b	P2C2S2a	P2C2S2b
F_{max}	0.0339	0.0475	0.0658	0.0480
F_{min}	0.0296	0.0444	0.0663	0.0459

6.3.2. Método adaptativo

Las dos pruebas de detección desarrolladas para la probeta P2 utilizan la posición de carga C2 como punto de partida y las posiciones de las zonas de medición descritas en la sección 6.2.2. Las zonas de medición tienen la capacidad de moverse a cinco posiciones, las que se describen en base a los centros de las zonas de medición: $\{(0, x) \in \partial\Omega : x \in [125, 176, 227, 278, 329] \text{ mm}\}$.

Como se ha observado de las pruebas usando la versión original del método en la sección 6.3.1, el criterio F_{min} consigue en el 75% de los casos evaluados mejores desempeños en la detección; por esta razón, las pruebas para el método adaptativo se realizaron usando este criterio.

6.3.2.1. Análisis de los resultados

Los resultados de la detección para la probeta P2 utilizando la versión adaptativa del método se presentan en la Fig. 6.13. En términos cualitativos, observamos que en ambos casos se obtienen resultados satisfactorios en la detección del defecto. El comportamiento de la solución es idéntica a la observada en las pruebas de detección usando la versión original del método, donde surgen cuatro defectos “espurios”. Para ambos casos, con tres y dos zonas de medición, la solución tiende a ser ovalada más que circular.

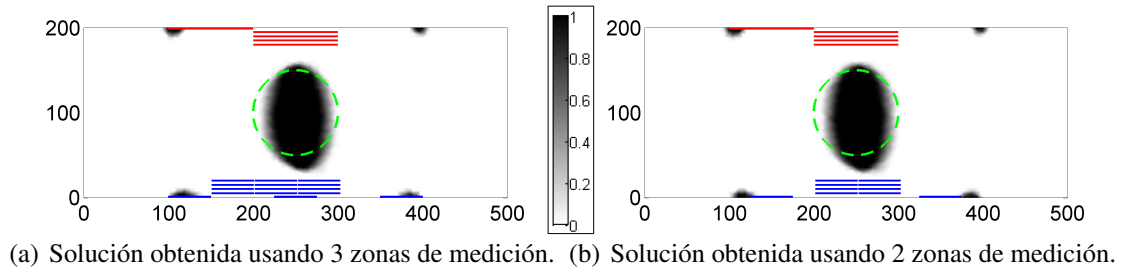


FIGURA 6.13. Resultados de la detección para la probeta P2 usando la versión adaptativa del método. De afuera hacia adentro se muestran las posiciones de la carga y de las zonas de medición para las cinco iteraciones.

En la Tabla 6.5 se muestran la evolución de la posición de los centros de las zonas de medición, la posición de la carga y el parámetro de desempeño Ψ usando tres zonas de medición. En este caso, el método posiciona la carga y las zonas de medición lo más

cercano al defecto, lo que repercute en una detección y localización apropiada del defecto. A partir de la segunda iteración no hay mejoras en los resultados.

En la Tabla 6.6 se muestran los mismos parámetros que en el caso descrito en la Tabla 6.5, pero para la prueba con dos zonas de medición. Aquí el método obtiene resultados similares, y además se muestra que desde la segunda iteración los resultados son iguales, lo que muestra una rápida convergencia.

Al observar los valores de Ψ en la iteración final, el desempeño del método en su versión adaptativa obtiene resultados prácticamente iguales usando dos o tres zonas de medición. Podemos concluir que la mayor información proporcionada por la zona de medición adicional no generó, en este caso, una mejora en el resultado final.

La prueba adaptativa usando tres zonas de medición obtiene un mejor resultado que el obtenido con el método original usando el criterio F_{min} en 3 de los 4 casos evaluados, y sólo es superado por la prueba P2C1S2a F_{min} ($\Psi = 0.0296$); sin embargo, esta prueba utiliza una zona de medición un 67% más grande. La prueba adaptativa usando dos zonas de medición también es superada solamente por la prueba anterior, y en este caso la zona de medición es un 150% más grande.

TABLA 6.5. Evolución de los centros de las zonas de medición (a_{ix}), de la zona de carga (b_x) y del desempeño del método (Ψ) para la versión adaptativa del método en la probeta P2 usando 3 zonas de medición.

Iteración	$a_{1x}[m]$	$a_{2x}[m]$	$a_{3x}[m]$	$b_x[m]$	Ψ
0	0.125	0.250	0.375	0.150	0.072
1	0.176	0.227	0.278	0.250	0.032
2	0.176	0.227	0.278	0.250	0.032
3	0.176	0.227	0.278	0.250	0.032
4	0.176	0.227	0.278	0.250	0.032

TABLA 6.6. Evolución de los centros de las zonas de medición (a_{ix}), de la zona de carga (b_x) y del desempeño del método (Ψ) para la versión adaptativa del método en la probeta P2 usando 2 zonas de medición.

Iteración	$a_{1x}[m]$	$a_{2x}[m]$	$b_x[m]$	Ψ
0	0.150	0.350	0.150	0.050
1	0.227	0.278	0.250	0.033
2	0.227	0.278	0.250	0.033
3	0.227	0.278	0.250	0.033
4	0.227	0.278	0.250	0.033

6.4. Resultados de la detección de defectos para la probeta P3

6.4.1. Método original

6.4.1.1. Solución obtenida para P3C1S3a

Los resultados de la detección del defecto pueden ser examinados en la Fig. 6.14. Observamos que las soluciones obtenidas con los criterios F_{min} y F_{max} difieren en los valores máximos de la función de densidad θ . Para el criterio F_{min} se tienen valores máximos cercanos a la posición del defecto real del orden de 0.4 a 0.6, junto con una distribución más dispersa del defecto. El criterio F_{max} en cambio, tiende a colocar defectos “macizos”.

La forma del defecto detectado en el caso de F_{max} no es circular, sino más bien achatada, y en términos de la posición, el método coloca el defecto corrido hacia la izquierda de la posición real. Para el caso F_{min} , observamos un corrimiento en la misma dirección que para el caso anterior. Ambos criterios posicionan defectos “espurios” en las cuatro esquinas de la viga, siendo F_{max} el que posiciona una mayor cantidad.

En la Fig. 6.15a se puede examinar la historia de convergencia de la función objetivo. Para este caso el criterio F_{max} necesita un 72% de las iteraciones que utiliza el criterio F_{min} para llegar a su solución final. En relación al desempeño en la detección del defecto, mostrado en la Fig. 6.15b, el criterio F_{min} obtiene un valor de Ψ menor y por lo tanto la detección es más satisfactoria.

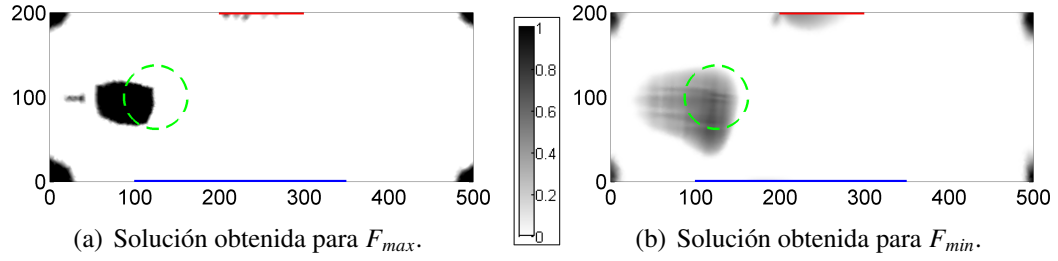


FIGURA 6.14. Resultados de detección para la prueba P3C1S3a.

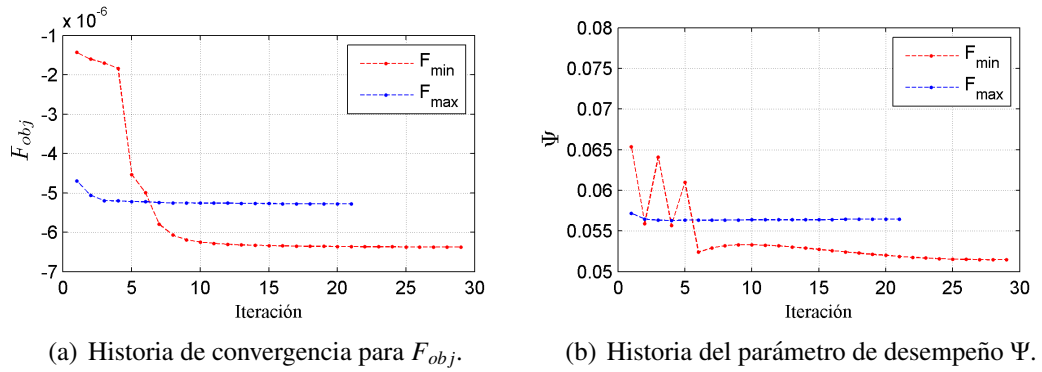


FIGURA 6.15. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P3C1S3a.

6.4.1.2. Solución obtenida para P3C1S3b

En la Fig. 6.16 se presentan los resultados de la detección del defecto. Se observan resultados similares a los obtenidos en la prueba P3C1S3a. Para la solución obtenida con F_{max} el método posiciona defectos “espurios” en tres de las cuatro esquinas de la viga, y como consecuencia se aumenta el volumen de defecto posicionado de manera correcta dentro del círculo. Para el caso usando el criterio F_{min} el resultado es muy similar al obtenido en P3C1S3a.

En la Fig. 6.17a se pueden examinar la historia de convergencia de la función objetivo. En este caso el número de iteraciones es bastante dispar según el criterio usado; el caso F_{max} es el que necesita menos iteraciones, alrededor de un 38% de las iteraciones que utiliza el criterio F_{min} .

Debido a la mejora en el posicionamiento del volumen defectuoso, en este caso, a diferencia de la prueba P3C1S3a, el criterio F_{max} consigue un mejor desempeño, como se desprende del gráfico en la Fig. 6.17b.

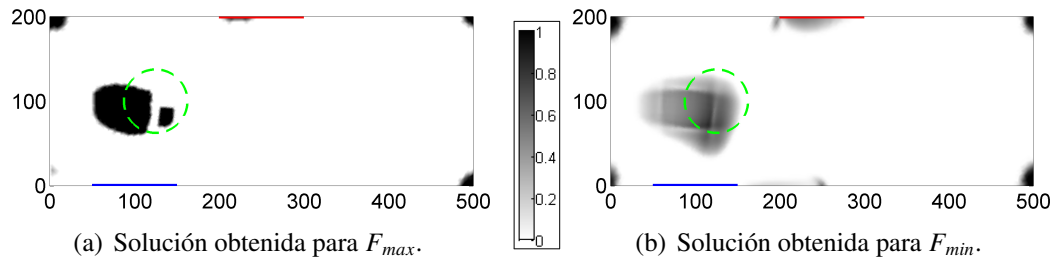


FIGURA 6.16. Resultados de detección para la prueba P3C1S3b.

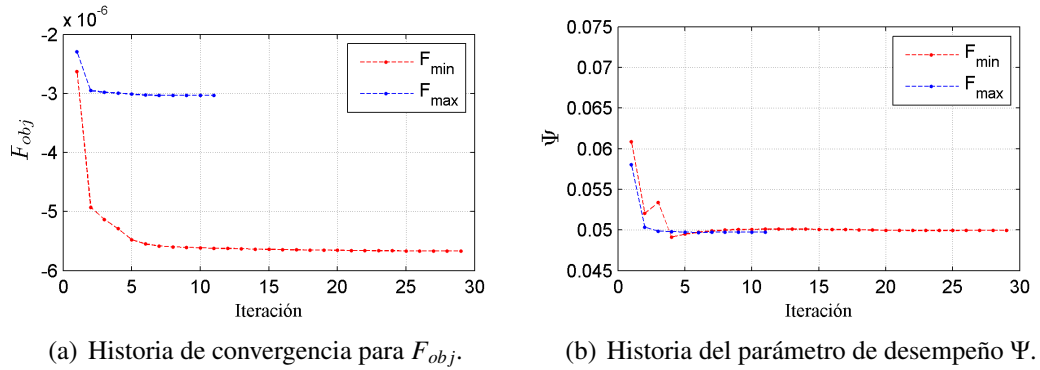


FIGURA 6.17. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P3C1S3b.

6.4.1.3. Solución obtenida para P3C2S3a

Los resultados de detección se exhiben en la Fig. 6.18. Observamos que el método tiende a posicionar el defecto a la derecha del defecto real, casi completamente fuera de él. En ambos casos no existe posicionamiento de volumen en las esquinas, como sí se presentaron en las pruebas P3C1; todo el volumen se ubica en un solo defecto “macizo”.

La Fig. 6.19 muestra la evolución de la función objetivo y del parámetro Ψ . Se observan que el criterio F_{max} converge en menos iteraciones (usa sólo un 19%) que el criterio F_{min} , mientras que, en términos del desempeño, los resultados son mejores para el criterio F_{min} , como se desprende de la Fig. 6.19b.

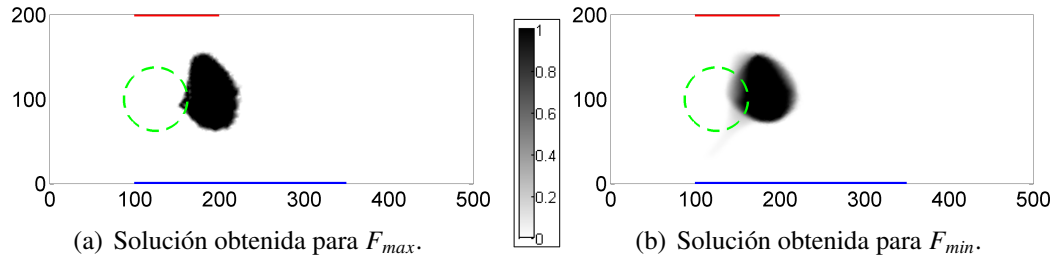


FIGURA 6.18. Resultados de detección para la prueba P3C2S3a.

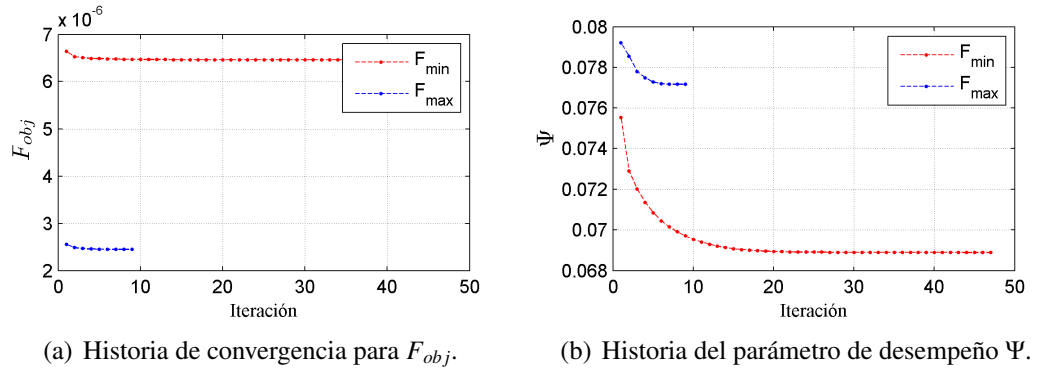


FIGURA 6.19. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P3C2S3a.

6.4.1.4. Solución obtenida para P3C2S3b

En la Fig. 6.20 se muestran los resultados de la detección. En ambos casos se observa un leve corrimiento hacia la derecha del defecto con respecto a la posición real, el cual es menor para el criterio F_{max} , pero se pierde la forma circular del defecto, siendo más ovalada. Se observa además que la posición de la zona de medición tiende a influenciar la ubicación del defecto, esto conlleva una mejora en los resultados al ser comparado con P3C2S3a. Como en el caso anterior (P3C2S3a), el total del volumen se ubica en un solo defecto “macizo”.

En la Fig. 6.21a se puede examinar la historia de convergencia de la función objetivo; en este caso, el número de iteraciones es bastante dispar según el criterio usado; el caso F_{max} es el que necesita menos iteraciones, alrededor de un 17% de las iteraciones que utiliza el criterio F_{min} .

En relación al desempeño en la detección del defecto, el criterio F_{max} obtiene un valor de Ψ menor y por lo tanto la detección es más satisfactoria, como se muestra en la Fig. 6.21b.

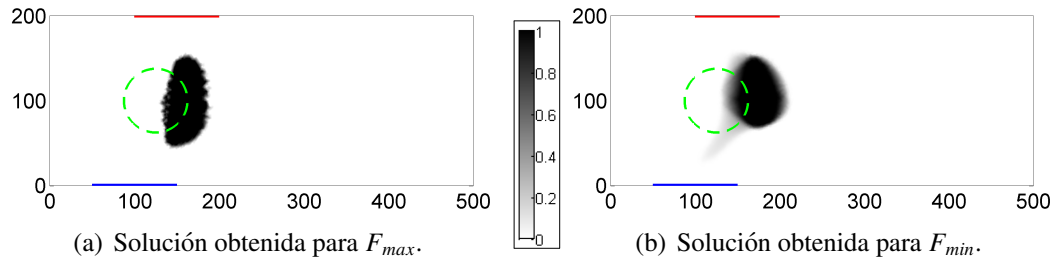


FIGURA 6.20. Resultados de detección para la prueba P3C2S3b.

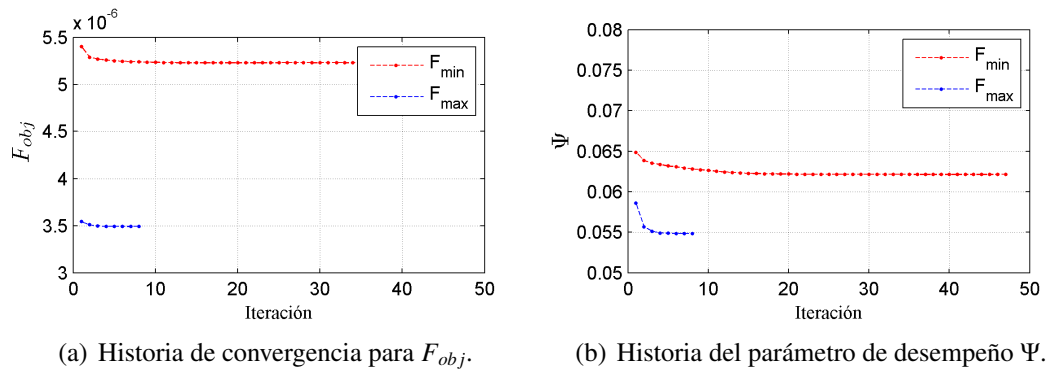


FIGURA 6.21. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P3C2S3b.

6.4.1.5. Solución obtenida para P3C3S3a

Los resultados de la detección del defecto se exhiben en la Fig. 6.22, observamos que para el esquema de carga C3 el defecto propuesto tiende a posicionarse a la derecha, como en los casos anteriores agrupados en P3C2, y con un leve desfase hacia arriba de la posición real. El criterio F_{max} tiende a obtener una inclusión alargada, a diferencia del criterio F_{min} que mantiene una tendencia más ovalada. Ambos criterios posicionan dos zonas de defectos “espurios”.

En la Fig. 6.23a se muestra la historia de convergencia de la función objetivo. El criterio F_{max} necesita un 56% menos de iteraciones al ser comparado con el criterio F_{min} . En cuanto al desempeño, el criterio F_{min} obtiene mejores resultados.

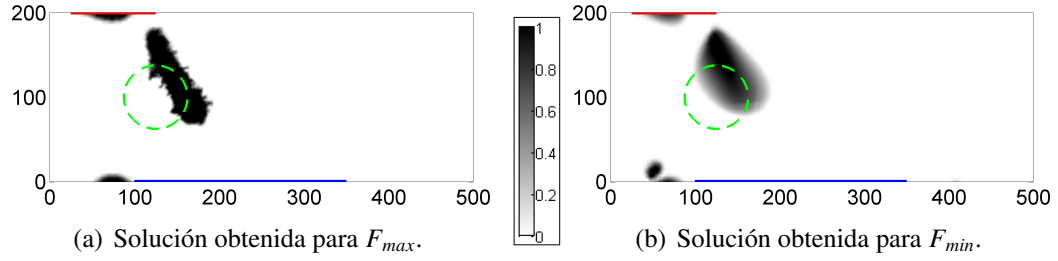


FIGURA 6.22. Resultados de detección para la prueba P3C3S3a.

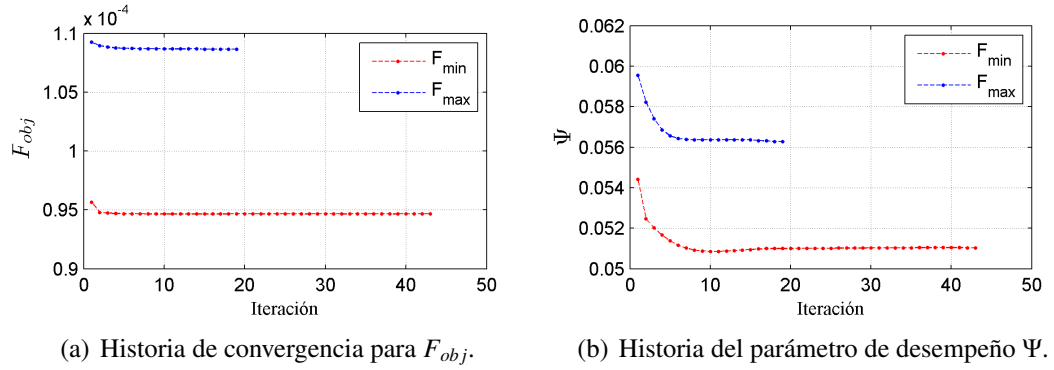


FIGURA 6.23. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P3C3S3b.

6.4.1.6. Solución obtenida para P3C3S3b

Los resultados de detección pueden observarse en la Fig. 6.24. Al comparar con los resultados presentados en el caso P2C3S3a, observamos una mejora en la posición del defecto, influenciada por la ubicación de la zona de medición.

En relación a las soluciones obtenidas en P3C3S3a, en este caso las zonas de defectos “espurios” para el criterio F_{max} son mucho menores y casi no se perciben a simple vista; para el caso F_{min} sólo el defecto “espurio” ubicado cercano a la posición de la carga tiende a desaparecer.

La Fig. 6.25 muestra la evolución de la función objetivo y del parámetro Ψ . Se observan comportamientos similares al caso P3C3S3a donde el criterio F_{max} converge en menos iteraciones (un 70% menos) que el criterio F_{min} , siendo los resultados, en términos del desempeño, mejores para el criterio F_{max} .

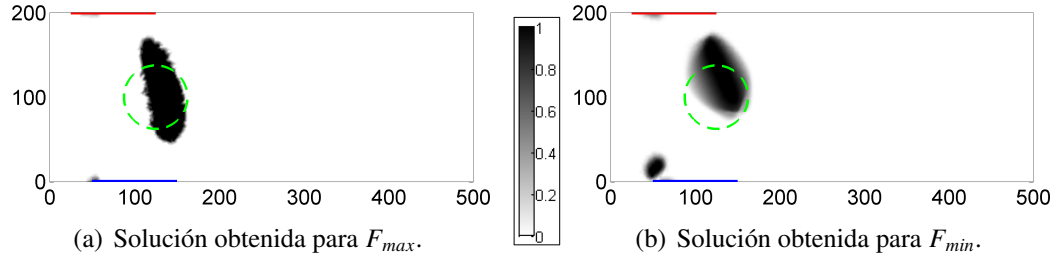


FIGURA 6.24. Resultados de detección para la prueba P3C3S3b.

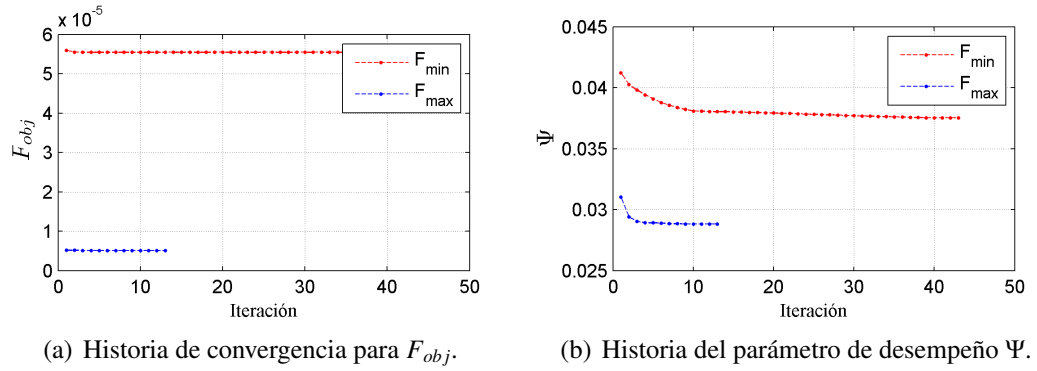


FIGURA 6.25. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P3C3S3b.

6.4.1.7. Análisis de los resultados

En base a los resultados resumidos en la tabla Tabla 6.7, se concluye que el criterio F_{min} obtiene mejores resultados en el 50% de los casos evaluados (3 de los 6 casos estudiados), en cuanto a la efectividad del método en la detección. Es importante mencionar que los resultados para el caso de la posición de carga C2 resultan con valores de Ψ mayores a la posición C1, esto si se analizan la pruebas de detección equivalentes en términos de la zona de medición utilizada. Este hecho es de gran importancia pues indica que se obtuvieron mejores resultados para una posición de carga más alejada del defecto real, lo que es contrario a lo que teóricamente debiese ocurrir, donde el método se desempeña de mejor manera cuando la carga este más cerca del defecto. Al analizar los resultados para el esquema de carga C3, la detección tiende a mejorar con respecto a lo exhibido para la posición de carga C1 y C2.

También se observa en la Tabla 6.7 que en el 100% de las pruebas realizadas la zona de medición S3b obtiene un valor de Ψ menor que los alcanzados por la zona de medición S3a.

TABLA 6.7. Resultados del parámetro de desempeño Ψ para la probeta P3.

Función	P3C1S3a	P3C1S3b	P3C2S3a	P3C2S3b	P3C3S3a	P3C3S3b
F_{max}	0.0564	0.0497	0.0772	0.0549	0.0563	0.0288
F_{min}	0.0514	0.0500	0.0689	0.0621	0.0510	0.0375

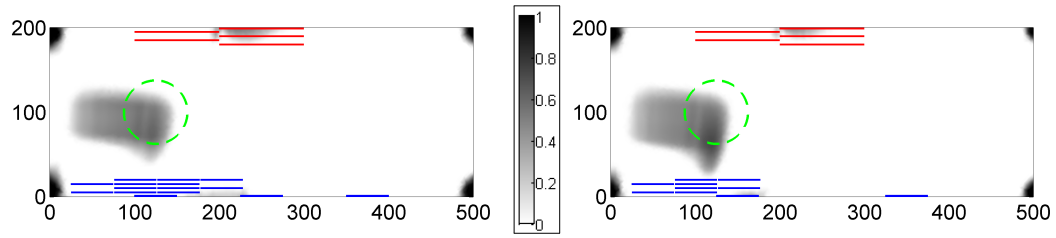
6.4.2. Método adaptativo

Las dos pruebas de detección desarrolladas para la probeta P3 utilizan la posición de carga C1 como punto de partida y las posiciones de las zonas de carga descritas en la sección 6.2.2. Las zonas de medición tienen la capacidad de moverse en siete posiciones, las que se describen en base a los centros de las zonas de medición: $\{(0, x) \in \partial\Omega : x \in [50, 101, 152, 203, 254, 305, 356] \text{ mm}\}$.

6.4.2.1. Análisis de los resultados

Los resultados de la detección para la probeta P3 utilizando la versión adaptativa del método se presenta en la Fig. 6.26. En términos cualitativos, observamos que ambos casos obtienen resultados satisfactorios en la detección del defecto. La solución obtenida tiene valores de la función de densidad θ entre 0.2 a 0.6, estos valores producen que el defecto posicionado tienda a difundirse en un área mayor a la del círculo real, hacia la izquierda. Es importante mencionar que surgen cuatro defectos “espurios”, cada uno en las cuatro esquinas de la viga.

En la Tabla 6.8 se muestra la evolución de los centros de las zonas de medición, la posición de la carga y el parámetro de desempeño Ψ usando tres zonas de medición. En este caso, el método posiciona las zonas de medición lo más cercano al defecto. En cuanto a la posición de la carga, ésta itera entre la posición C1, más alejada del defecto y la posición C2 que está más cercana. Esto produce que el parámetro de desempeño obtenga un mínimo



(a) Solución obtenida usando 3 zonas de medición. (b) Solución obtenida usando 2 zonas de medición.

FIGURA 6.26. Resultados de la detección para la probeta P3 usando la versión adaptativa del método. De afuera hacia adentro se muestran las posiciones de la carga y de las zonas de medición para las cinco iteraciones.

en C2 (0.053) y luego el valor aumenta a 0.057 en la iteración final producto del alejamiento de la carga con respecto al defecto.

En la Tabla 6.9 se muestran los mismos parámetros que en el caso descrito en la Tabla 6.8, pero para la prueba con dos zonas de medición. Aquí, el método obtiene resultados similares a la prueba anterior, las zonas de medición se posicionan cercanos al defecto, pero la carga itera entre las posiciones C1 y C2. Se observa el mismo comportamiento en el parámetro Ψ , donde en la iteración 2 se obtiene el mínimo valor (0.044) y en la iteración final este valor aumenta a 0.057 debido al alejamiento de la carga con respecto al defecto.

TABLA 6.8. Evolución de los centros de las zonas de medición (a_{ix}), de la zona de carga (b_x) y del desempeño del método (Ψ) para la versión adaptativa del método en la probeta P3 usando 3 zonas de medición.

Iteración	$a_{1,x}[m]$	$a_{2,x}[m]$	$a_{3,x}[m]$	$b_x[m]$	Ψ
0	0.125	0.250	0.375	0.250	0.071
1	0.050	0.101	0.152	0.150	0.053
2	0.101	0.152	0.203	0.250	0.057
3	0.050	0.101	0.152	0.150	0.053
4	0.101	0.152	0.203	0.250	0.057

TABLA 6.9. Evolución de los centros de las zonas de medición (a_{ix}), de la zona de carga (b_x) y del desempeño del método (Ψ) para la versión adaptativa del método en la probeta P3 usando 2 zonas de medición.

Iteración	$a_{1x}[m]$	$a_{2x}[m]$	$b_x[m]$	Ψ
0	0.150	0.350	0.250	0.064
1	0.050	0.101	0.150	0.044
2	0.101	0.152	0.250	0.057
3	0.050	0.101	0.150	0.044
4	0.101	0.152	0.250	0.057

6.5. Resultados de la detección de defectos para la probeta P4

6.5.1. Método original

6.5.1.1. Solución obtenida para P4C1S4a

Los resultados de detección pueden ser examinados en la Fig. 6.27. En este caso, la detección es satisfactoria en ambos casos. Observamos que el criterio F_{max} obtiene una solución más ovalada que el criterio F_{min} . En términos de la posición, ambos posicionan el defecto de manera correcta y con el total de volumen defectuoso, lo que repercute en la no presencia de pequeños defectos “espurios”.

La Fig. 6.28 muestra la evolución de la función objetivo y del parámetro Ψ de desempeño del método. Es claro que el criterio F_{max} converge en menos iteraciones que el criterio F_{min} , ya que necesita un 39% menos de iteraciones que el segundo criterio.

En términos del desempeño, los resultados muestran que se obtiene una solución más cercana a la real cuando se utiliza el criterio de F_{max} . Esto se puede concluir por simple inspección de la Fig. 6.28b, pues para la última iteración $\Psi_{F_{max}} < \Psi_{F_{min}}$.

6.5.1.2. Solución obtenida para P4C1S4b

Los resultados de detección pueden observarse en la Fig. 6.29. En este caso, la detección es levemente menos satisfactoria que para el caso P4C1S4a. Observamos que se

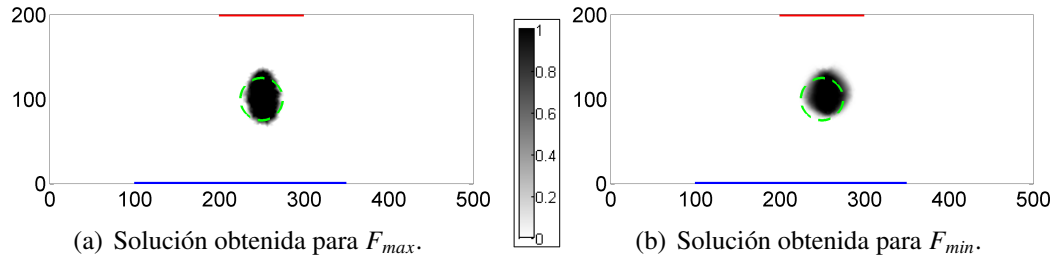


FIGURA 6.27. Resultados de detección para la prueba P4C1S4a.

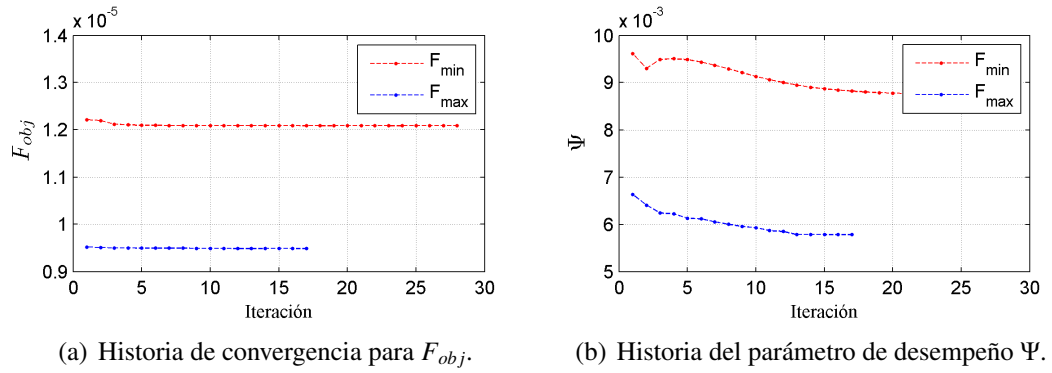


FIGURA 6.28. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P4C1S4a.

pierde la forma circular del defecto a una más ovalada y el método tiende a posicionar el defecto algo hacia la derecha.

La Fig. 6.30 muestra la evolución de la función objetivo y del parámetro Ψ . El criterio F_{max} converge en menos iteraciones (un 89% menos) que el criterio F_{min} , siendo los resultados, en términos del desempeño, mejores para el criterio F_{min} .

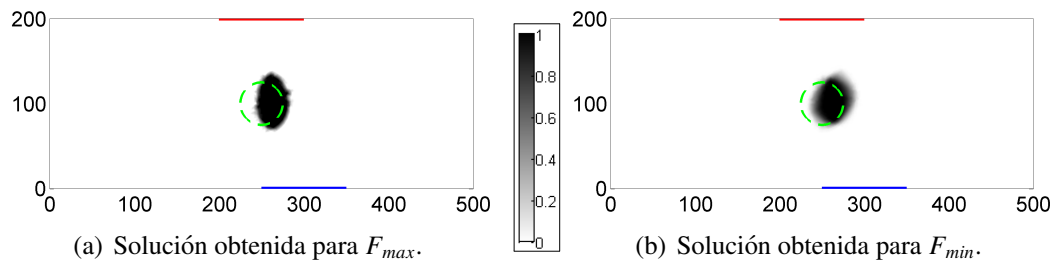


FIGURA 6.29. Resultados de detección para la prueba P4C1S4b.

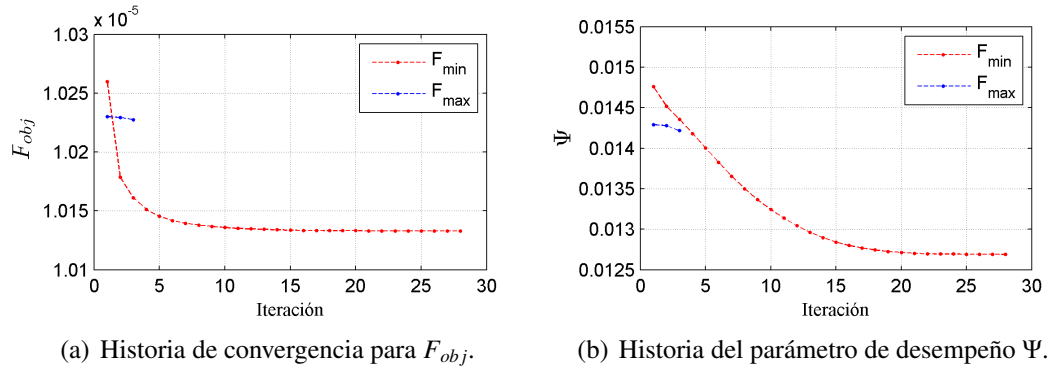


FIGURA 6.30. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P4C1S4b.

6.5.1.3. Solución obtenida para P4C2S4a

Los resultados de detección pueden ser examinados en la Fig. 6.31, para esta prueba se produce un corrimiento hacia la izquierda con respecto a la ubicación real, lo que hace pensar que la posición del defecto está un tanto influenciada por la posición de la carga. Este efecto también fue apreciado en la probeta P2 para este mismo esquema de carga, pero más atenuado. Aun así, los resultados indican la presencia de la inclusión en una posición y forma concordante a la real.

Analizando la Fig. 6.32a observamos que F_{max} realiza una iteración más que el criterio F_{min} para obtener su solución final. En cuanto al desempeño, F_{min} obtiene un mejor desempeño, como se evidencia de la Fig. 6.32b.

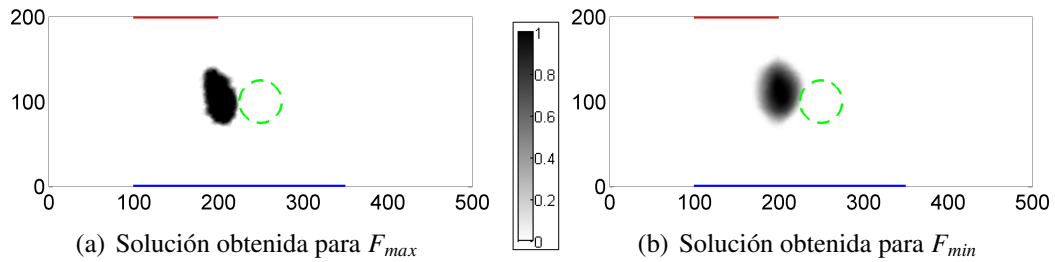


FIGURA 6.31. Resultados de detección para la prueba P4C2S4a.

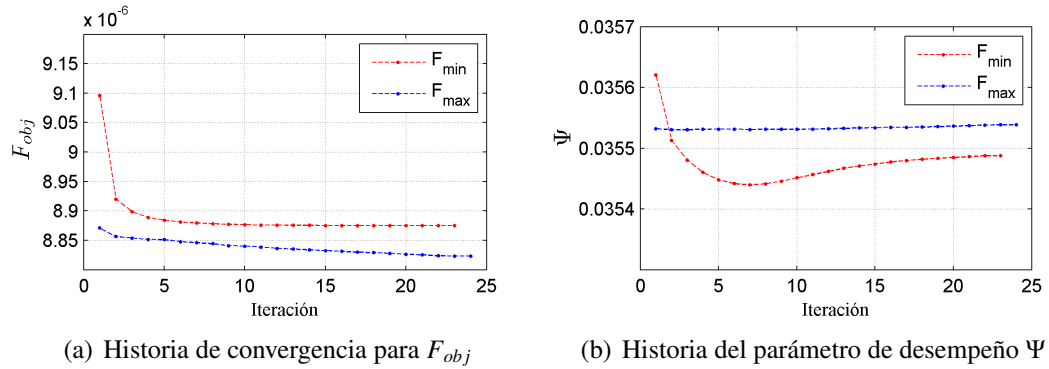


FIGURA 6.32. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P4C2S4a.

6.5.1.4. Solución obtenida para P4C2S4b

Los resultados de detección pueden observarse en la Fig. 6.33. Al comparar con los resultados presentados en el caso P4C2S4a, observamos una mejora en la posición del defecto, influenciada por la ubicación de la zona de medición. A pesar de la pequeña influencia de la posición de carga y de las zonas de medición en el resultado de la detección, se mantiene la tendencia en cuanto a la forma y localización del defecto.

Analizando la Fig. 6.34, el criterio F_{max} necesita un 30% menos de iteraciones al ser comparado con el criterio F_{min} . En cuanto al desempeño, el criterio F_{max} obtiene mejores resultados.

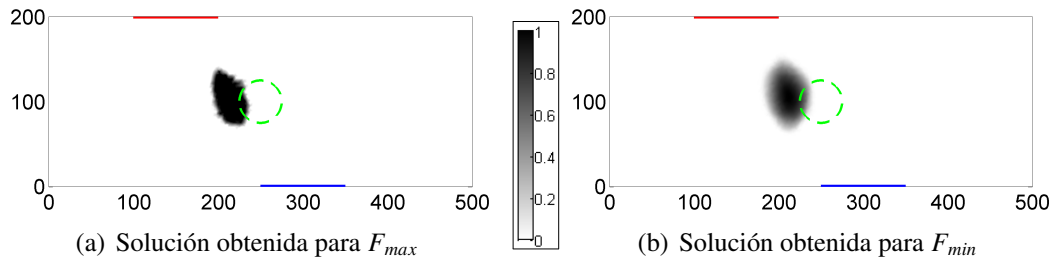


FIGURA 6.33. Resultados de detección para la prueba P4C2S4b.

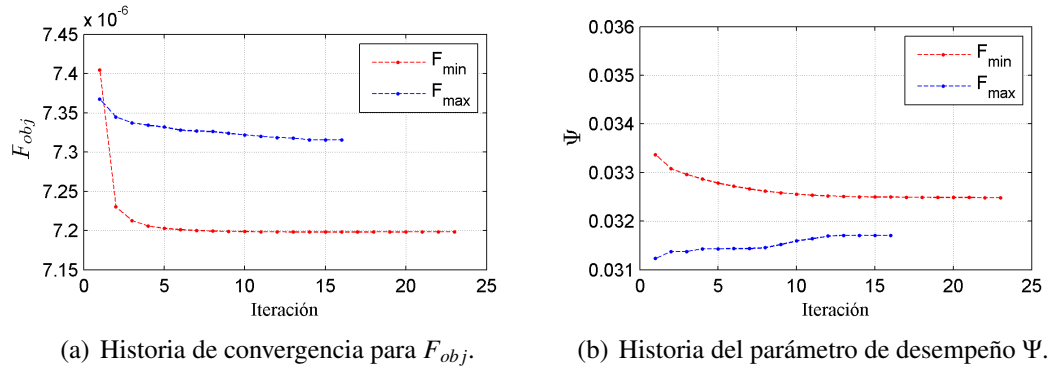


FIGURA 6.34. Evolución de la función objetivo F_{obj} y Ψ para la prueba P2C2S4b.

6.5.1.5. Análisis de los resultados

En base a los resultados resumidos en la tabla Tabla 6.10, se concluye que el criterio F_{min} obtiene mejores resultados en el 50% de los casos evaluados (2 de los 4 casos evaluados), en cuanto a la efectividad del método en la detección. Es importante mencionar que los resultados para el caso de la posición de carga C1 resultan con valores de Ψ menores a la posición C2, cuando se comparan las pruebas usando zonas de medición idénticas.

También es posible concluir que al usar zonas de medición más pequeñas (en este caso un 60% más pequeño), pero cercanos a la posición del defecto real, se obtienen desempeños equivalentes o mejores a los logrados por zonas de medición de mayor dimensión, un ejemplo claro se presenta al evaluar el valor de Ψ para los experimentos P4C2S4a y P4C2S4b, en donde los resultados para la zona de medición de mayor dimensión S4a obtienen un valor de Ψ mayor que para la zona de medición S4b, lo que significa una detección del defecto de menor calidad, independiente de si se usa el criterio F_{max} o F_{min} .

TABLA 6.10. Resultados del parámetro de desempeño Ψ para la probeta P4.

Función	P4C1S4a	P4C1S4b	P4C2S4a	P4C2S4b
F_{max}	0.00578	0.01422	0.03554	0.03171
F_{min}	0.00873	0.01269	0.03549	0.03248

6.5.2. Método adaptativo

Las dos pruebas de detección desarrolladas para la probeta P4 utilizan la posición de carga C2 como punto de partida y las posiciones de las zonas de medición descritas en la sección 6.2.2. Las zonas de medición tienen la capacidad de moverse en seis posiciones, las que se describen en base a los centros de las zonas de medición: $\{(0, x) \in \partial\Omega : x \in [75, 126, 177, 228, 279, 330] \text{ mm}\}$.

6.5.2.1. Análisis de los resultados

Los resultados de la detección para la probeta P4 utilizando la versión adaptativa del método se presenta en la Fig. 6.35. En términos cualitativos, observamos que ambos casos obtienen resultados satisfactorios en la detección del defecto, aunque la solución para la prueba usando tres zonas de medición, como es de esperarse, presenta una solución más cercana a la real. El comportamiento de la solución es idéntica a la observada en las pruebas de detección usando la versión original del método, donde no surgen defectos “espurios”.

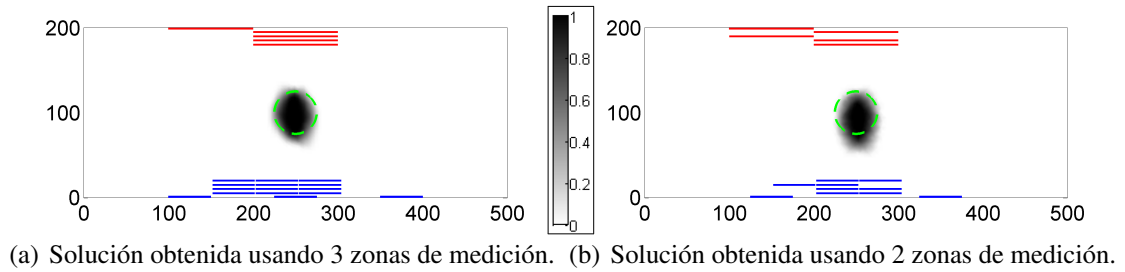


FIGURA 6.35. Resultados de la detección para la probeta P4 usando la versión adaptativa del método. De afuera hacia adentro se muestran las posiciones de la carga y de las zonas de medición para las cinco iteraciones.

En la Tabla 6.11 se muestran la evolución de la posición de los centros de las zonas de medición, la posición de la carga y el parámetro de desempeño Ψ usando tres zonas de medición, en este caso, el método cumple el objetivo y posiciona la carga y las zonas de medición lo más cercano al defecto, lo que repercute en una detección y localización apropiada del defecto. A partir de la segunda iteración no hay mejoras en los resultados.

En la Tabla 6.12 se muestran los mismos parámetros que en el caso descrito en la Tabla 6.11, pero para la prueba con dos zonas de medición. Aquí el método obtiene resultados similares a los anteriores.

La prueba adaptativa usando tres zonas de medición obtiene en el 100% de los casos evaluados un mejor resultado que el logrado por el método original usando el criterio F_{min} . La prueba adaptativa usando dos zonas de medición es superada solamente por la prueba P4C1S4a ($\Psi = 0.00873$); en este caso, la zona de medición usada por la prueba adaptativa es un 150% más pequeña.

TABLA 6.11. Evolución de los centros de las zonas de medición (a_{ix}), de la zona de carga (b_x) y del desempeño del método (Ψ) para la versión adaptativa del método en la probeta P4 usando 3 zonas de medición.

Iteración	$a_{1x}[m]$	$a_{2x}[m]$	$a_{3x}[m]$	$b_x[m]$	Ψ
0	0.125	0.250	0.375	0.150	0.034
1	0.177	0.228	0.279	0.250	0.007
2	0.177	0.228	0.279	0.250	0.007
3	0.177	0.228	0.279	0.250	0.007
4	0.177	0.228	0.279	0.250	0.007

TABLA 6.12. Evolución de los centros de las zonas de medición (a_{ix}), de la zona de carga (b_x) y del desempeño del método (Ψ) para la versión adaptativa del método en la probeta P4 usando 2 zonas de medición.

Iteración	$a_{1x}[m]$	$a_{2x}[m]$	$b_x[m]$	Ψ
0	0.150	0.350	0.150	0.036
1	0.228	0.279	0.250	0.010
2	0.228	0.279	0.150	0.034
3	0.177	0.228	0.250	0.018
4	0.228	0.279	0.250	0.010

6.6. Comentarios generales sobre las pruebas de detección de defectos

6.6.1. Método original

El método de detección de defectos es capaz de proporcionar predicciones acordes a la realidad para los defectos estudiados. En el caso particular de la probeta P2, todas las pruebas obtuvieron resultados similares. Teniendo en cuenta los valores de Ψ , se obtienen mejores resultados para los casos evaluados bajo el esquema de carga C1, independientemente de los dos tipos de zonas de medición utilizadas; esto se observa claramente en la forma y la localización del defecto detectado. La explicación radica en la simetría de la prueba y debido a que las perturbaciones de los desplazamientos generados por el defecto son más grandes cuando la carga se aplica según el esquema C1 y, por lo tanto, menos influenciada por los errores en el proceso de medición.

En cuanto a la probeta P3, las pruebas realizadas para el esquema de carga C1 obtienen buenos resultados en la ubicación del defecto, pero inferiores a los obtenidos en las pruebas P2C1; esto era esperable porque el defecto es más pequeño y está más alejado de la posición de la carga. El resultado para el esquema de carga C2 muestra que el defecto no se identifica correctamente en su ubicación en la dirección horizontal, pues el método de detección posiciona el defecto a la derecha del lugar correcto. Sin embargo, en el esquema de carga C3 el defecto se identifica con mayor precisión, como en el caso C1.

En la probeta P4, se exhibe un buen ajuste para el caso de carga C1, a pesar del pequeño tamaño del defecto (un 1,18% del volumen total de la probeta). En el esquema de carga C2, se observa un desplazamiento hacia la izquierda del defecto real.

En términos de los valores de Ψ , el criterio F_{min} consigue mejores resultados en el 57% de los casos (8 de 14 pruebas realizadas), al ser comparado con el criterio F_{max} . A nivel cualitativo, ambos criterios obtienen desempeños equivalentes. En cuanto al número de iteraciones realizadas utilizando estos criterios, en 13 casos el criterio F_{max} necesitó menos iteraciones (67% menos, en promedio), y sólo en un caso este criterio realizó más iteraciones que el criterio F_{min} .

Si analizamos las soluciones alcanzadas en relación a la aparición de defectos “espurios”, de un total de 28 pruebas, contando los 14 casos por cada criterio (F_{min} y F_{max}), en un 57% de los casos el método colocó algún defecto “espurio” como parte de la solución final.

6.6.2. Método adaptativo

En base a los valores de Ψ para la iteración final, vemos que en todos los casos con tres zonas de medición se obtienen mejores soluciones en la detección de defectos. El comportamiento de las zonas de medición nos permite concluir que a pesar de su pequeño tamaño, utilizando información procedente de diversas posiciones de carga, la detección es satisfactoria. En todos los casos la iteración final obtiene un mejor desempeño que la iteración inicial.

Las soluciones encontradas del defecto por la versión adaptativa del método, al ser comparado con los resultados usando el método original, en todos los casos evaluados logra encontrar el defecto satisfactoriamente, esto se explica debido a que al mover la carga y las zonas de medición hacia el defecto supera los sesgos en la detección, que en algunos casos usando la versión original se producen cuando la posición de la carga se encuentra alejada inicialmente del defecto.

6.7. Problemas de sesgos en la detección de defectos cuando se utilizan zonas de medición de pequeño tamaño

Como se ha presentado en este capítulo, es posible obtener resultados satisfactorios en la detección de defectos cuando se utilizan pequeñas zonas de medición, por ejemplo, menores al 10% del contorno libre para medir, pero sólo en los casos cuando éstos se encuentran cercanos al defecto real. En la presencia de errores en las mediciones y problemas de precisión en las modelaciones computacionales con respecto a las estructuras reales, el uso de zonas de medición de pequeña dimensión y emplazados lejos del defecto, puede ocasionar sesgos en su detección. Esta situación empeora cuando la carga aplicada también se posiciona alejada del defecto.

En la Fig. 6.36 se exhiben dos ejemplos de sesgos en la detección del defecto, en ambos casos se dispone de una zona de medición con una dimensión de un 5.5% del total del contorno libre para medir. En ambos casos, el defecto tiende a posicionarse cercano a la zona de medición y de manera difusa.

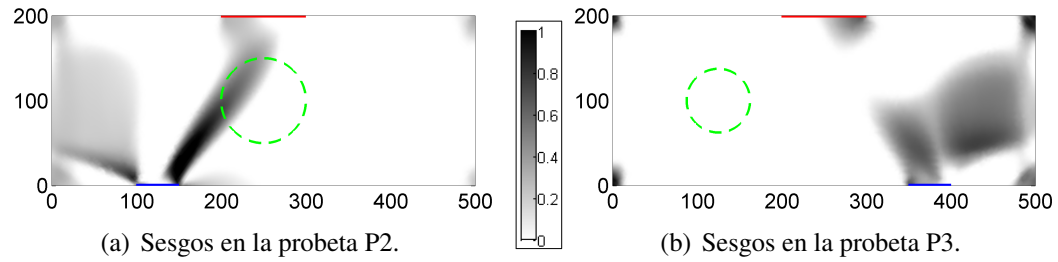


FIGURA 6.36. Ejemplos de posibles sesgos en la detección de defectos.

7. APORTES DE LA TESIS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

7.1. Resumen

En esta Tesis fue estudiada la aplicación experimental de un método para la identificación de defectos en sistemas estructurales 2D. Se realizaron mediciones experimentales de desplazamientos sobre parte de los bordes libres de vigas rectangulares con diferentes defectos. A partir de los resultados de los desplazamientos medidos, se realizó un número de pruebas de detección de estos defectos para demostrar la aplicabilidad de la técnica estudiada. Estos casos de estudios indican que el método posee un muy buen desempeño en la detección de la presencia de un defecto en aplicaciones reales, aunque posee algunas limitaciones debido a la implementación experimental, en términos de las dimensiones y posición de las zonas de medición, la ubicación de la posición de la carga y de la dimensión de los defectos.

7.2. Aportes de la Tesis

Las líneas de investigación desarrolladas en la presente Tesis introducen aportes en el área de la evaluación de defectos para vigas 2D. Específicamente, los principales aportes que se han realizado son las siguientes:

- (i) Se ha desarrollado un sistema de adquisición de datos a través del computador que puede ser utilizado para cualquier estudio experimental de mediciones estáticas, con la instrumentación presentada y utilizada en este estudio experimental.
- (ii) Se ha desarrollado un procedimiento experimental para la detección de defectos a través de métodos estáticos basados en mediciones de desplazamientos, que permite evaluar la dispersión de estas mediciones y el manejo de las posibles fuentes de error, basado en llevar a cabo repeticiones de los experimentos.

- (iii) Se entregan los lineamientos para futuros estudios experimentales en aplicaciones de mayor interés en ingeniería utilizando el presente método de detección de defectos.

7.3. Conclusiones

Entre las principales conclusiones, incluidas las establecidas en cada capítulo, se pueden considerar las siguientes: a) conclusiones relativas al procedimiento experimental, b) conclusiones relativas al método de detección de defectos en aplicaciones reales.

7.3.1. Conclusiones sobre el procedimiento experimental

Entre las principales conclusiones con respecto al procedimiento experimental desarrollado en esta Tesis, pueden nombrarse las siguientes:

- (i) El análisis experimental introduce nuevas consideraciones que deben ser estudiadas y evaluadas al desarrollar métodos de detección a nivel teórico, entre ellas pueden mencionarse las limitaciones en los procesos de medición debido a que no todo puede ser medido, ni tampoco en todos los lugares es posible medir.
- (ii) Se debe verificar que se cumplan las condiciones teóricas del comportamiento elástico-lineal y de pequeñas deformaciones de la estructura que se está evaluando; en este sentido, el diseño de los métodos experimentales para la detección de defectos debe considerar esto, especialmente las deformaciones producidas en los apoyos.
- (iii) En todo procedimiento experimental pueden presentarse errores inesperados, en cualquier etapa de éste. Algunos de los factores que ocasionan estos errores no pueden ser retirados y otros se pueden reducir por pequeños cambios de la configuración experimental. Conocer la fuente del error es importante para mejorar el rendimiento de los procedimientos de experimentación.
- (iv) Es importante la evaluación de las características técnicas de los SAD, en cuanto a sus capacidades, como la resolución, la linealidad, la histéresis, entre otras,

pues condicionan la detección de los defectos que generan pequeñas perturbaciones en las variables a medir, a diferencia de la teoría y de los estudios numéricos, donde estas capacidades no poseen limitaciones.

- (v) En relación a la ejecución de repeticiones de los experimentos para realizar los análisis estadísticos de las mediciones, es aconsejable automatizar estos procesos con el objetivo de disminuir el costo de tiempo en la realización de los mismos.

7.3.2. Conclusiones sobre el método de detección en aplicaciones reales

Las principales conclusiones que se han obtenido en lo que respecta al método de detección evaluado en aplicaciones reales son:

- (i) El método de detección obtuvo soluciones adecuadas para los defectos en las aplicaciones estudiadas en esta Tesis.
- (ii) Las posiciones de la carga y de las zonas de medición tienden a influir en la precisión de la detección, en cuanto a la posición y forma del defecto detectado. De las simulaciones numéricas presentadas en Gutiérrez y Mura (2008) y Gutiérrez y Mura (2010), se obtuvo que las inclusiones deben estar cercanas a los lugares donde se aplica la carga; se verificó que en aplicaciones reales esto también es aconsejable. En cuanto a las zonas de medición, estas también influyen en la localización obtenida de los defectos, producto de que los errores en las mediciones pueden ser de diferentes magnitudes según el lugar donde se realiza la medición.
- (iii) En aplicaciones reales es posible usar zonas de medición de dimensiones pequeñas (menores al 10% del total del contorno libre para medir), sólo si éstas se posicionan cercanas al defecto. Producto de los errores en las mediciones, se pueden presentar sesgos en la detección al usar zonas de medición pequeñas y alejadas de los defectos. Esta situación tiende a empeorar cuando la posición de la carga está alejada del defecto real.
- (iv) La validación de los esquemas de carga y, especialmente, de las condiciones de contorno para los problemas de detección de defectos en las aplicaciones reales

es de suma importancia, debido a que los desplazamientos son muy sensibles a las variaciones en estas condiciones y podría ser el caso, que los efectos sobre los desplazamientos producidos por los defectos se mezclen o se superpongan con los efectos causados por los problemas en las modelaciones computacionales.

- (v) El método en su versión adaptativa posee cualidades muy útiles para ser usadas en aplicaciones prácticas, pues al utilizar información proveniente de varias posiciones de carga y de zonas de medición, entrega mejores resultados de la detección del defecto que la versión original del método.

7.4. Sugerencias para futuras investigaciones

En este trabajo se han presentado algunos aspectos a considerar en la evaluación de defectos en aplicaciones 2D simples. Sin embargo, sería necesario ampliar la investigación y tratar otros temas que no se han tomado en cuenta y que contribuirían a completar los resultados obtenidos. Como sugerencias para futuras líneas de investigación en el campo que abarca esta Tesis se proponen:

- (i) El cálculo de medidas de tendencia central para los resultados de los experimentos y la repetición de éstos (realizaciones experimentales) permiten obtener resultados más confiables de las mediciones y advertir de la presencia de fenómenos de tipo aleatorio y sistemático, pero para un procedimiento experimental completo sería necesario realizar algún tipo de diseño estadístico de experimentos con el objetivo de garantizar la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan de estos estudios.
- (ii) Existe una cantidad limitada de literatura relacionada con métodos estáticos de detección de daños y defectos que detallen la situación real de esos daños. En general, los daños o defectos más comunes en el acero incluyen tornillos sueltos, soldaduras rotas y disminución de la sección por la corrosión, entre otras. Para evaluar el desempeño de las técnicas de detección en aplicaciones prácticas, se

requiere una estrategia de simulación más realista de los defectos y estudiar estructuras complejas y mayores.

- (iii) En general, los daños o defectos no son únicos en una estructura, luego, sería de gran utilidad el estudio de la detección de múltiples daños o defectos en aplicaciones prácticas, pues el método de detección no está limitado a una sola inclusión.
- (iv) Plantear el método de detección de defectos para elementos del tipo *frame* (1D), podría tener un campo de aplicación más amplio que para problemas bidimensionales. También sería necesaria la implementación del método en estructuras tridimensionales, pues la derivación teórica del método es similar a la realizada para problemas bidimensionales.

BIBLIOGRAFIA

- Areny, R. P. (2008). *Sensores y acondicionadores de señal* (Cuarta ed.). Marcombo.
- Bakhary, N. (2010). Structure damage detection using neural network with multi-stage substructuring. *Advances in Structural Engineering*, 13, 95–110.
- Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A., & Esfandiari, A. (2005). A structural damage detection method using static noisy data. *Engineering Structures*, 27, 1784–1793.
- Callister, W. D. (2006). *Materials science and engineering: An introduction* (Séptima ed.). USA: Wiley.
- Choi, I., Lee, J., Choi, E., & Cho, H. (2004). Development of elastic damage load theorem for damage detection in a statically determinate beam. *Computers and Structures*, 82, 2483–2492.
- Cooper, W. D., & Helfrick, A. D. (1991). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición* (Primera ed.). Naulcalpan de Juárez, Edo. de México: Prentice Hall Hispanoamérica.
- Gutiérrez, S., & Mura, J. (2008). Small amplitude homogeneization applied to inverse problems. *Computational Mechanics*, 41(5), 699–706.
- Gutiérrez, S., & Mura, J. (2010). An adaptative procedure for defect identification problems in elasticity. *Comptes Rendus Mecanique*, 402–411.
- He, K., & Zhu, W. (2011). Structural damage detection using changes in natural frequencies: Theory and applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 305(1).
- Hellier, C. (2001). *Handbook of nondestructive evaluation* (Primera ed.). USA: McGraw-Hill Professional.

JCGM. (2008a). *Evaluation of measurement data guide to the expression of uncertainty in measurement*.

JCGM. (2008b). *International vocabulary of basic and general terms in metrology (vim)*.

Kirkup, & Frenkel. (2006). *An introduction to uncertainty in measurement* (Primera ed.). New York, USA: Cambridge University Press.

Kyowa measuring instruments. (2010).

Lee, E., Kim, G., Lee, M., Bae, C., & Eun, H. (2008). A study on performance assessment of damaged beam based on static approach. *International Journal of modern physics B*, 82(9-11), 1813–1818.

Lira, I. (2002). *Evaluating the measurement uncertainty* (Primera ed.). Philadelphia, USA: Taylor y Francis.

Liu, G., & Han, X. (2003). *Computational inverse techniques in nondestructive evaluation* (Primera ed.). USA: CRC Press.

Matlab instrument control toolbox user guide. (2010).

Mix, P. E. (2005). *Introduction to nondestructive testing: A training guide* (Segunda ed.). USA: Wiley-Interscience.

Mura, J., & Gutiérrez, S. (2011). Detection of weak defects in elastic bodies through small amplitude homogenization. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 19(2), 233–250.

Operation manual gp-ib interface, portable data logger model tds-302. (1989).

Operation manual, portable data logger model tds-302. (1989).

Pironneau, O., Morice, J., Le-Hyarc, A., & Ohtsuka, K. (2011). *Freefem++, código y manual de usuario*.

Prologix gpib-usb controller user manual. (2009).

Rabinovich, S. (2009). *Evaluating measurement accuracy* (Primera ed.). New York, USA: Springer.

Radzieński, M., & Krawczuk, M. (1997). Experimental verification and comparison of mode shape-based damage detection methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 181(1), 718–723.

Salawu, O. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: A review. *Engineering Structures*, 19(9), 718-723.

Shull, P. J. (2002). *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications* (Primera ed.). USA: CRC Press.

Strain gauge-type transducers. (2002).

Theory reference for the mechanical apdl and mechanical application. (2009).

Tilley, R. (2008). *Defects in solids* (Primera ed.). USA: John Wiley and Sons.

Vogel, C. R. (2002). *Computational methods for inverse problems* (Primera ed.). Philadelphia, USA: SIAM.

Webster, J. G. (1998). *The measurement, instrumentation and sensors handbook* (Primera ed., Vol. II). Florida, USA: CRC Press LLC.

Worden, K., & Dulieu-barton, J. (2004). An overview of intelligent fault detection in systems and structures. *Structural Health Monitoring*, 3, 85–98.

Yan, Y. (2007). Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 2198–2211.

ANEXO A. CÓDIGO BASE PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

```

1 % =====
% Programa MATLAB para adquirir mediciones desde el TDS-302 usando Prologix
3 % GPIB-USB Controller 6.0
% El TDS-302 se configura como 'ADDRESSABLE'.
5 % por Andres Vito Bahamonde
% En base a sample de la pagina prologix.biz
7 % Octubre de 2010
% version 3
9 %% =====
% 1) PREPARA LA ADQUISICION
11 %=====
% Especifique el puerto serial virtual creado por el controlador USB.
13 TDS = serial('COM3');
% Prologix GPIB-USB Controller 6.9 requiere CR como terminador de comando,
15 % LF es opcional.
TDS.Terminator = 'CR/LF';
17 % Abre puerto serial virtual
fopen(TDS);
19 % Setear Prologix GPIB-USB como controlador
fprintf(TDS, '++mode 1');
21 % Direccin del instrumento (se debe colocar misma direccion en TDS)
fprintf(TDS, '++addr 12');
23 % Comando Leer y escribir encendido
fprintf(TDS, '++auto 1');
25
%% =====
27 % 2) SETEO DE CANALES
% =====
29 % Seteo del numero del canal (primer canal y ultimo canal)
fprintf(TDS, 'FH001');
31 fprintf(TDS, 'LH003');
% numero de canales a mostrar en pantalla (monitor y sub-monitor)
33 fprintf(TDS, 'MH001');
fprintf(TDS, 'SH002');
35 %% =====
% 3) ADQUISICION DE DATOS
37 % =====
% Se realiza ciclo de "M" mediciones cada "T" segundos

```

```

39 M=5;
   T=2;
41 % Setear el numero de canales en uso (de 1 a 10 para TDS-302)
   nch=3;
43 chls=zeros(nch,1); % guarda nombres de canales
   data=zeros(M,nch); % matriz para almacenar mediciones
45 for m=1:M
       % Se envia orden a TDS para iniciar la medicion
47   fprintf(TDS,'ST');
       % Lee las mediciones y las almacena
49   aux='';
       aux2='';
51   for i=1:nch
       aux=fscanf(TDS);
53   aux2=aux(4);
       if aux2=='+'
55       sign=1;
       else
57       sign=-1;
       end
59   chls(i,1)=str2num(aux(3));
       data(m,i)=sign*str2num(aux(5:10));
61   if i==nch
       fscanf(TDS); % fin de medicion en canal
63   end
   end
65   f=figure;
       plot(data(1:m,1),data(1:m,2));
67   h= uicontrol('Position',[20 20 200 40],'String','Esperar',...
       'Callback','uiresume(gcbf)');
69   uiwait(gcf,T);
       close(f);
71 end
   % Guarda matriz
73 save chls
   save data

```

ANEXO B. EXTRACTOS DEL MANUAL DEL REGISTRADOR DE DATOS

B.1. Resolución del registrador de datos TDS-302

- ⊙ Strain Measurement
- Bridge Voltage: DC 2.00V (20msec. pulse)
- Applicable resistance: 60 ~ 1000Ω
- Accuracy: $\pm (0.05\% \text{ of reading} + 1 \text{ digit})$ (x1 range)
 $\pm (0.05\% \text{ of reading} + 10 \text{ digit})$ (x10 range)
- Resolution: 1×10^{-6} strain (x1 range)
 10×10^{-6} strain (x10 range)
- Zero Shift: 0.1×10^{-6} strain/°C or better
- Linearization: Compensated for quarter bridge 3-wire and half bridge common dummy (digital operation)

B.2. Cálculo de la sensibilidad del transductor de desplazamiento

- Direct Reading in mm Using Displacement Gauge with a Rated Output in mV/V
- Displacement $L = \{(F_1/F_2)/V_C\}\epsilon$
- Rated range $F_1 = 100 \text{ (mm)}$: Rated output $F_2 = 2.00 \text{ (mV/V)}$
- Carrier voltage of TDS-302 $V_C = 2.00 \text{ (v)}$
- Coefficient to be set $K_L = \{100/(2.00 \times 10^{-3})\} / 2.00 \times 10^{-6} = 0.025$
- Set coefficient to 「2.500」 and decimal point to 「2」.

B.3. Cálculo de la sensibilidad de la celda de carga

- Direct Reading in ton Using Load Cell with a Rated Output in strain
- Load $L = (F_1/F_2)$
- Rated load $F_1 = 200 \text{ (ton)}$: Rated output $F_2 = 1800 \text{ (μ)}$
- Coefficient to be set $K_L = \{200/(1800 \times 10^{-6})\} \times 10^{-6} = 0.1111 \dots$
- For high accurate reading, set coefficient to 「1.111」 and decimal point to 「1」.

ANEXO C. DESPLAZAMIENTOS EN CORTORNO DE APOYO EN PROBETA P1

C.1. Resultados para el esquema de carga C1

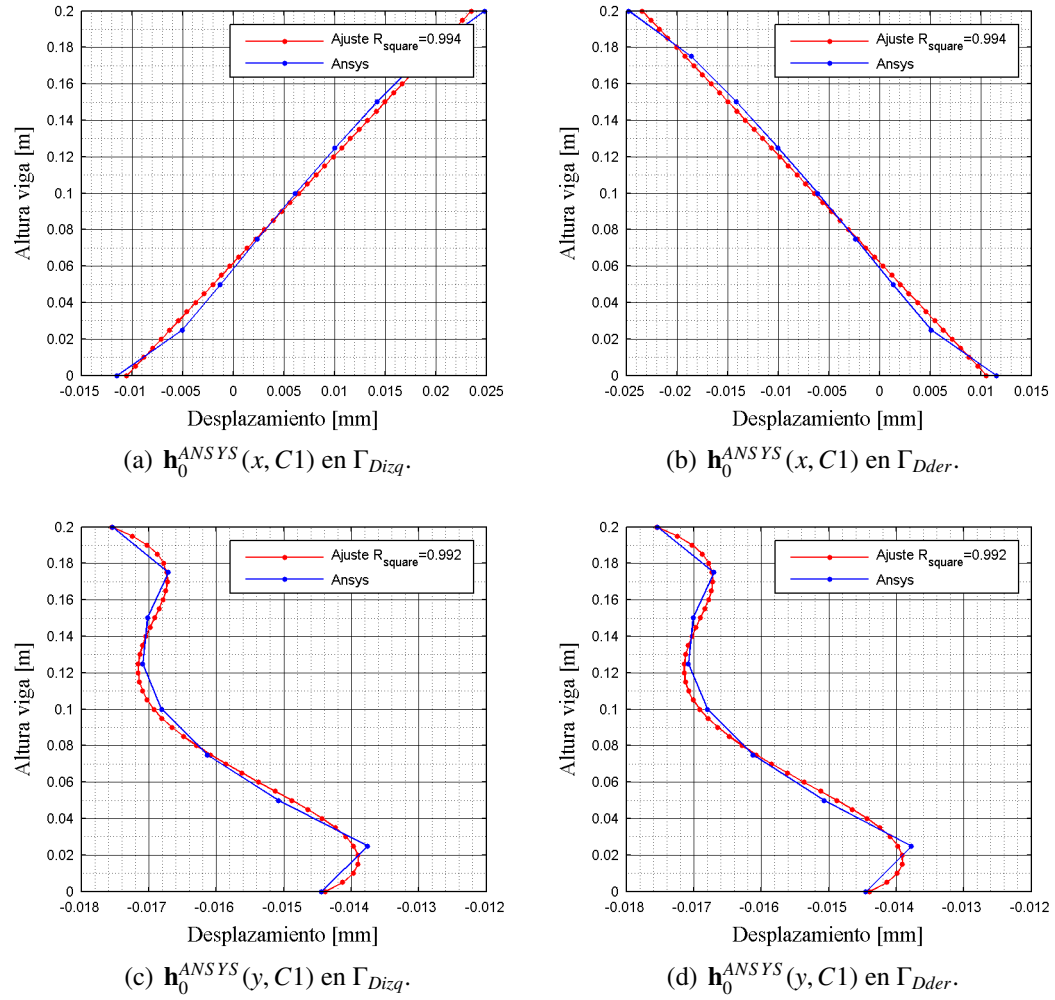


FIGURA C.1. Desplazamientos en el contorno de apoyo en la probeta P1 y carga C1.

C.2. Resultados para el esquema de carga C2

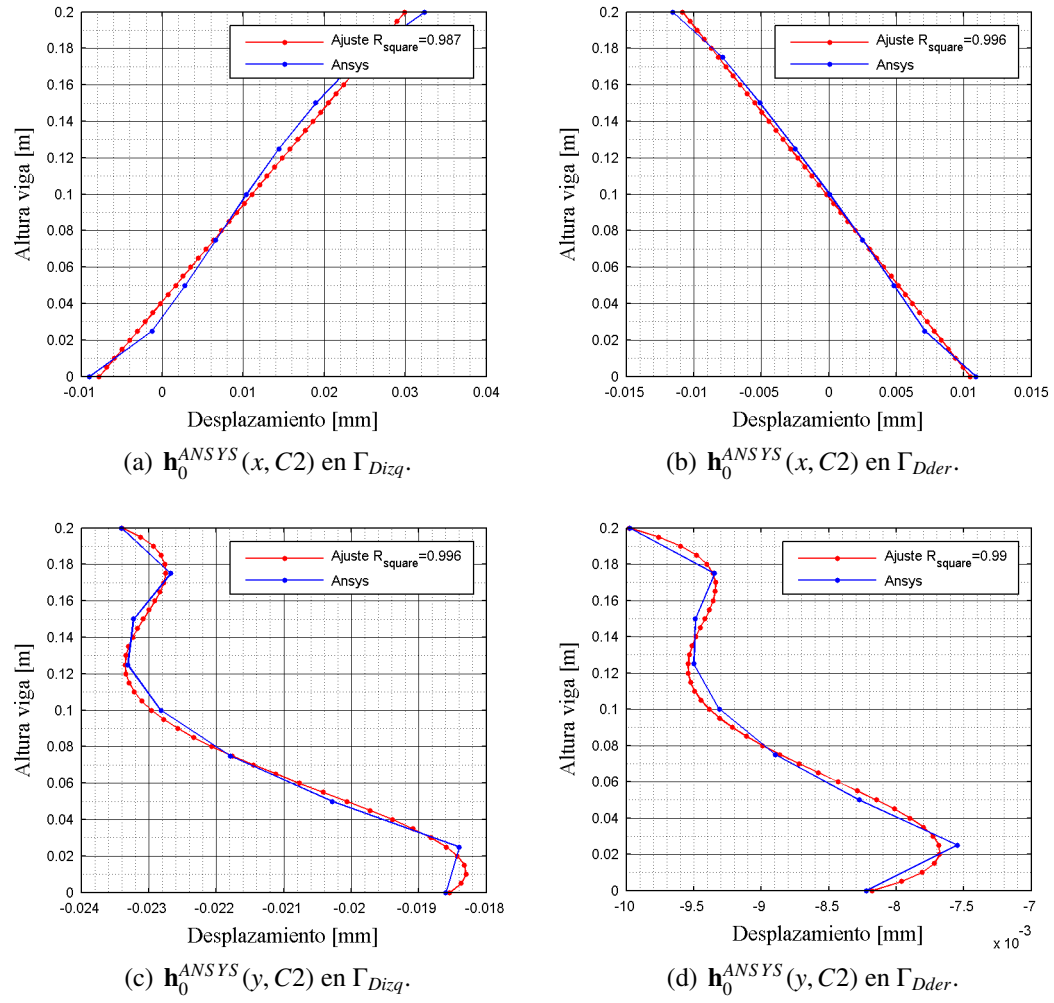
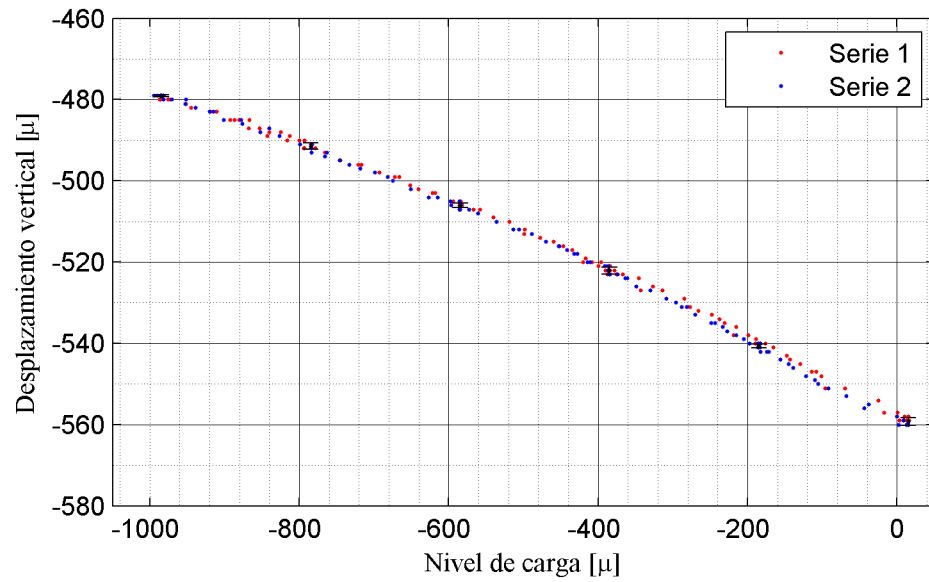


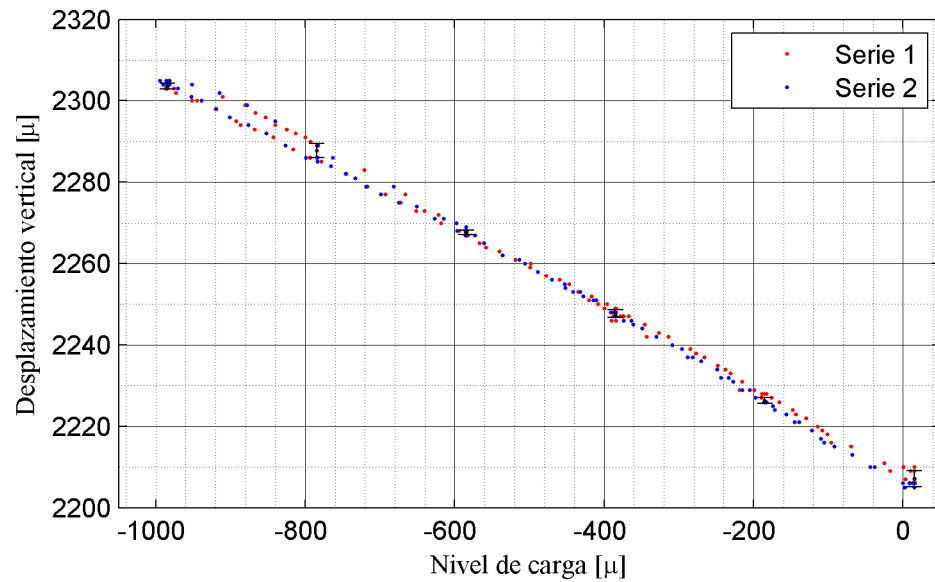
FIGURA C.2. Desplazamientos en el contorno de apoyo en la probeta P1 y carga C2.

ANEXO D. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN PLACAS BASE

D.1. Resultados para el experimento P1C1



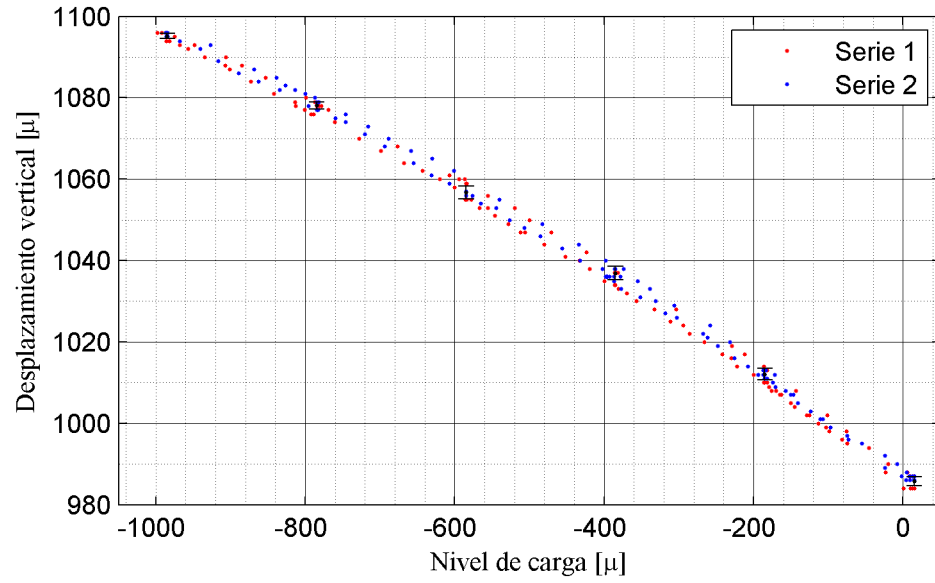
(a) Placa base izquierda.



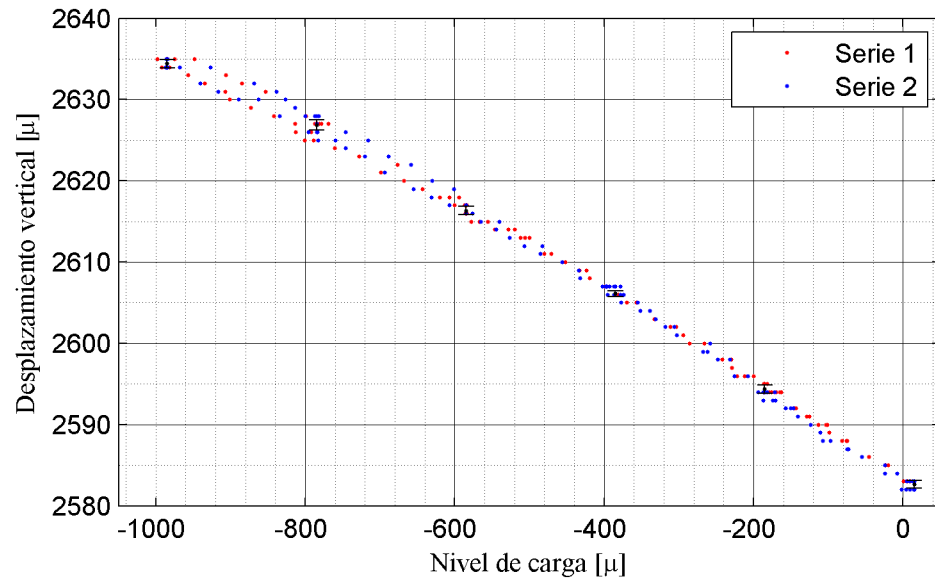
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.1. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P1C1.

D.2. Resultados para el experimento P1C2



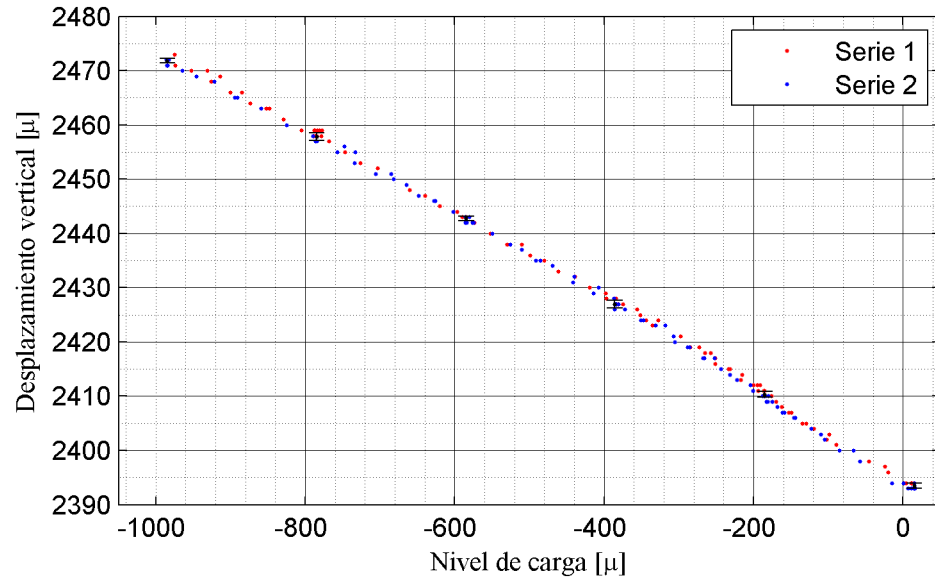
(a) Placa base izquierda.



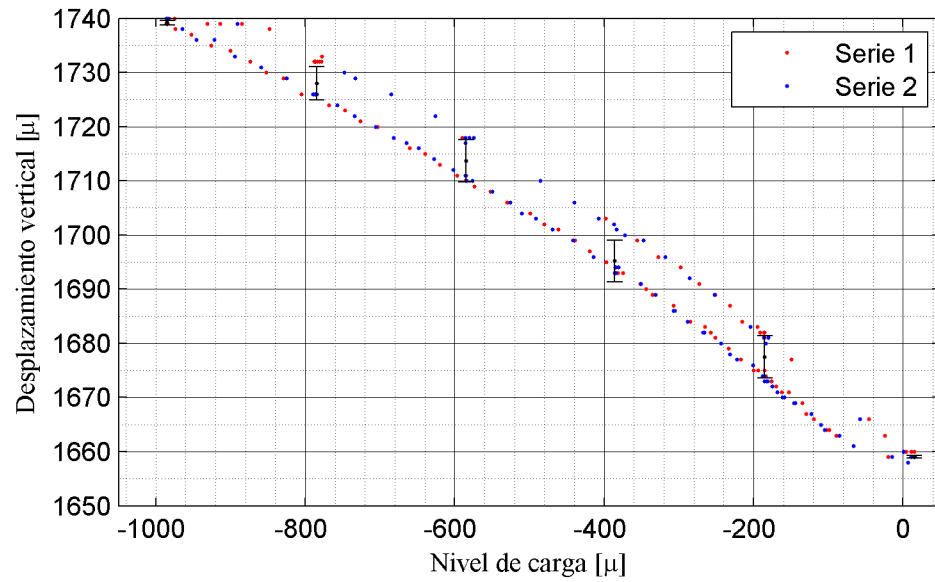
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.2. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P1C2.

D.3. Resultados para el experimento P2C1



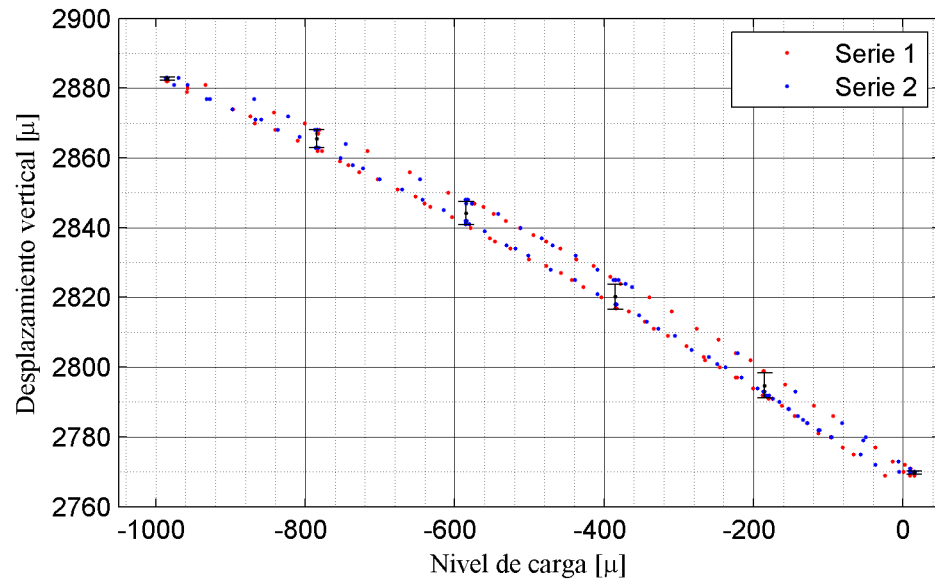
(a) Placa base izquierda.



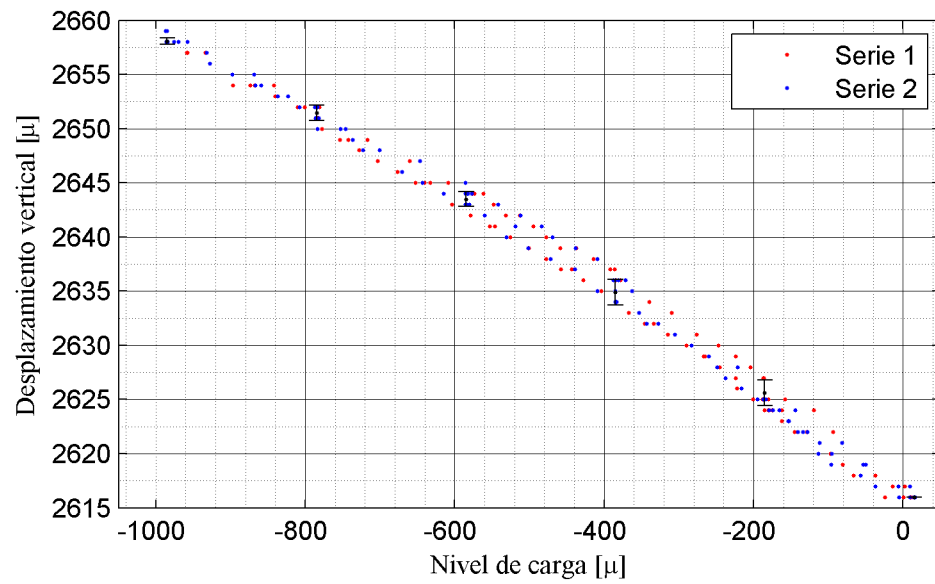
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.3. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P2C1.

D.4. Resultados para el experimento P2C2



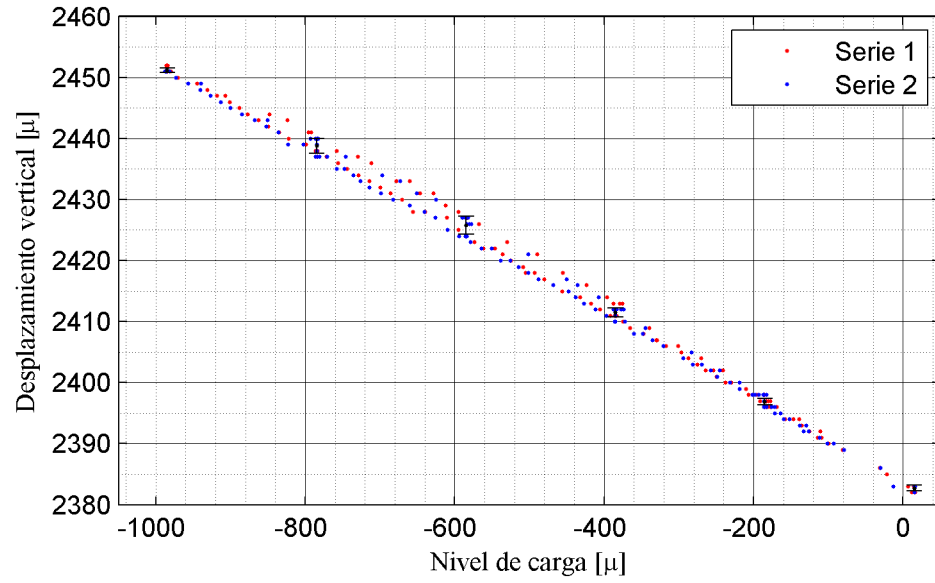
(a) Placa base izquierda.



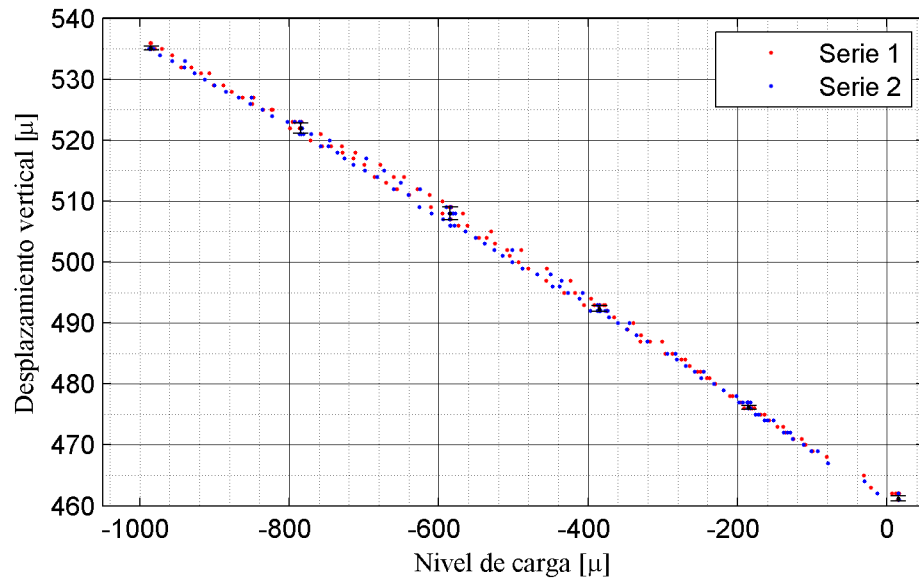
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.4. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P2C2.

D.5. Resultados para el experimento P3C1



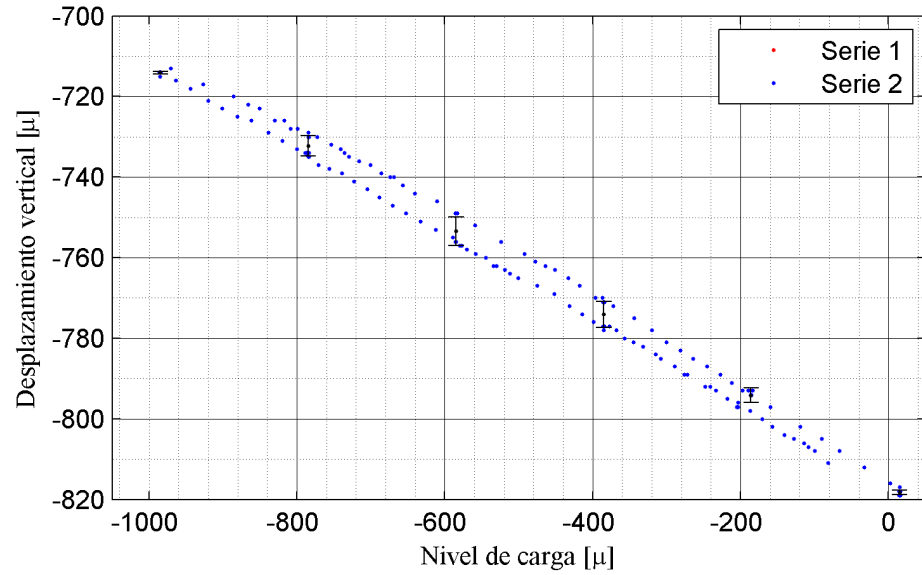
(a) Placa base izquierda.



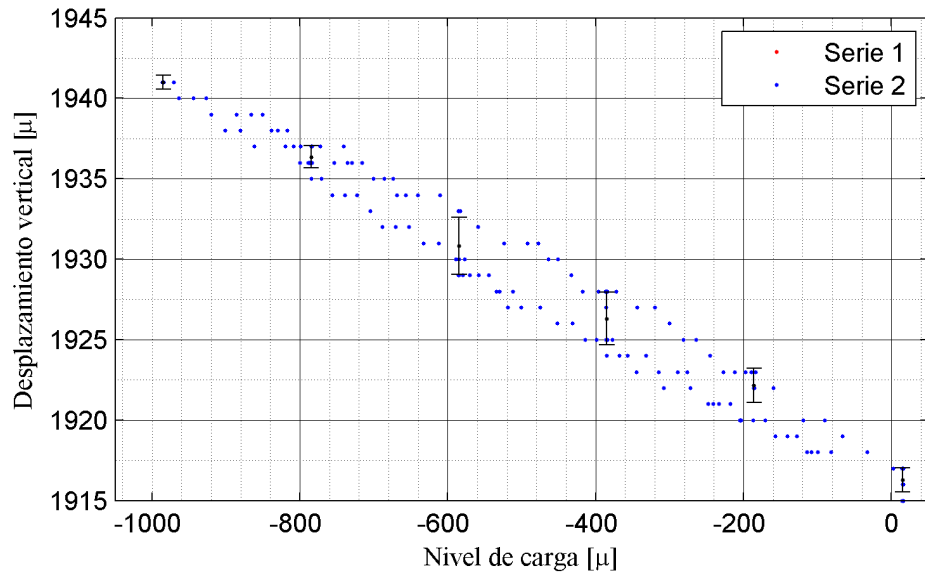
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.5. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P3C1.

D.6. Resultados para el experimento P3C2



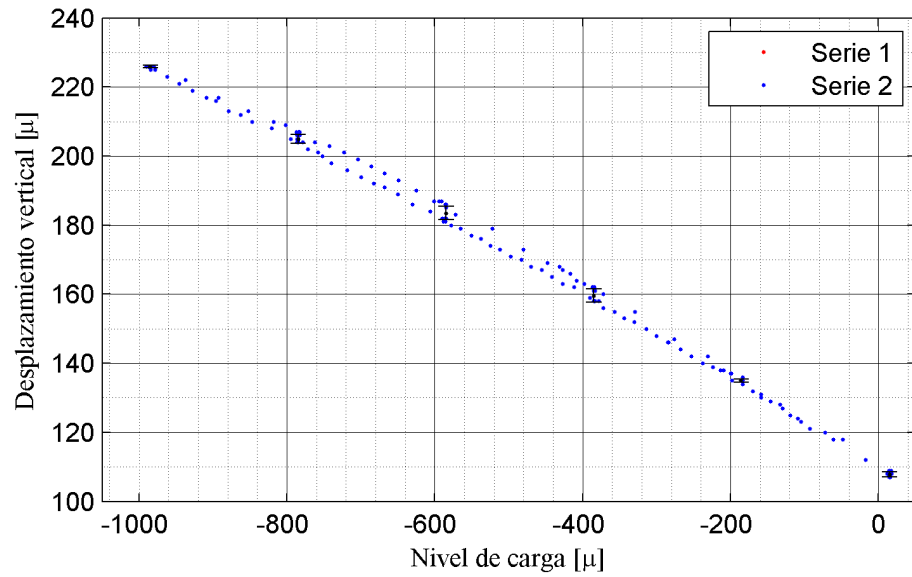
(a) Placa base izquierda.



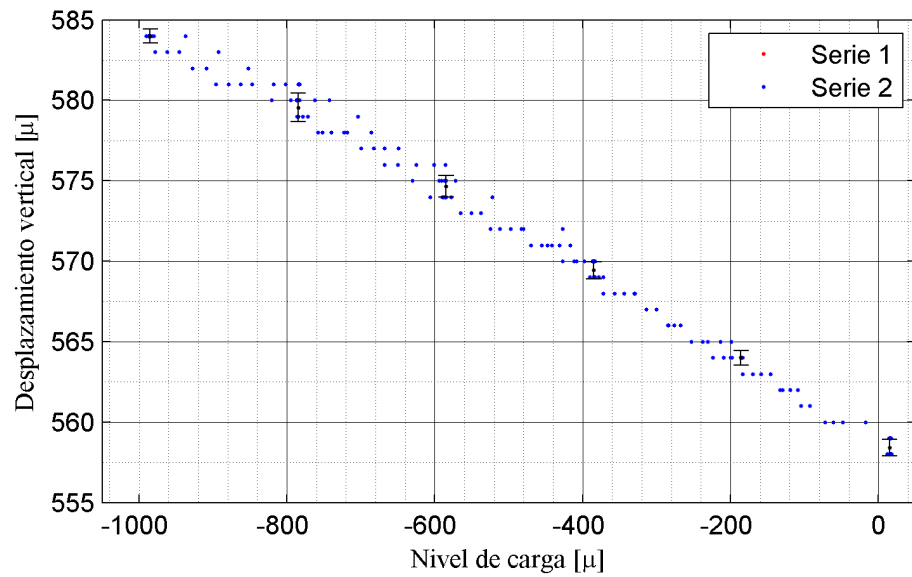
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.6. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P3C2. Nota: Se realizó una serie.

D.7. Resultados para el experimento P3C3



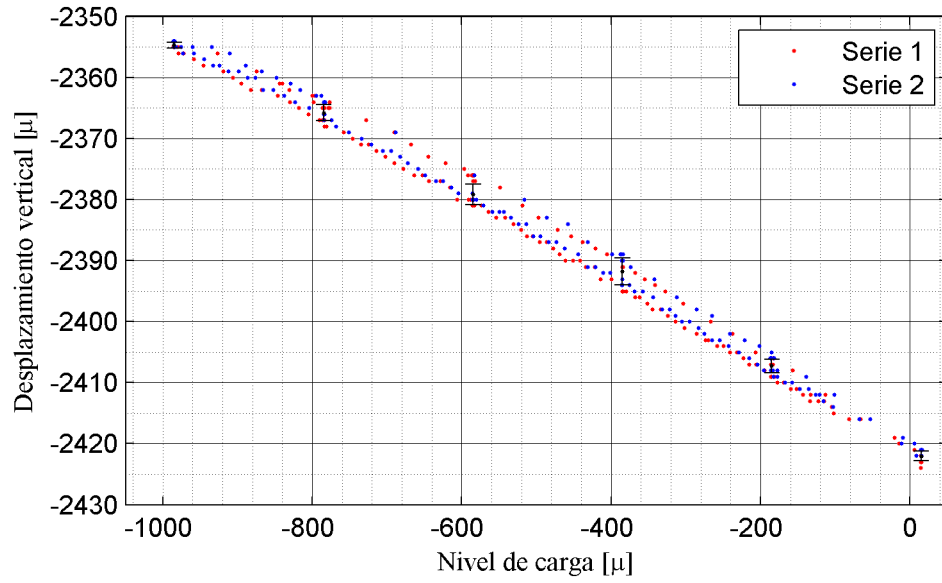
(a) Placa base izquierda.



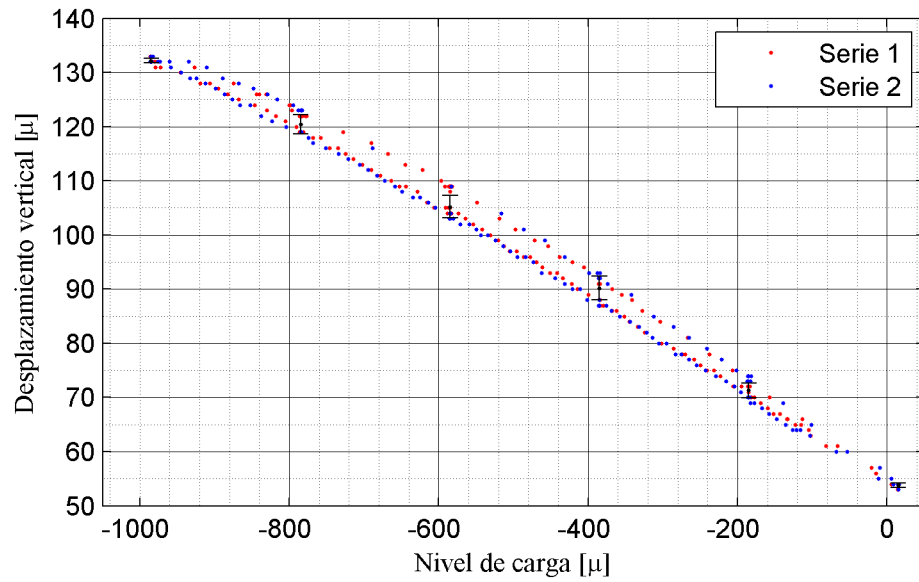
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.7. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P3C3. Nota: Se realizó una serie.

D.8. Resultados para el experimento P4C1



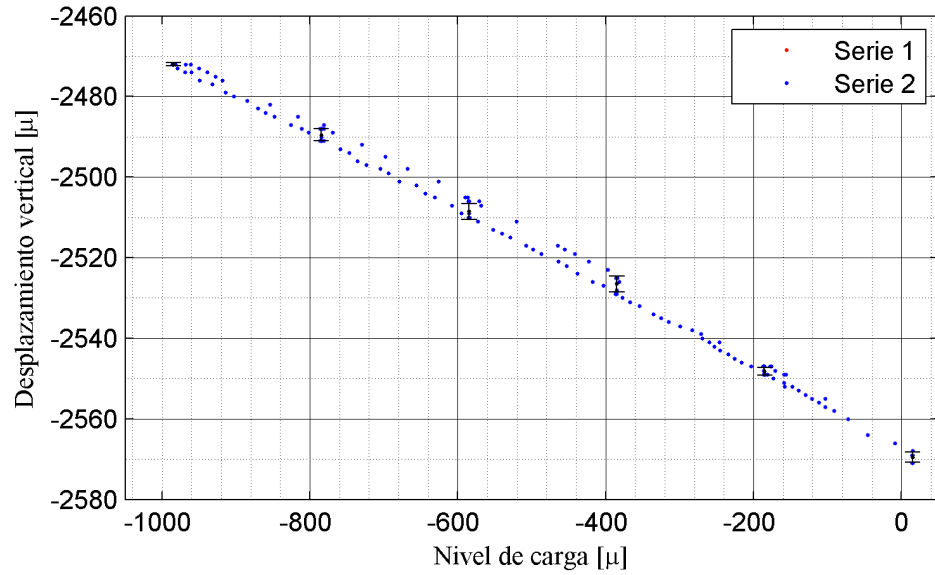
(a) Placa base izquierda.



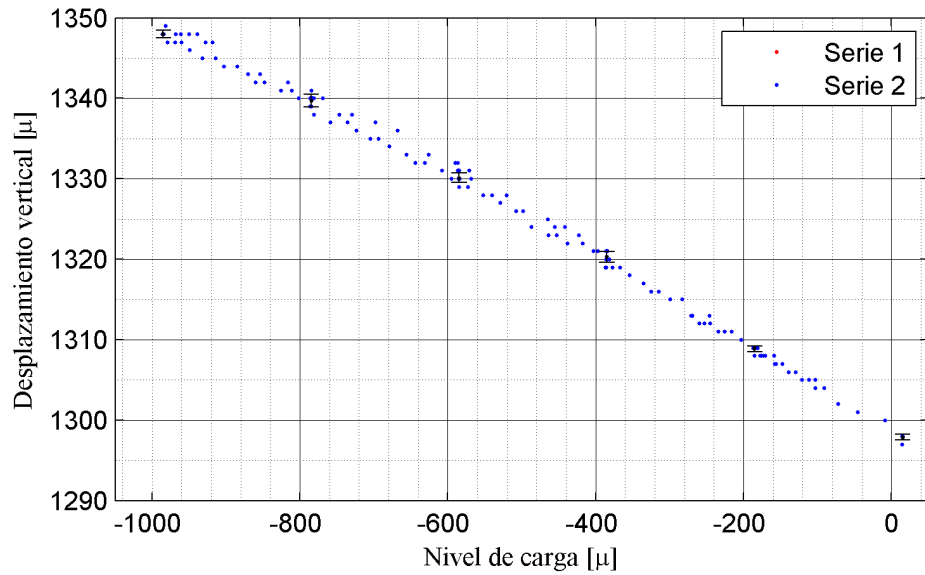
(b) Placa base derecha.

FIGURA D.8. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P4C1.

D.9. Resultados para el experimento P4C2



(a) Placa base izquierda.

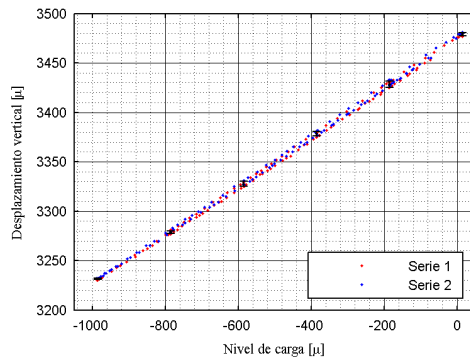


(b) Placa base derecha.

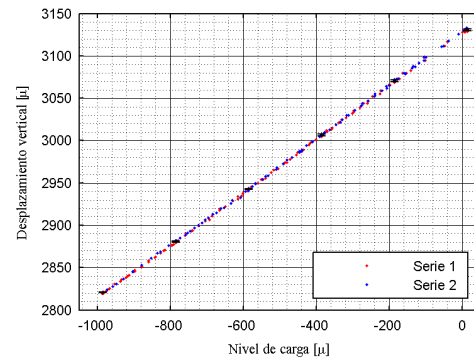
FIGURA D.9. Desplazamientos verticales de las placas base para el experimento P4C2. Nota: Se realizó una serie.

ANEXO E. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN LAS PROBETAS

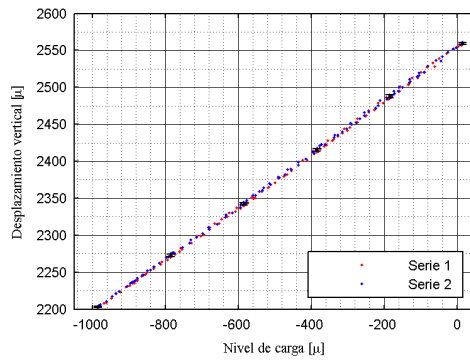
E.1. Resultados para el experimento P1C1



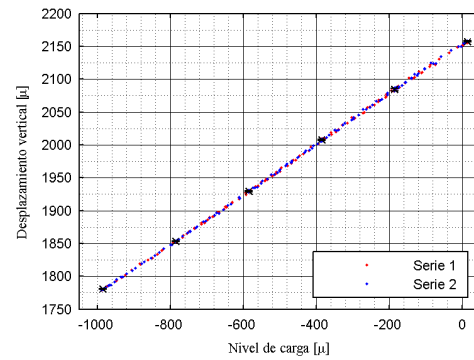
(a) Posición de medición P_4 .



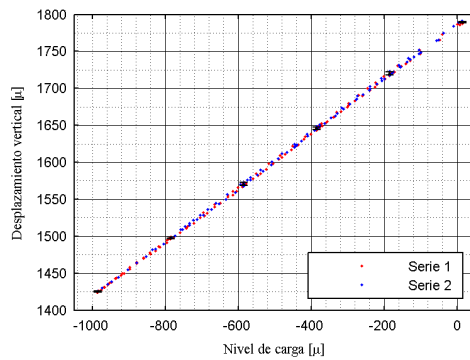
(b) Posición de medición P_6 .



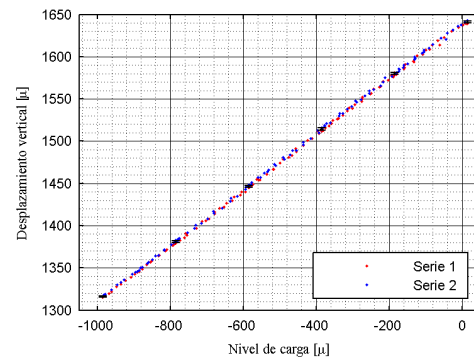
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

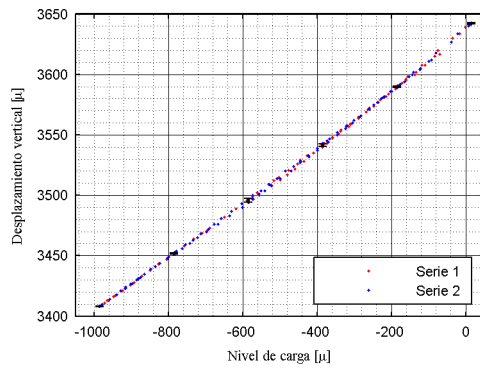


(e) Posición de medición P_{12} .

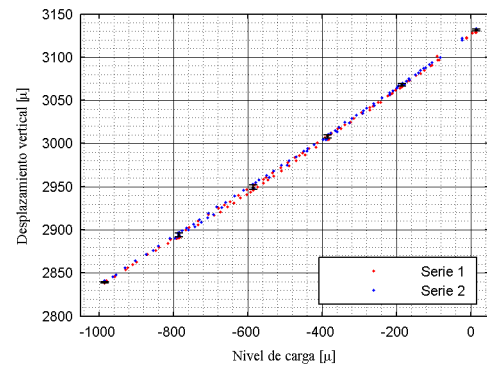


(f) Posición de medición P_{14} .

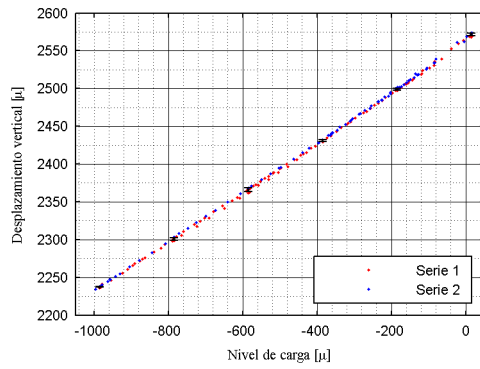
FIGURA E.1. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 1).



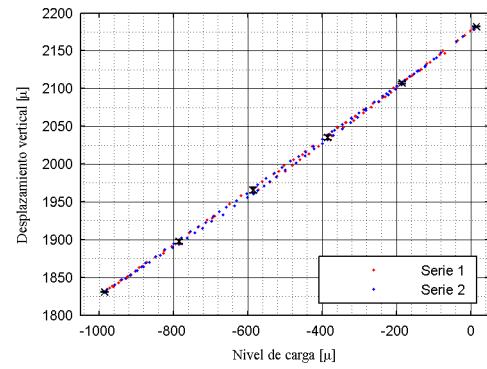
(a) Posición de medición P_4 .



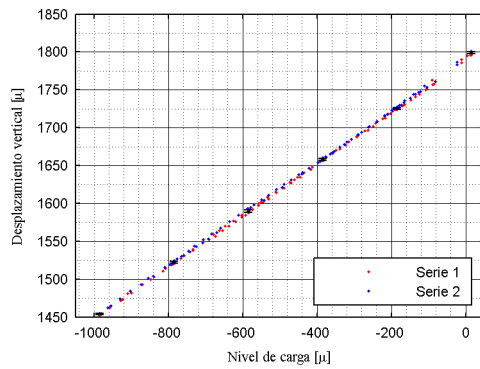
(b) Posición de medición P_6 .



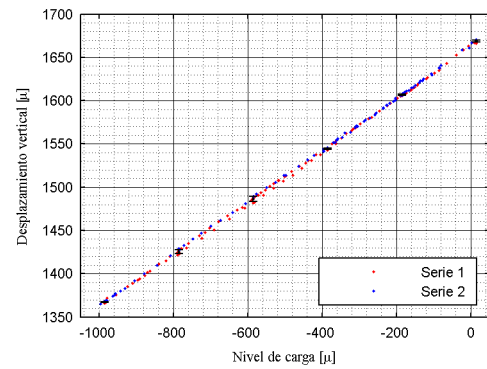
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

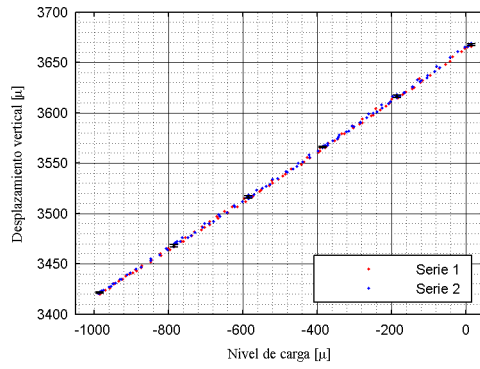


(e) Posición de medición P_{12} .

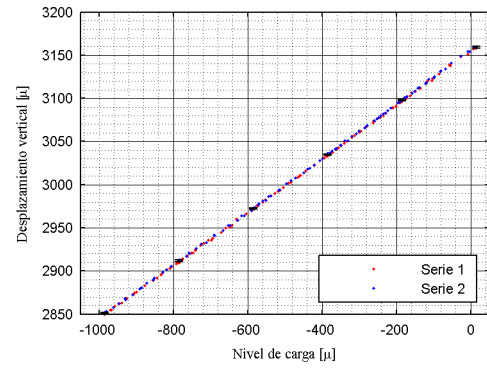


(f) Posición de medición P_{14} .

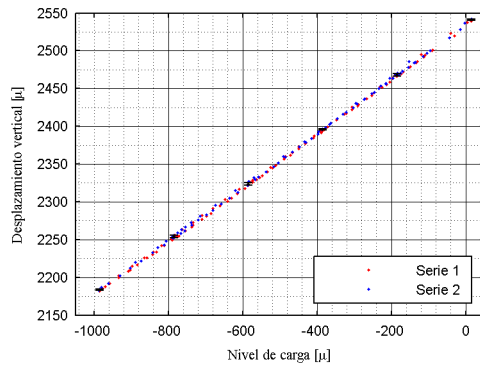
FIGURA E.2. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 2).



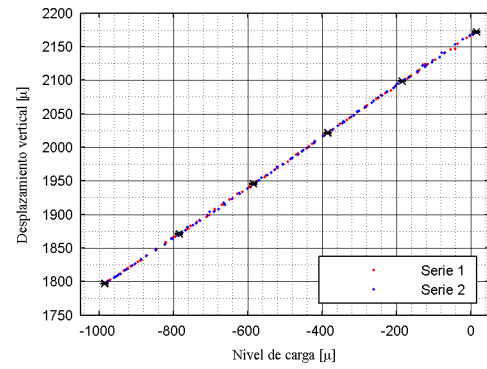
(a) Posición de medición P_4 .



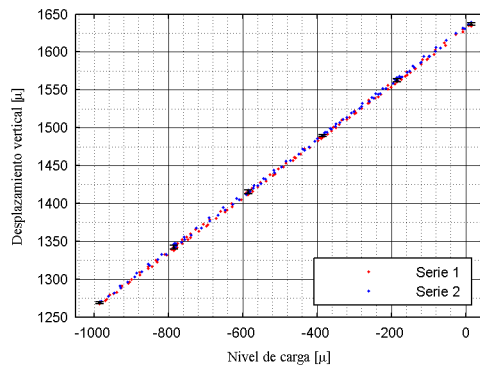
(b) Posición de medición P_6 .



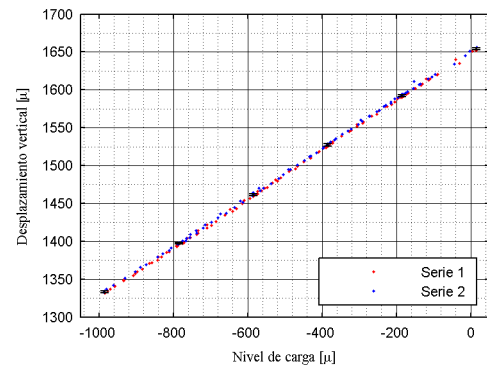
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

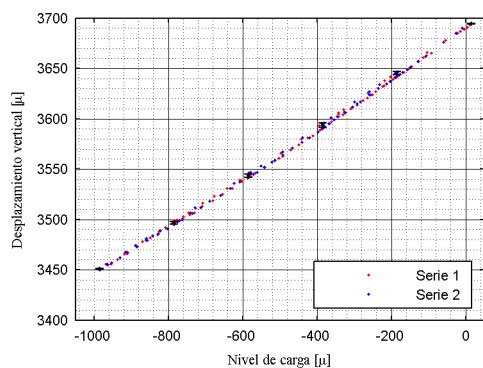


(e) Posición de medición P_{12} .

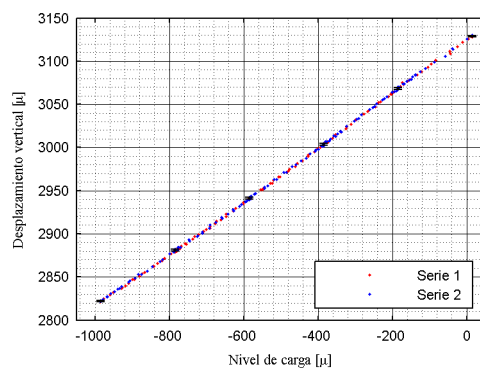


(f) Posición de medición P_{14} .

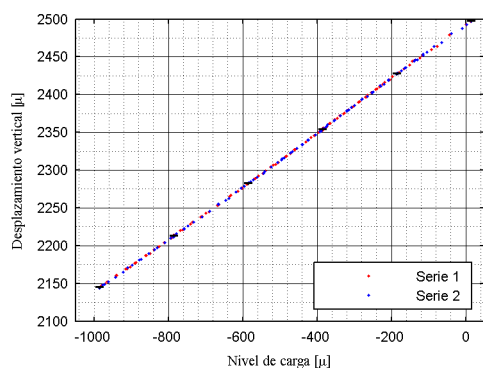
FIGURA E.3. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 3).



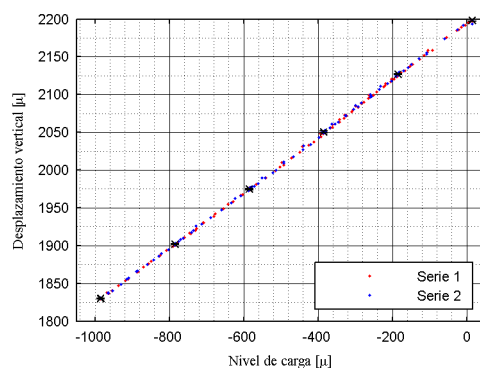
(a) Posición de medición P_4 .



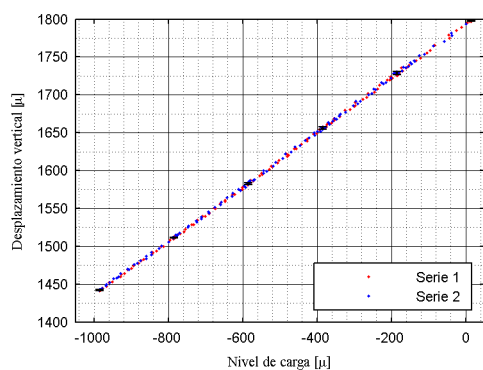
(b) Posición de medición P_6 .



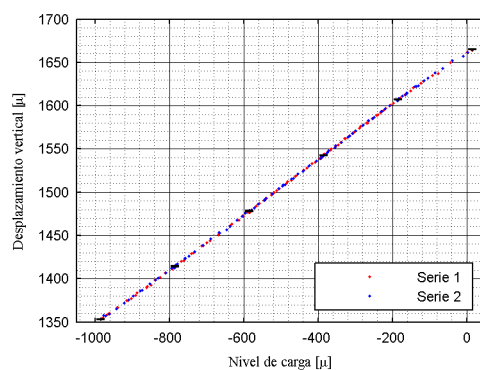
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

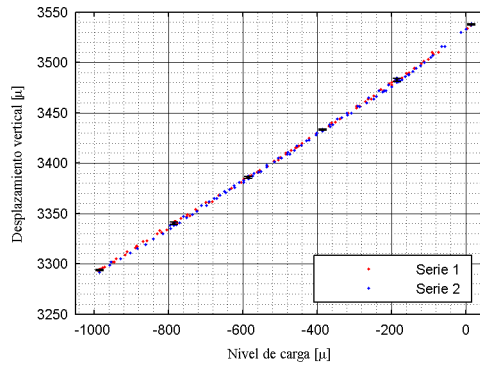


(e) Posición de medición P_{12} .

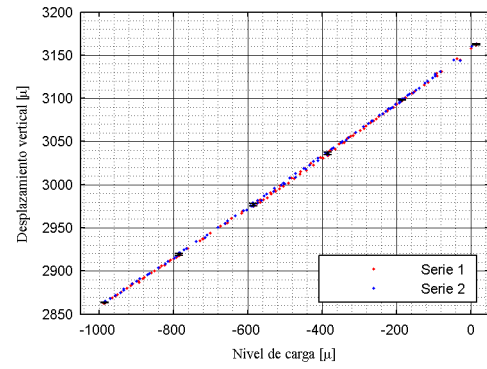


(f) Posición de medición P_{14} .

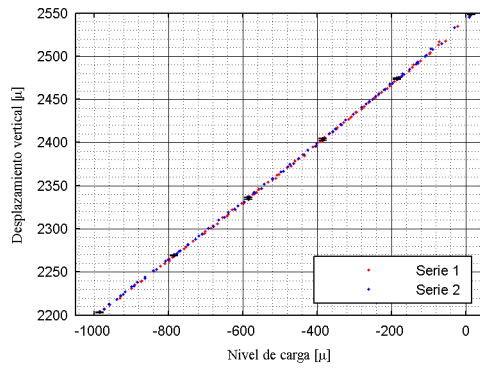
FIGURA E.4. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 4).



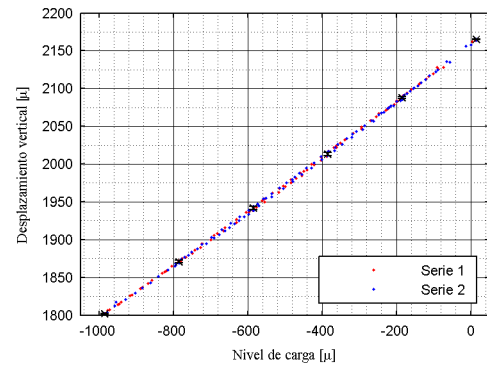
(a) Posición de medición P_4 .



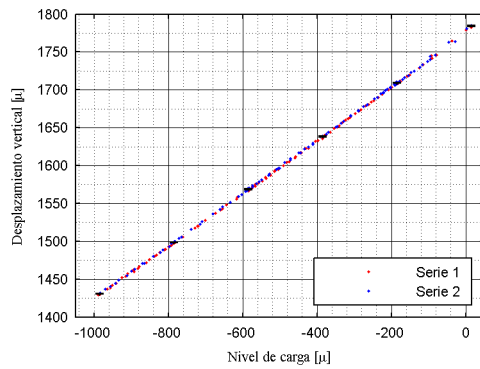
(b) Posición de medición P_6 .



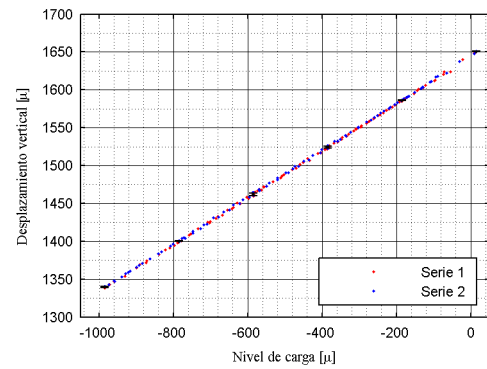
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

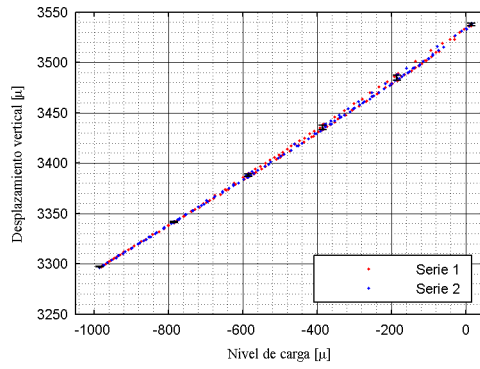


(e) Posición de medición P_{12} .

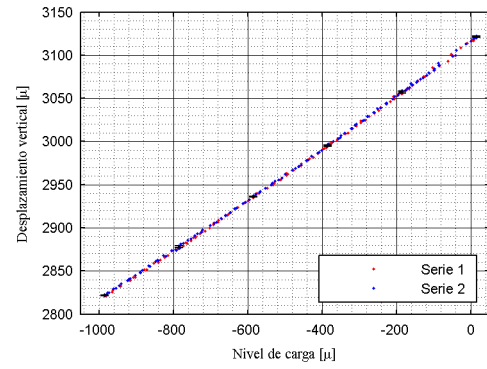


(f) Posición de medición P_{14} .

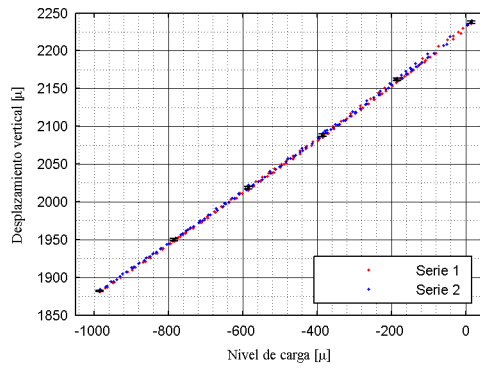
FIGURA E.5. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 5).



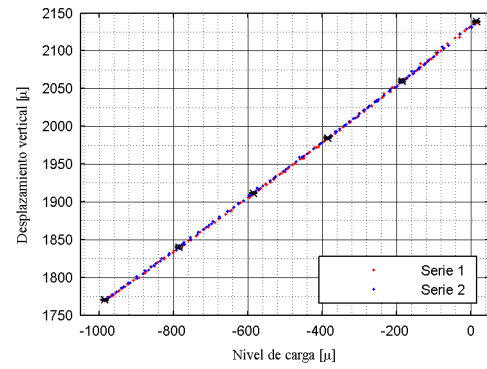
(a) Posición de medición P_4 .



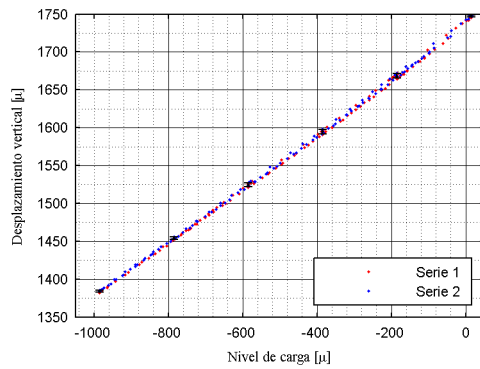
(b) Posición de medición P_6 .



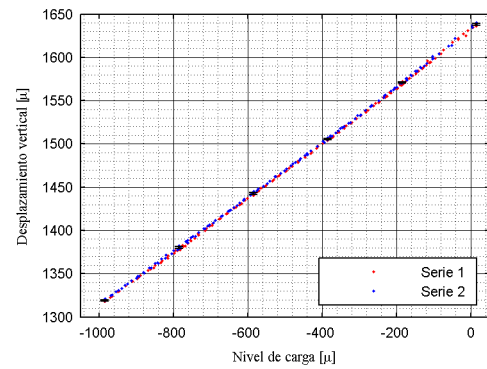
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

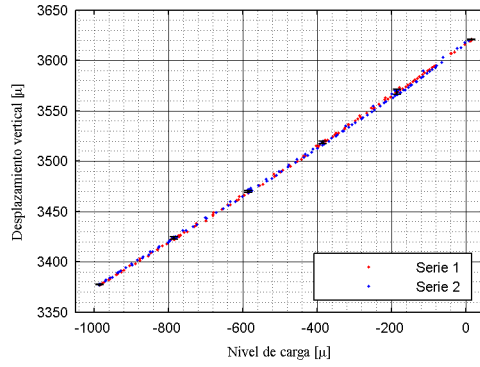


(e) Posición de medición P_{12} .

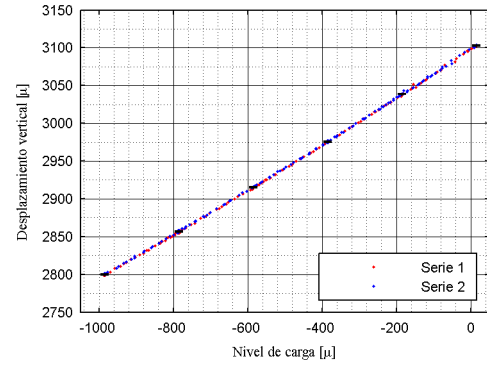


(f) Posición de medición P_{14} .

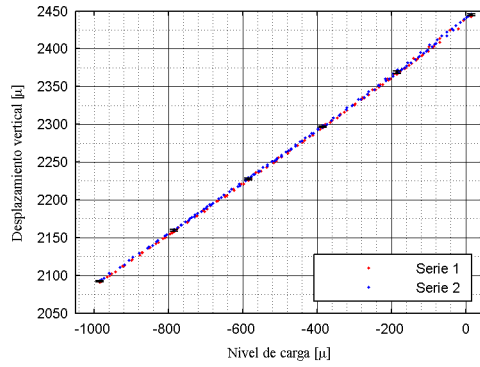
FIGURA E.6. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 6).



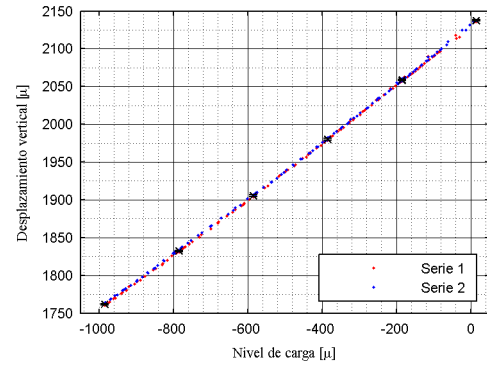
(a) Posición de medición P_4 .



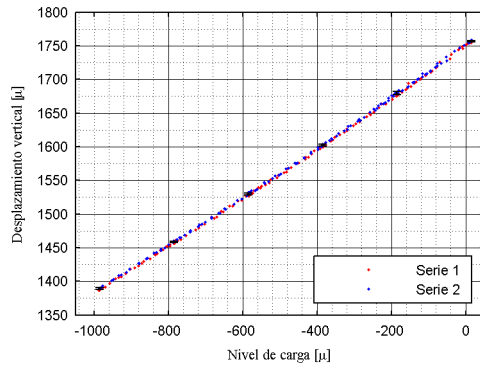
(b) Posición de medición P_6 .



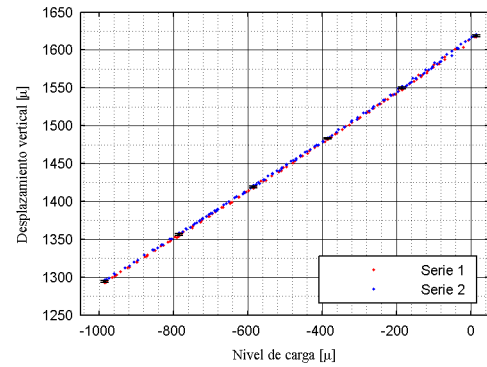
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

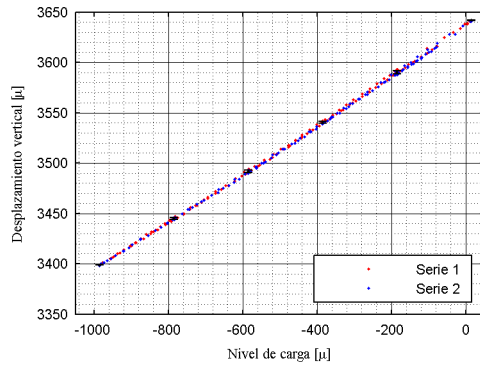


(e) Posición de medición P_{12} .

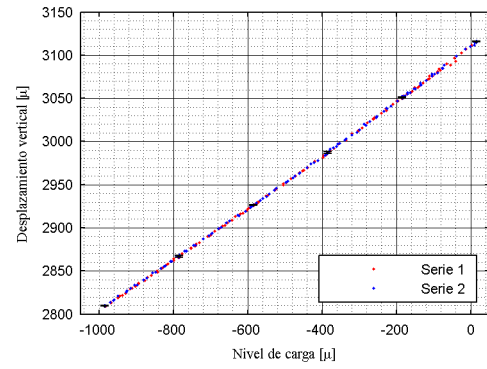


(f) Posición de medición P_{14} .

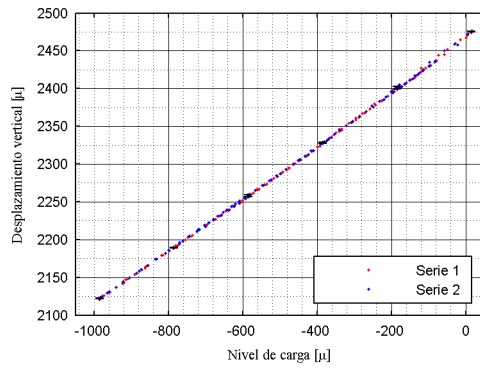
FIGURA E.7. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 7).



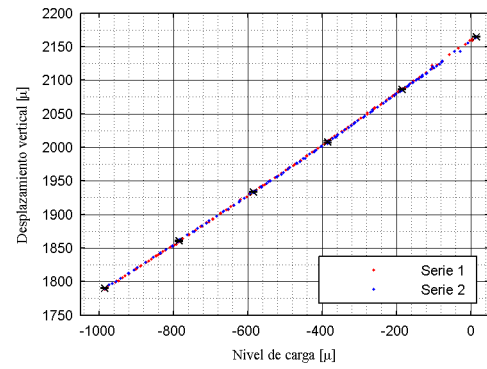
(a) Posición de medición P_4 .



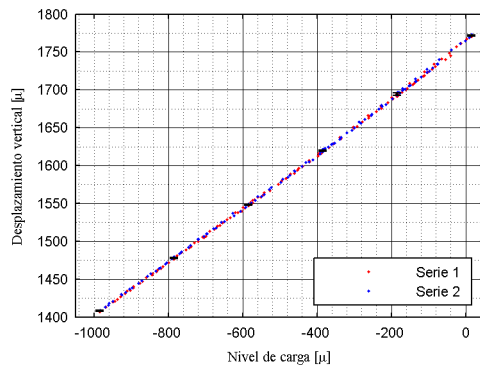
(b) Posición de medición P_6 .



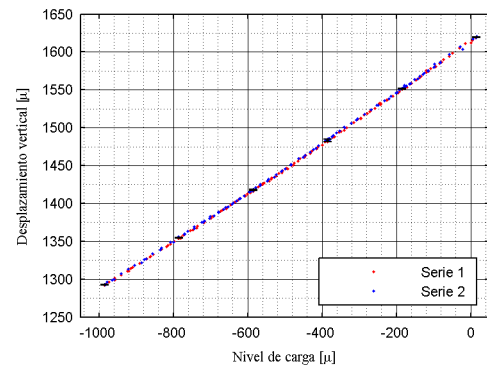
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

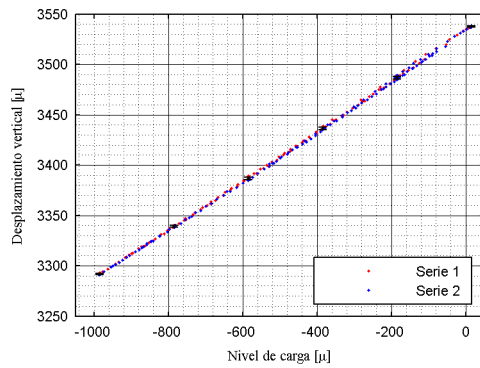


(e) Posición de medición P_{12} .

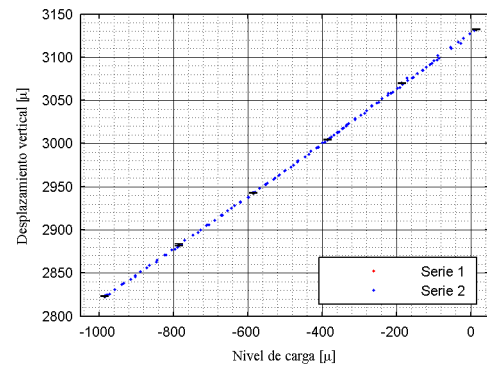


(f) Posición de medición P_{14} .

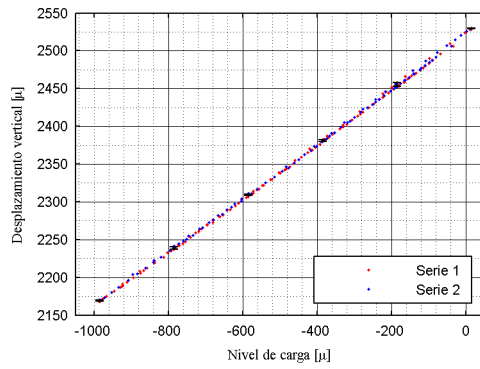
FIGURA E.8. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 8).



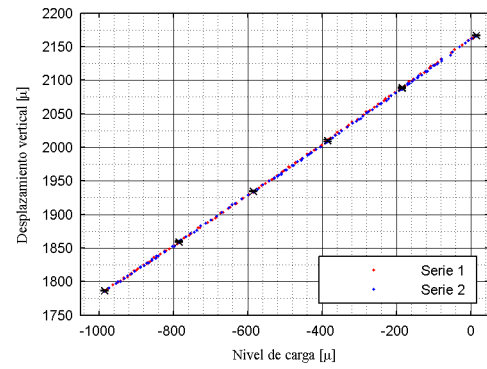
(a) Posición de medición P_4 .



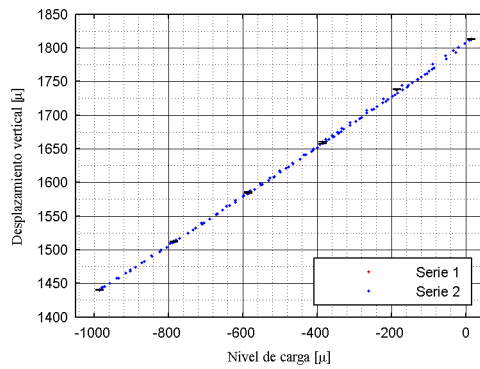
(b) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



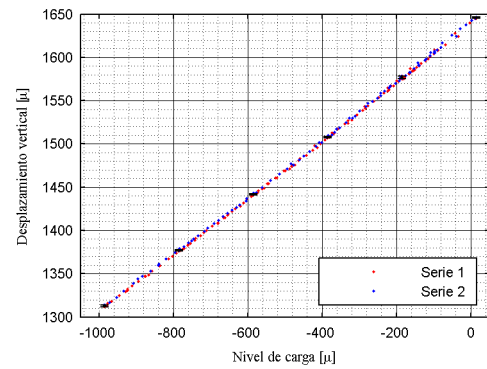
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

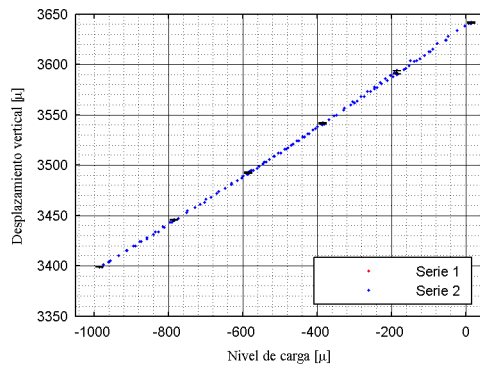


(e) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).

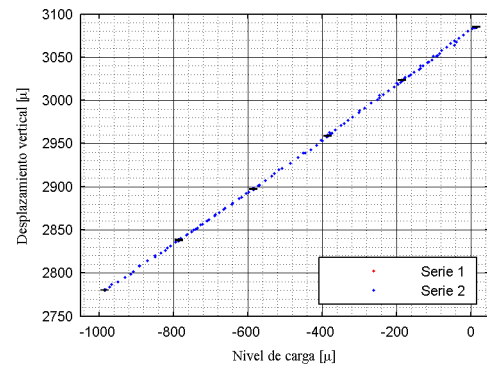


(f) Posición de medición P_{14} .

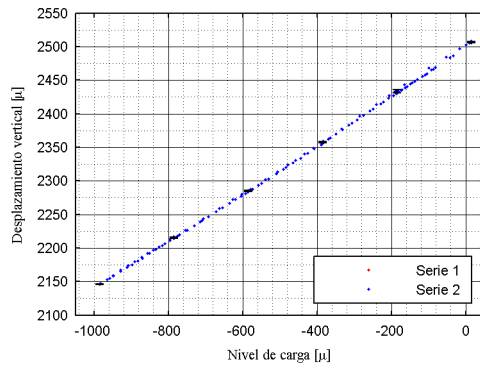
FIGURA E.9. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 9).



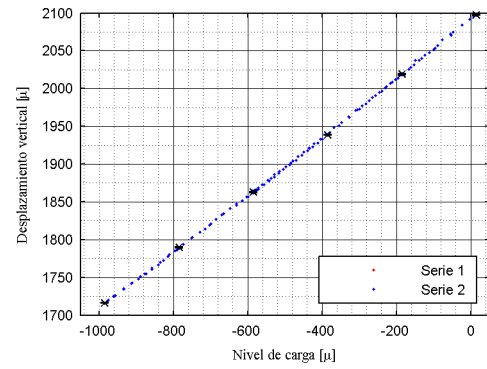
(a) Posición de medición P_4 .



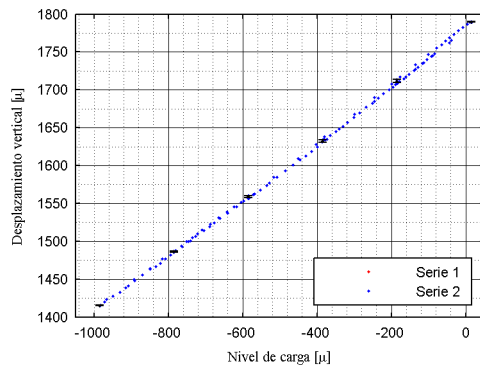
(b) Posición de medición P_6 .



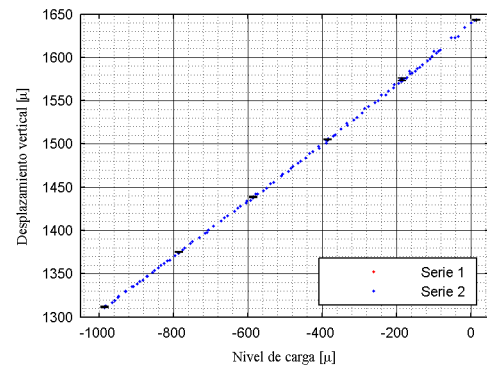
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .



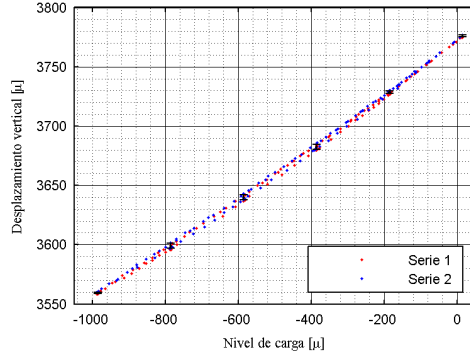
(e) Posición de medición P_{12} .



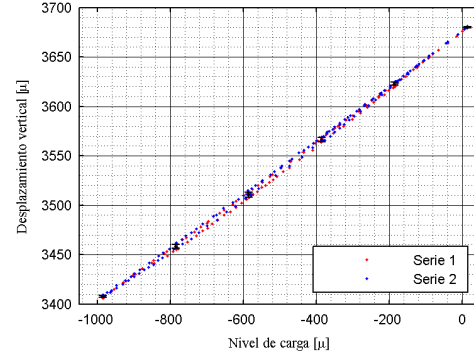
(f) Posición de medición P_{14} .

FIGURA E.10. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C1 (RE 10). Nota: Se realizó una serie.

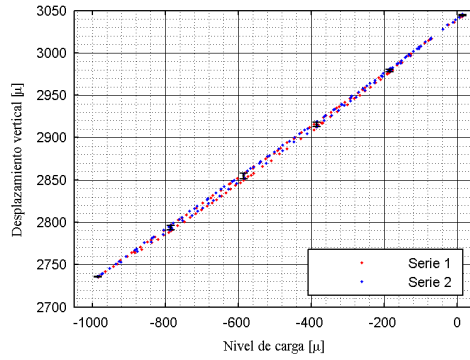
E.2. Resultados para el experimento P1C2



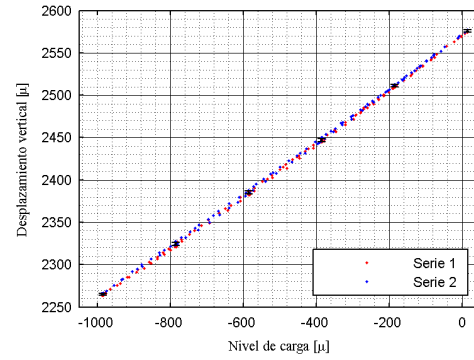
(a) Posición de medición P_2 .



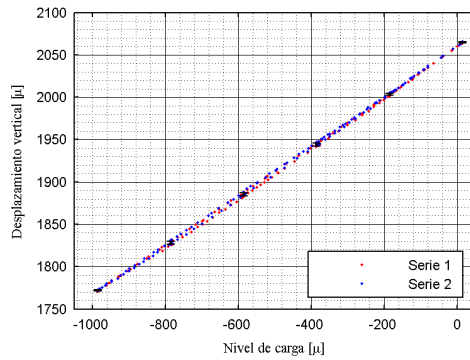
(b) Posición de medición P_4 .



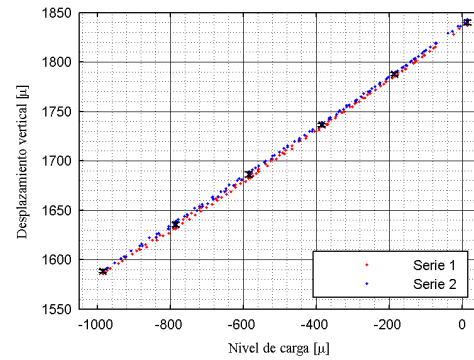
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

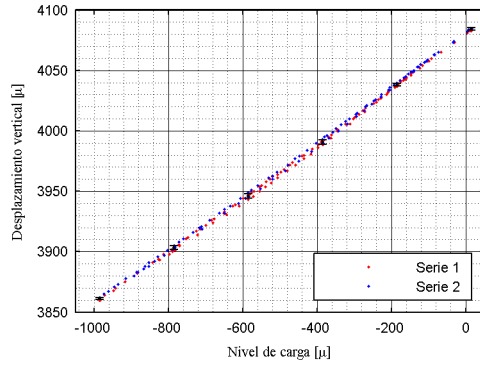


(e) Posición de medición P_{10} .

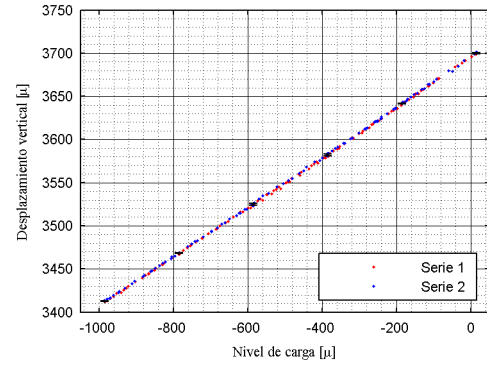


(f) Posición de medición P_{12} .

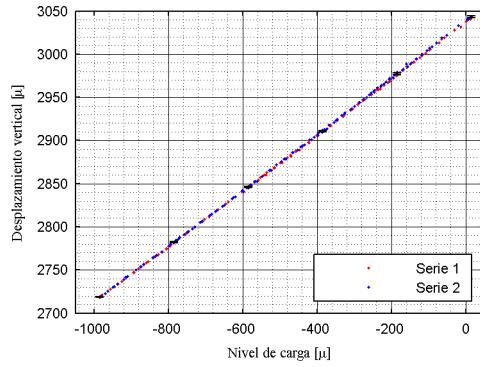
FIGURA E.11. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 1).



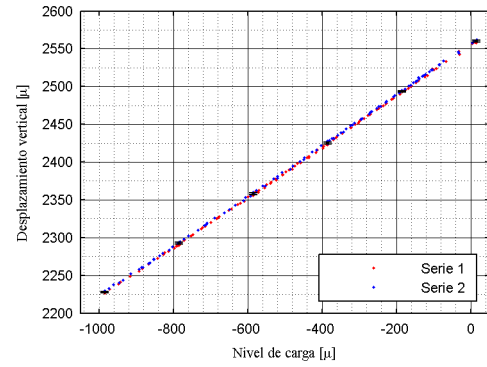
(a) Posición de medición P_2 .



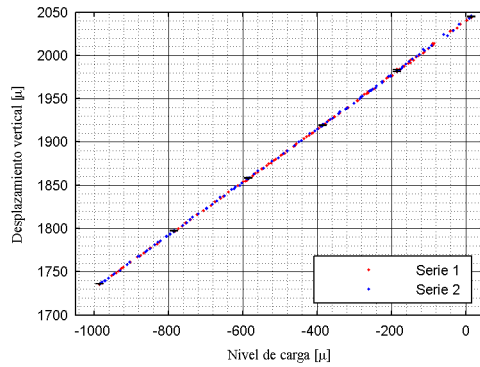
(b) Posición de medición P_4 .



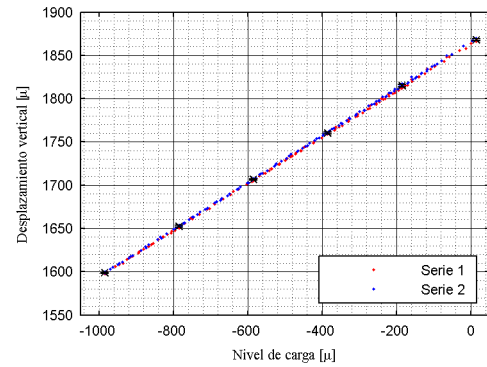
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

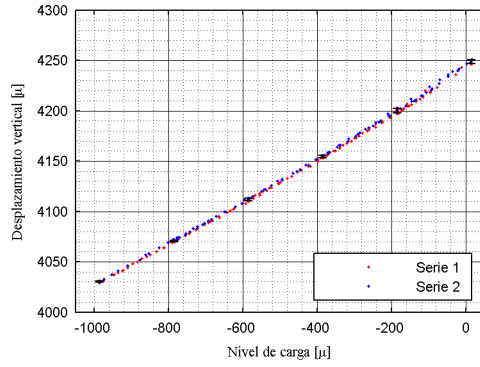


(e) Posición de medición P_{10} .

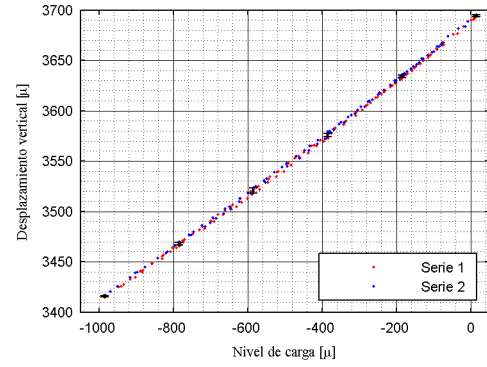


(f) Posición de medición P_{12} .

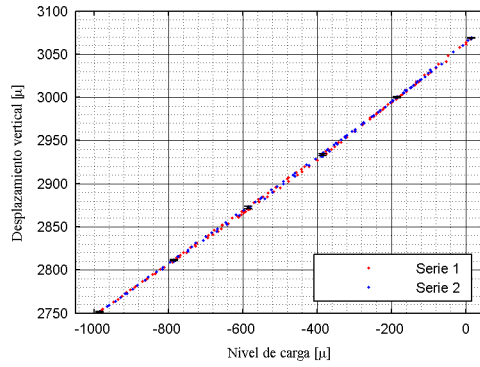
FIGURA E.12. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 2).



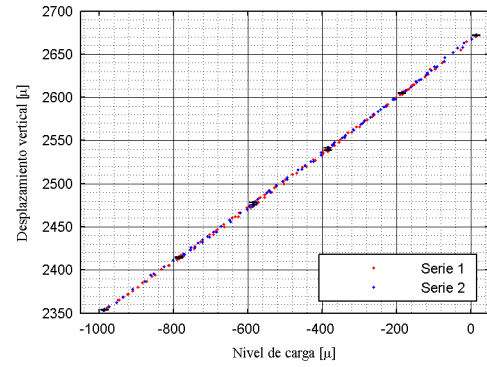
(a) Posición de medición P_2 .



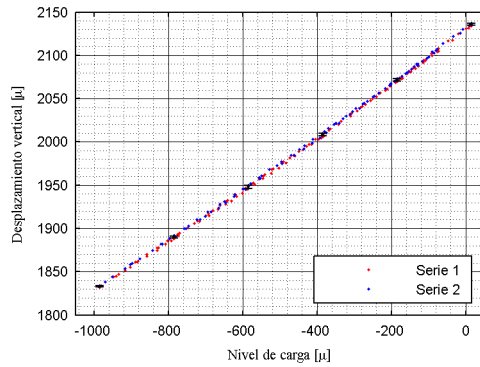
(b) Posición de medición P_4 .



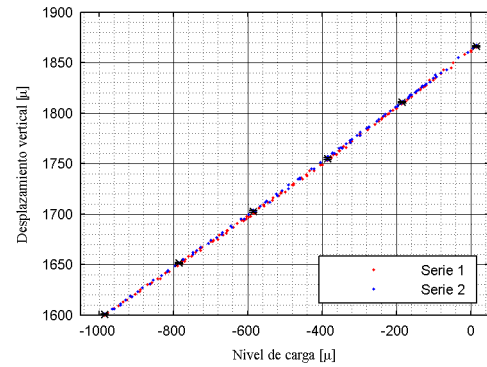
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

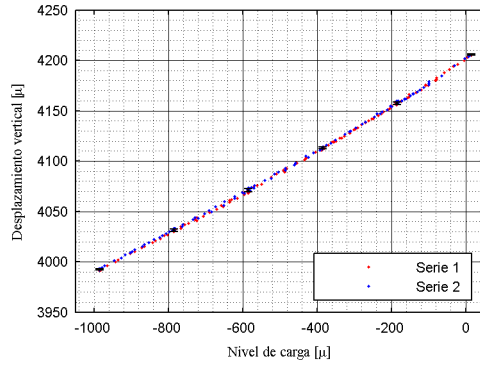


(e) Posición de medición P_{10} .

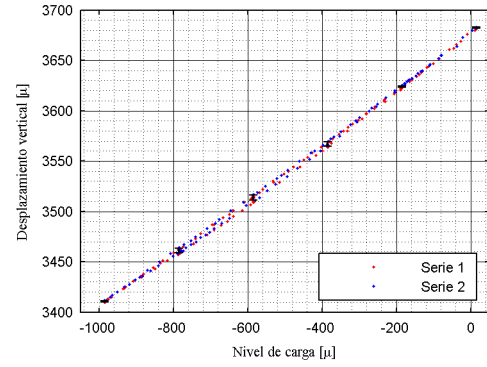


(f) Posición de medición P_{12} .

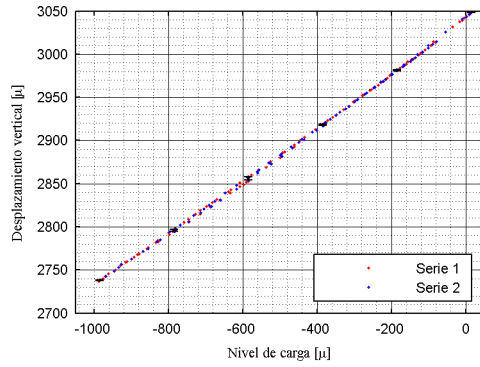
FIGURA E.13. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 3).



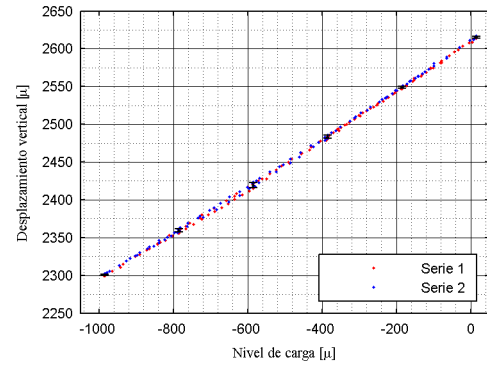
(a) Posición de medición P_2 .



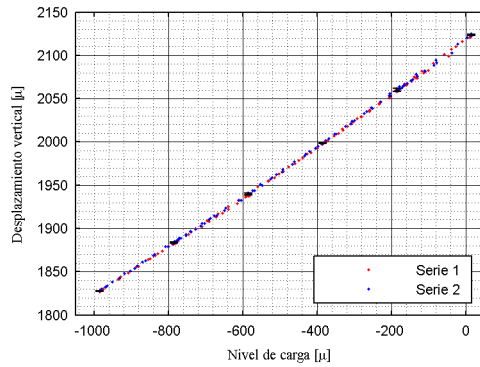
(b) Posición de medición P_4 .



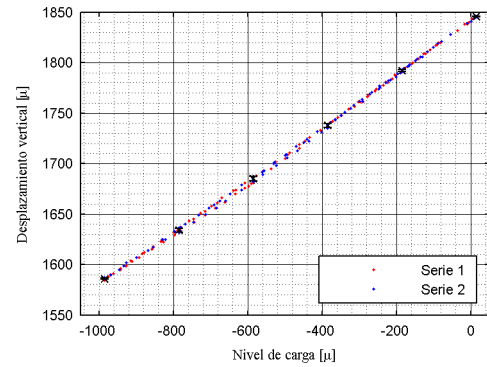
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

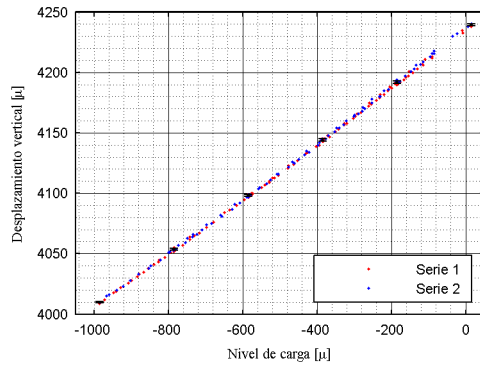


(e) Posición de medición P_{10} .

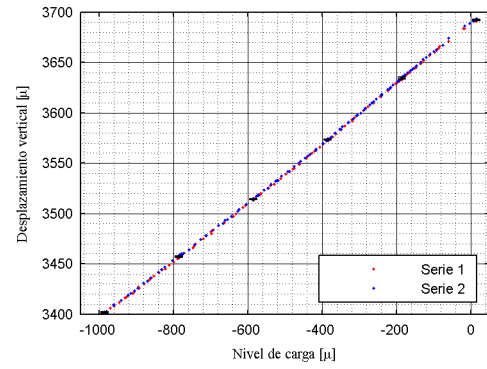


(f) Posición de medición P_{12} .

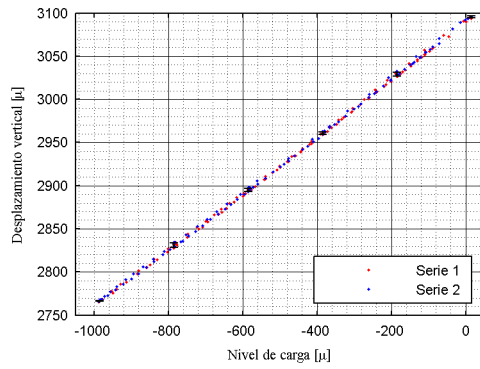
FIGURA E.14. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 4).



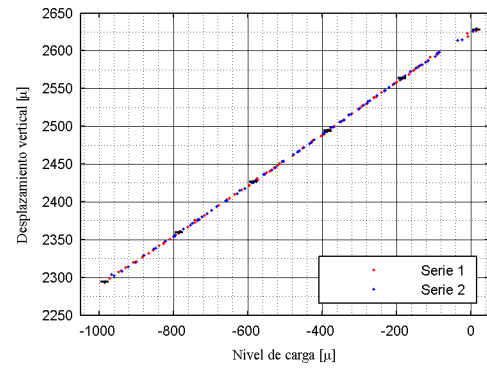
(a) Posición de medición P_2 .



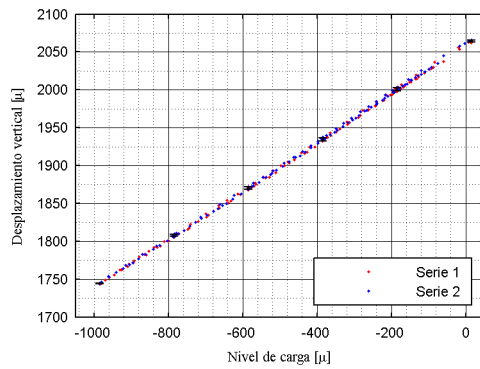
(b) Posición de medición P_4 .



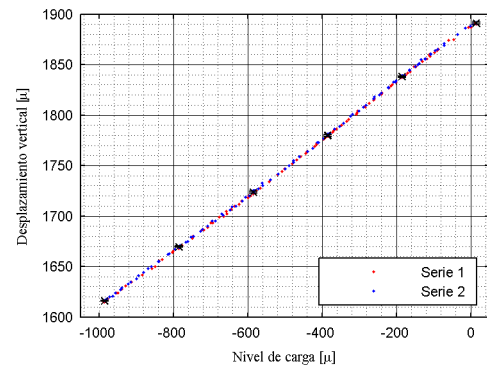
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

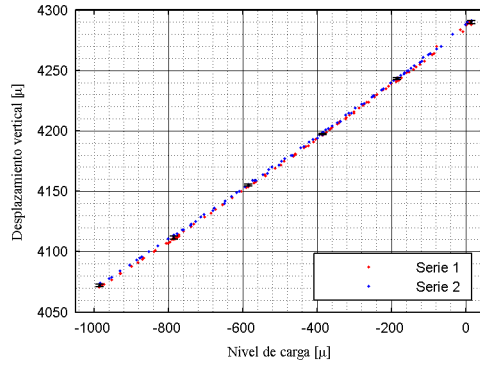


(e) Posición de medición P_{10} .

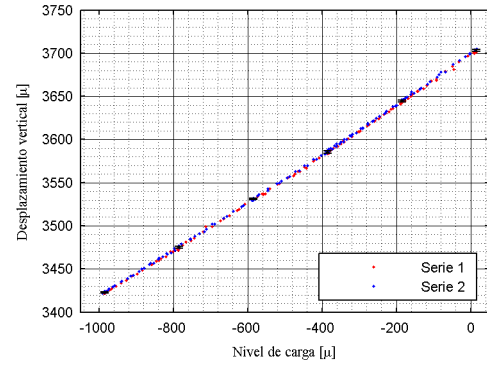


(f) Posición de medición P_{12} .

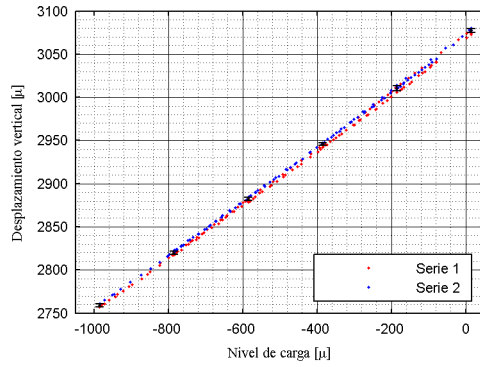
FIGURA E.15. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 5).



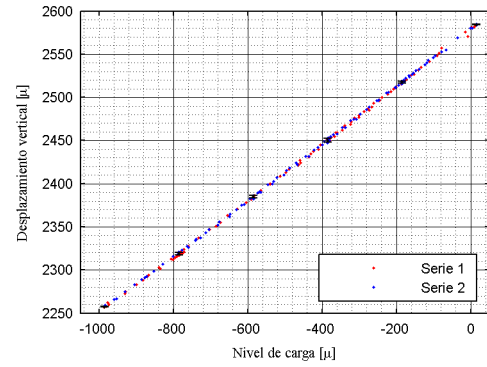
(a) Posición de medición P_2 .



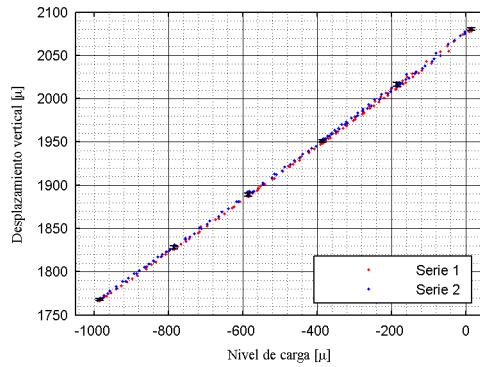
(b) Posición de medición P_4 .



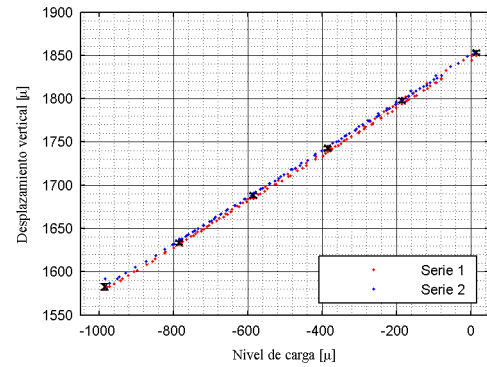
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

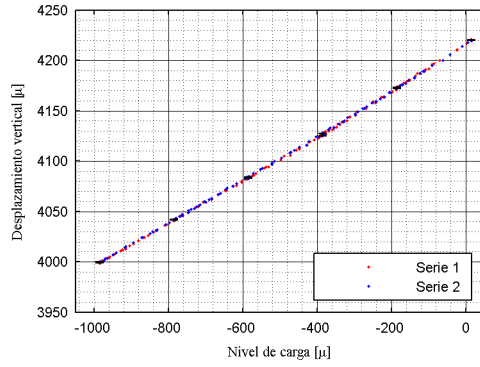


(e) Posición de medición P_{10} .

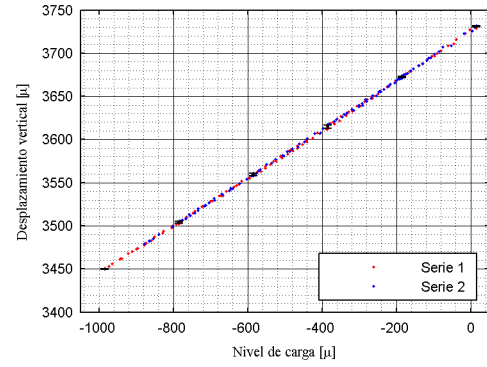


(f) Posición de medición P_{12} .

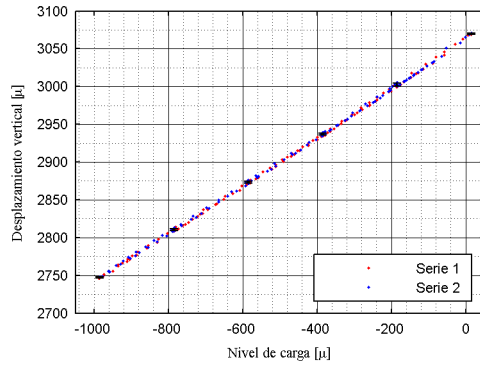
FIGURA E.16. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 6).



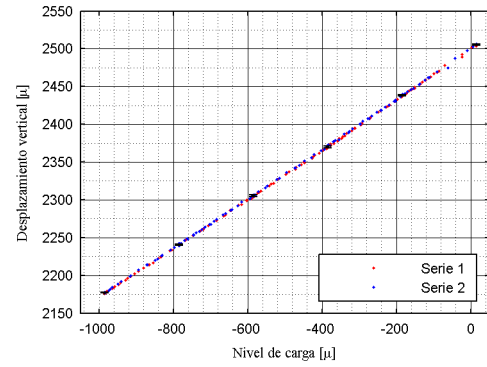
(a) Posición de medición P_2 .



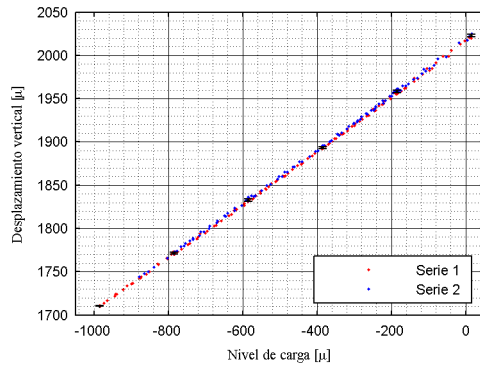
(b) Posición de medición P_4 .



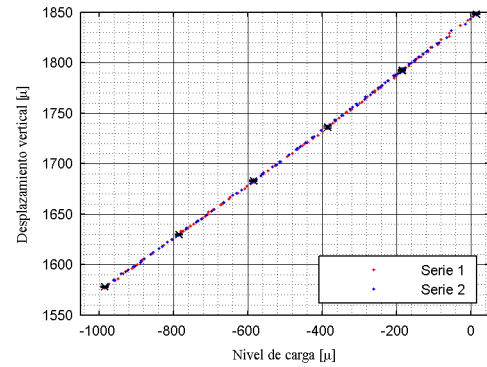
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

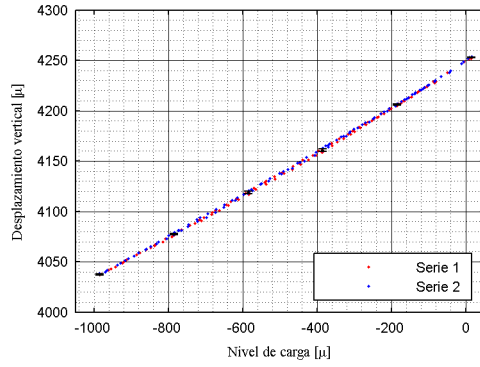


(e) Posición de medición P_{10} .

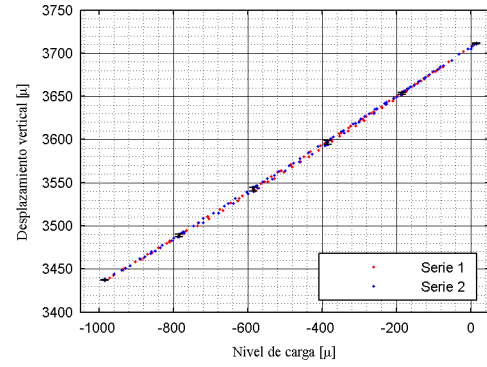


(f) Posición de medición P_{12} .

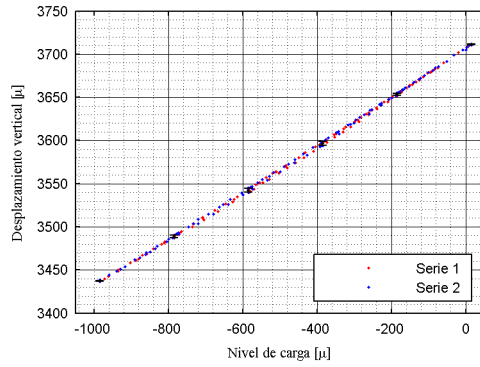
FIGURA E.17. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 7).



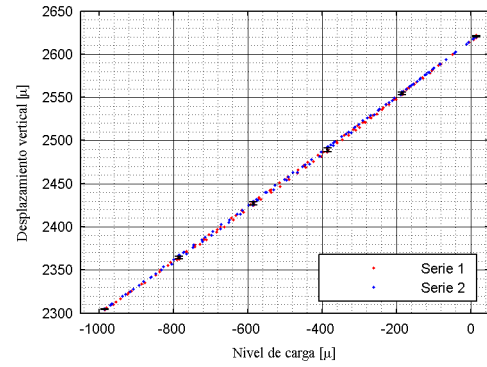
(a) Posición de medición P_2 .



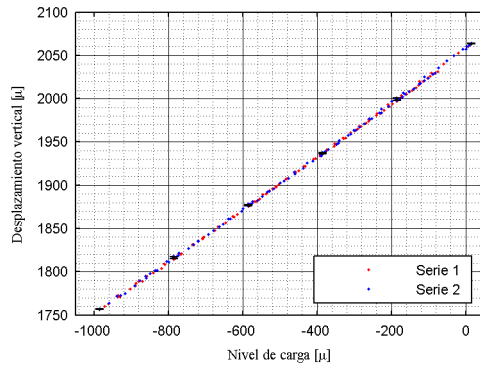
(b) Posición de medición P_4 .



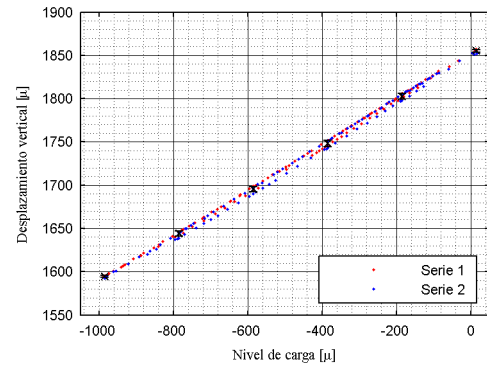
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

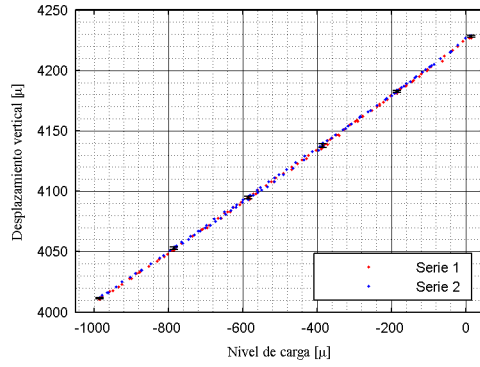


(e) Posición de medición P_{10} .

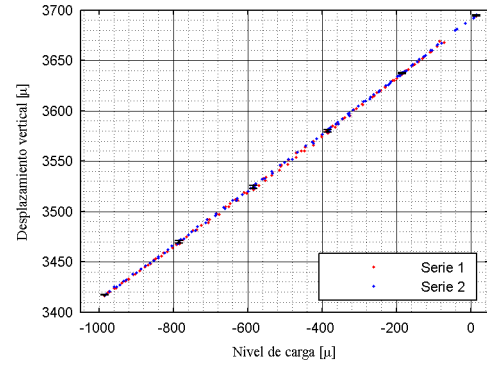


(f) Posición de medición P_{12} .

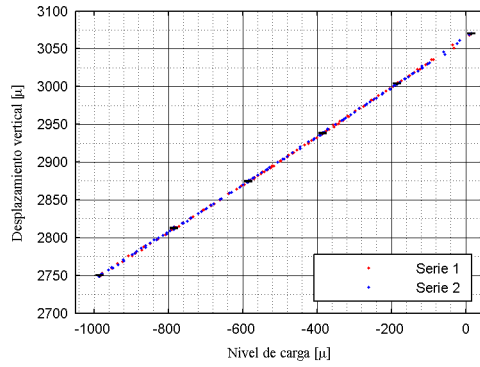
FIGURA E.18. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 8).



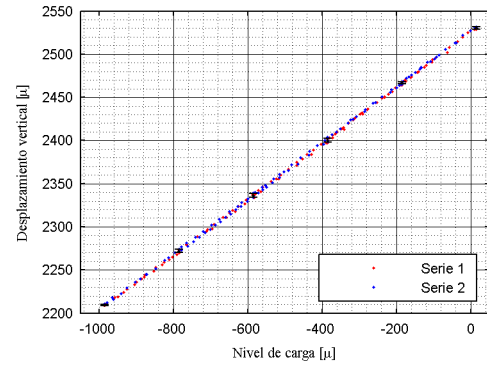
(a) Posición de medición P_2 .



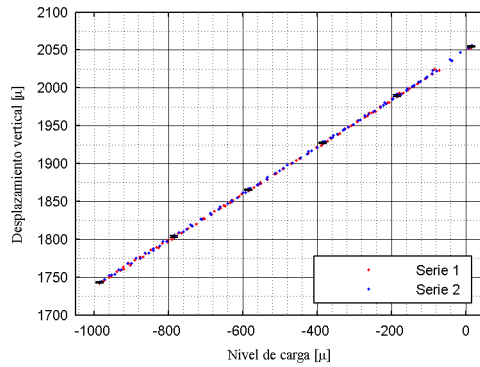
(b) Posición de medición P_4 .



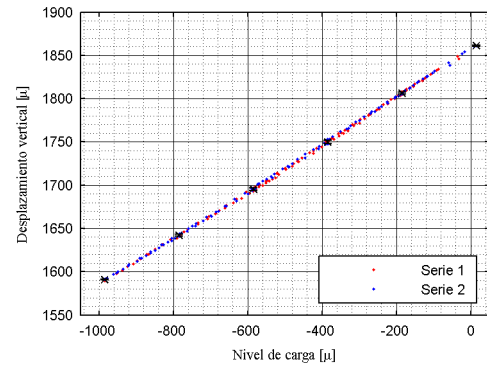
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .

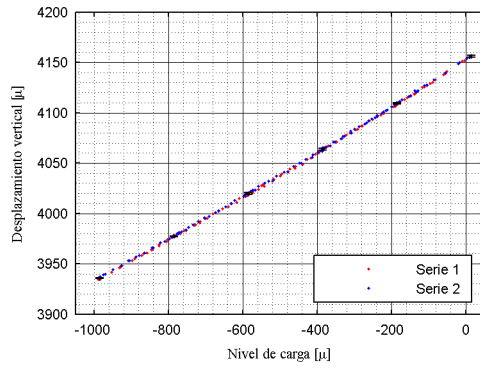


(e) Posición de medición P_{10} .

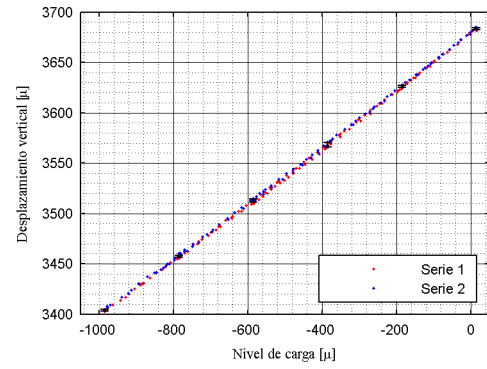


(f) Posición de medición P_{12} .

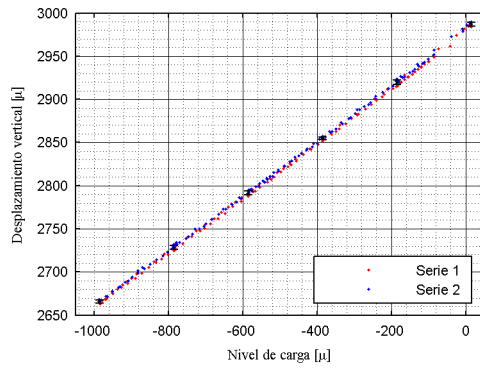
FIGURA E.19. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 9).



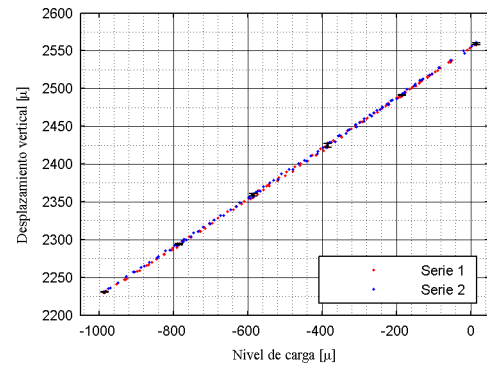
(a) Posición de medición P_2 .



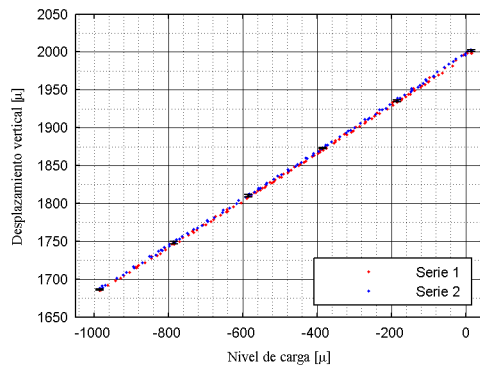
(b) Posición de medición P_4 .



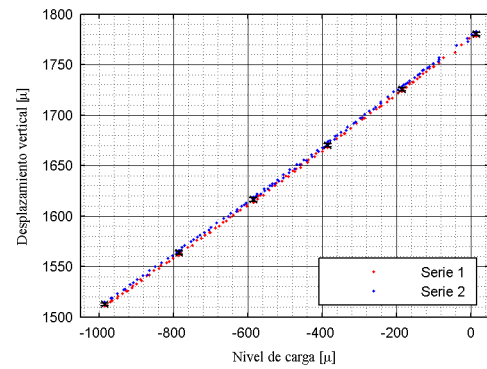
(c) Posición de medición P_6 .



(d) Posición de medición P_8 .



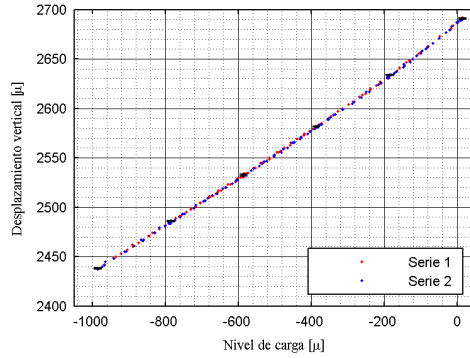
(e) Posición de medición P_{10} .



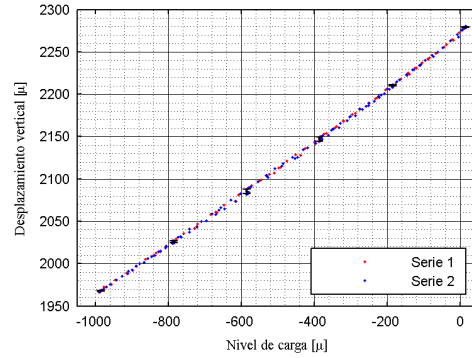
(f) Posición de medición P_{12} .

FIGURA E.20. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P1C2 (RE 10).

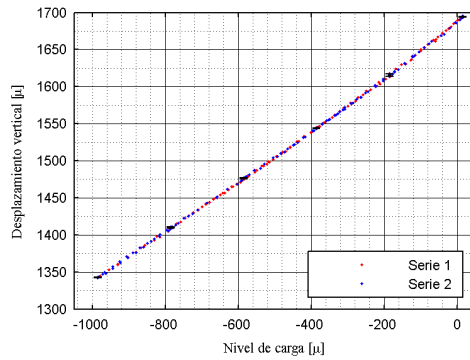
E.3. Resultados para el experimento P2C1



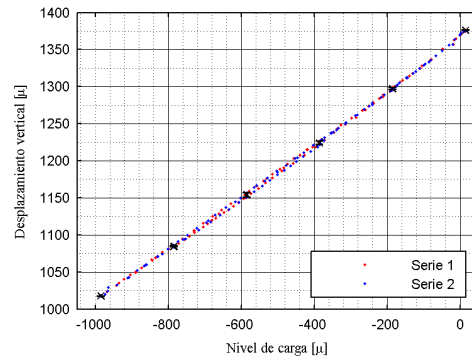
(a) Posición de medición P_4 .



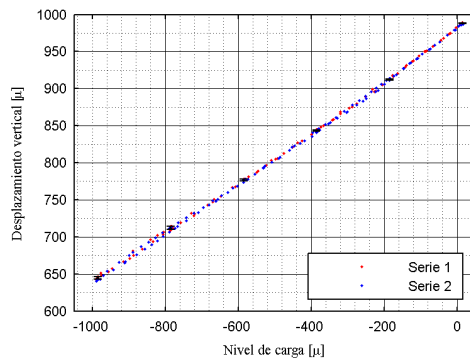
(b) Posición de medición P_6 .



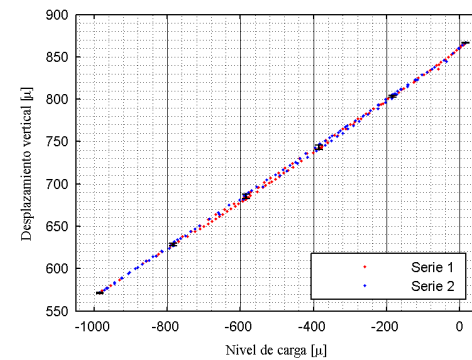
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

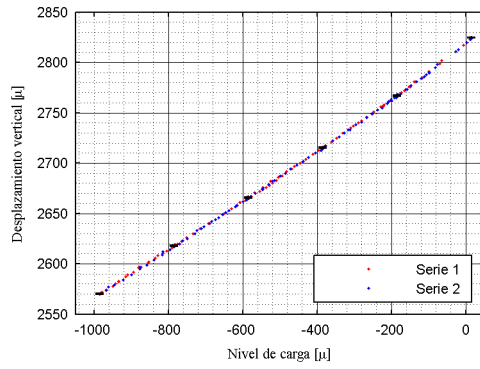


(e) Posición de medición P_{12} .

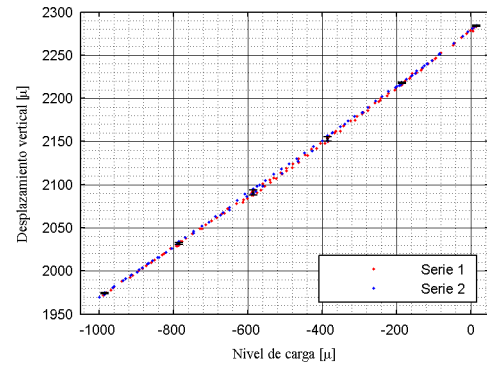


(f) Posición de medición P_{14} .

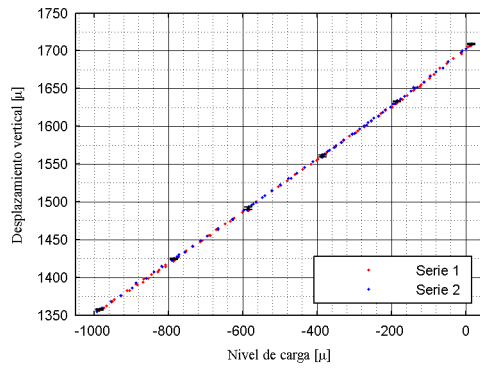
FIGURA E.21. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 1).



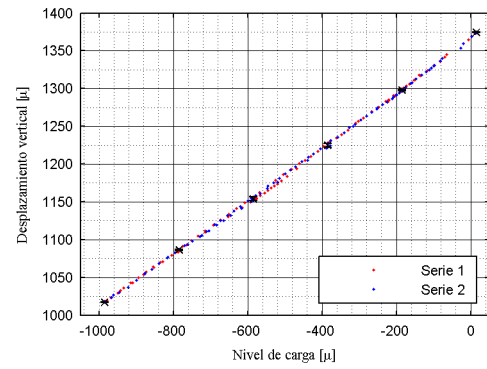
(a) Posición de medición P_4 .



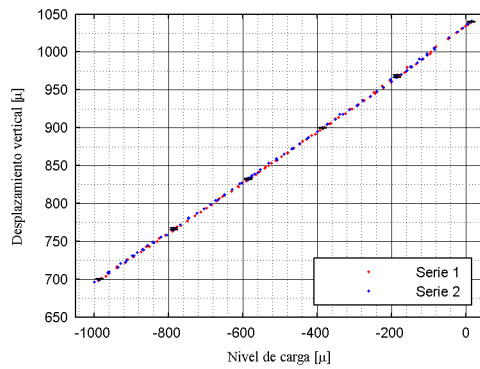
(b) Posición de medición P_6 .



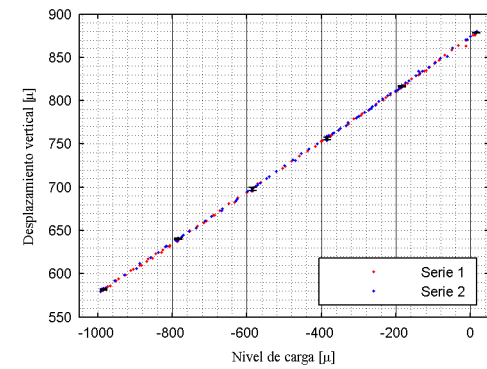
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

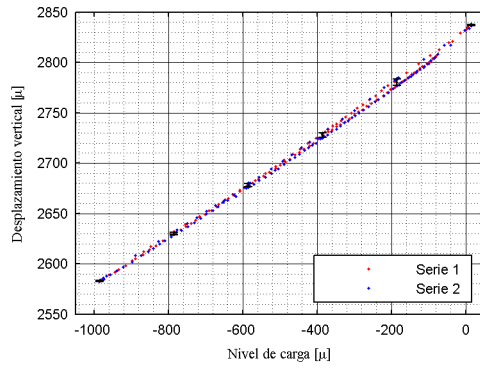


(e) Posición de medición P_{12} .

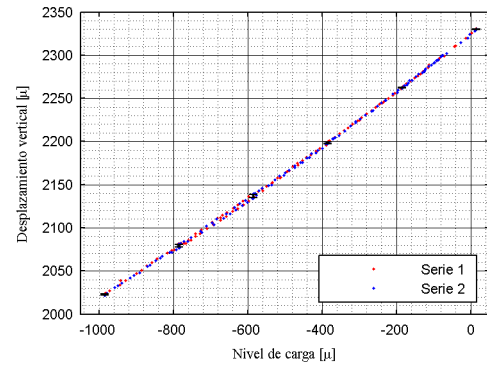


(f) Posición de medición P_{14} .

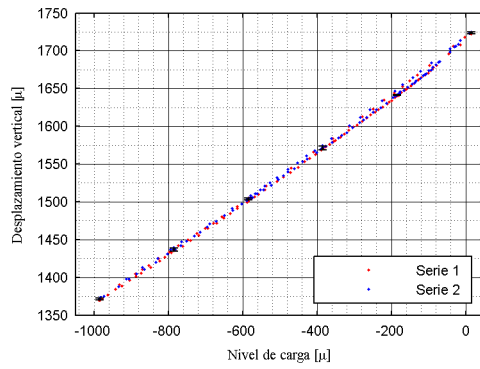
FIGURA E.22. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 2).



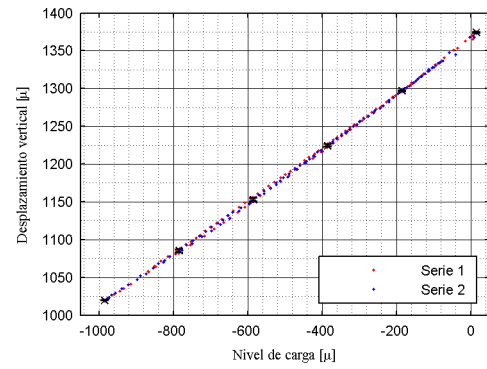
(a) Posición de medición P_4 .



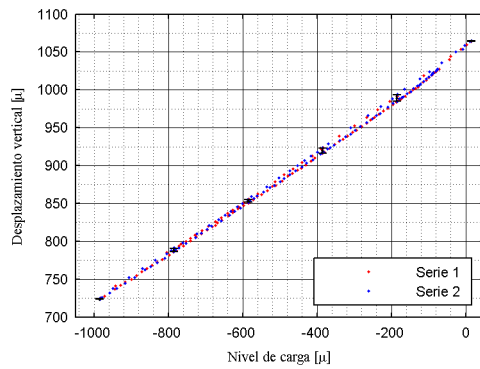
(b) Posición de medición P_6 .



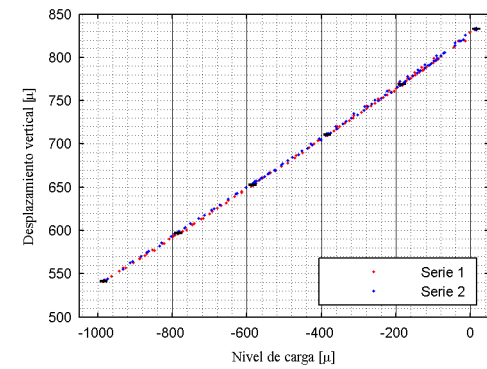
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

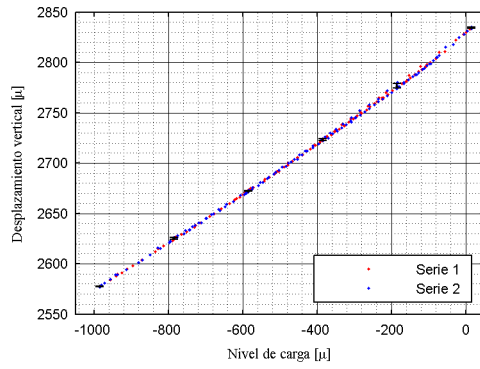


(e) Posición de medición P_{12} .

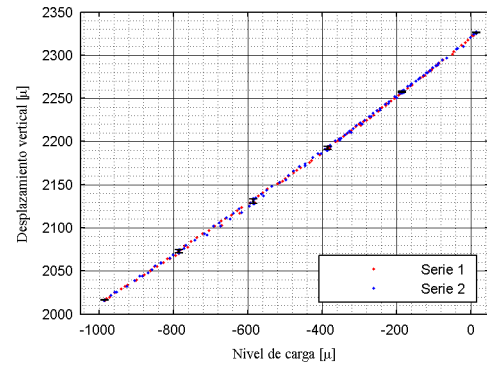


(f) Posición de medición P_{14} .

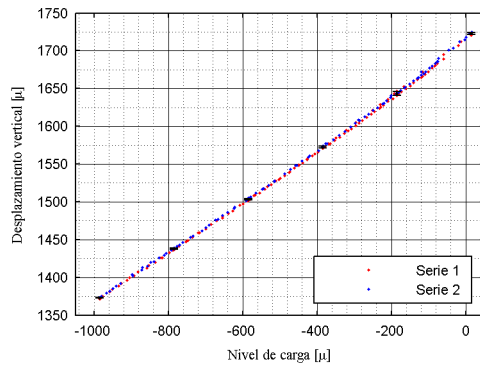
FIGURA E.23. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 3).



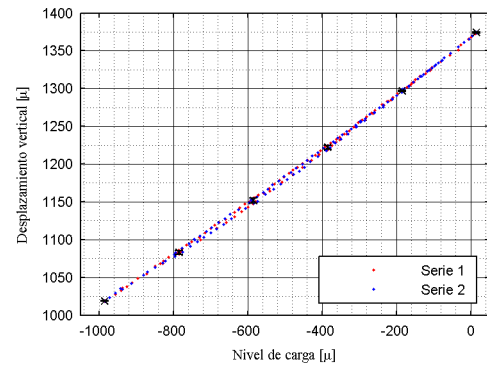
(a) Posición de medición P_4 .



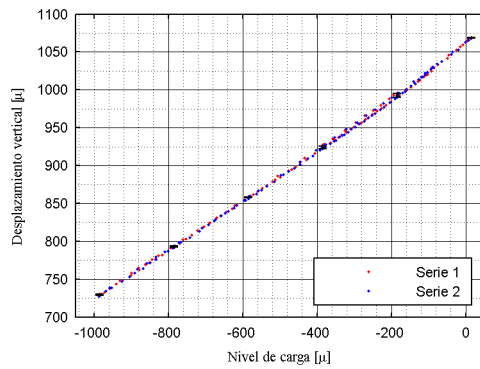
(b) Posición de medición P_6 .



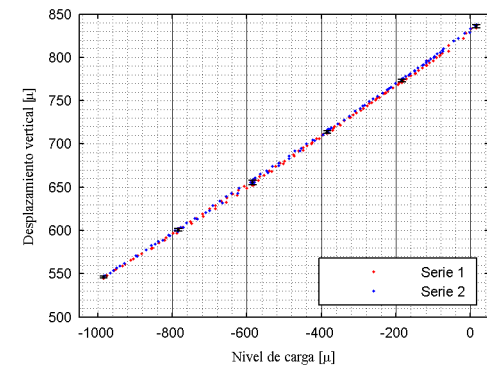
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .

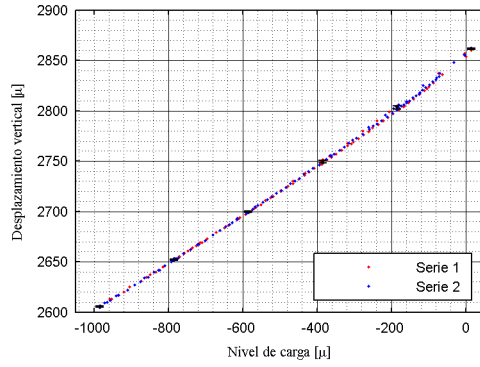


(e) Posición de medición P_{12} .

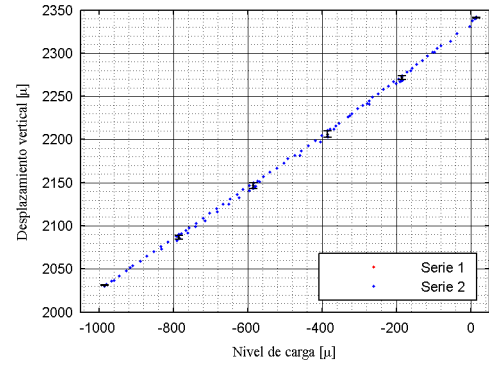


(f) Posición de medición P_{14} .

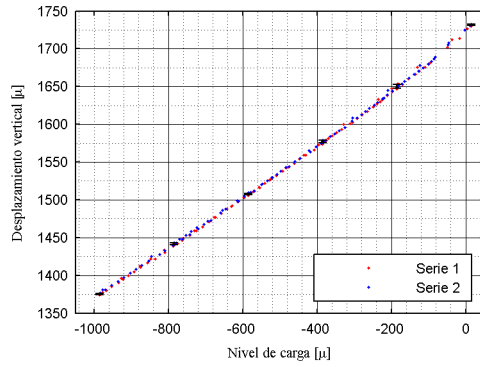
FIGURA E.24. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 4).



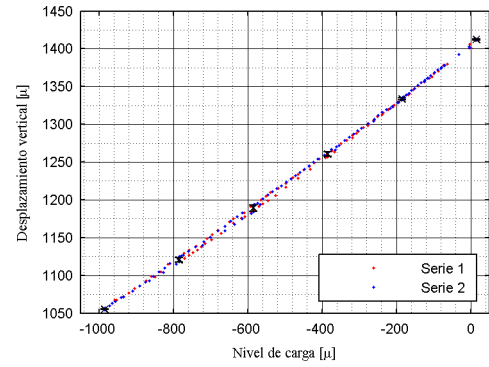
(a) Posición de medición P_4 .



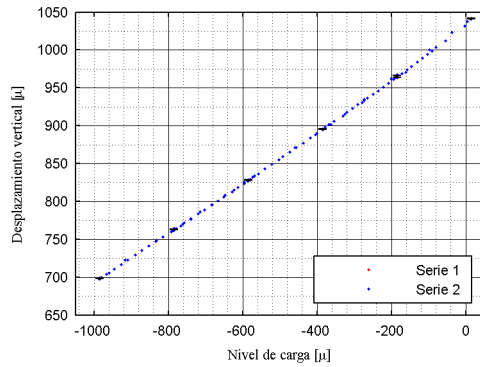
(b) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



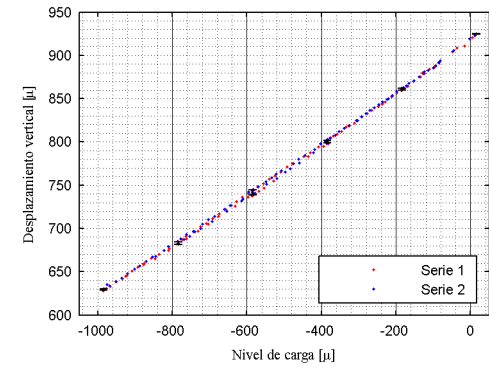
(c) Posición de medición P_8 .



(d) Posición de medición P_{10} .



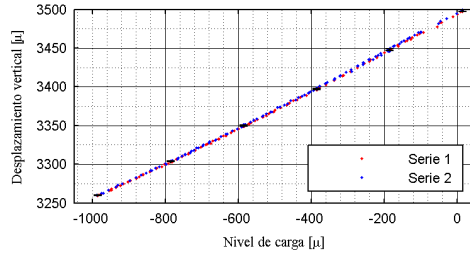
(e) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).



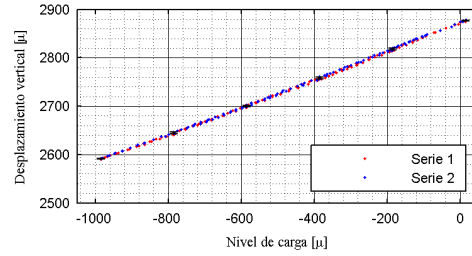
(f) Posición de medición P_{14} .

FIGURA E.25. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C1 (RE 5).

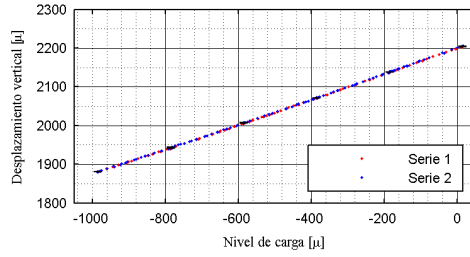
E.4. Resultados para el experimento P2C2



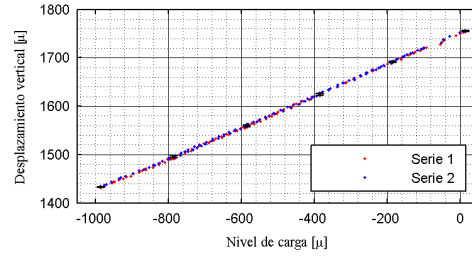
(a) Posición de medición P_2 .



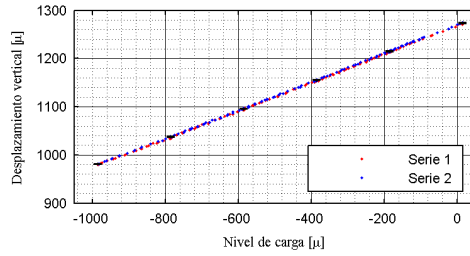
(b) Posición de medición P_4 .



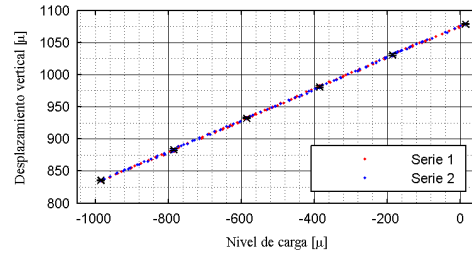
(c) Posición de medición P_6 .



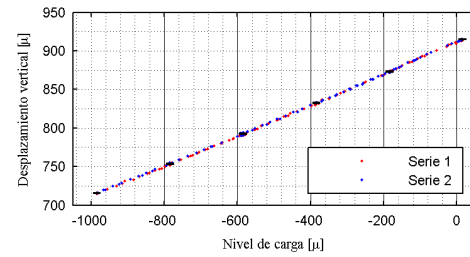
(d) Posición de medición P_8 .



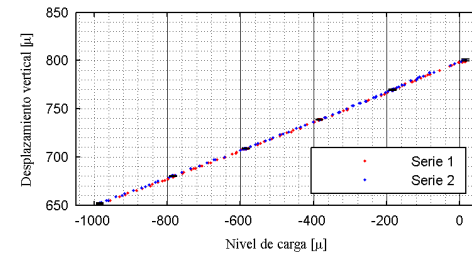
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

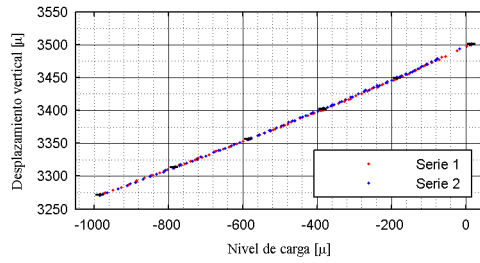


(g) Posición de medición P_{14} .

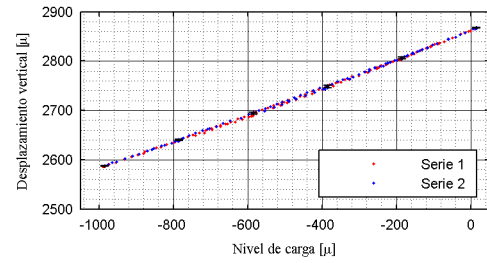


(h) Posición de medición P_{16} .

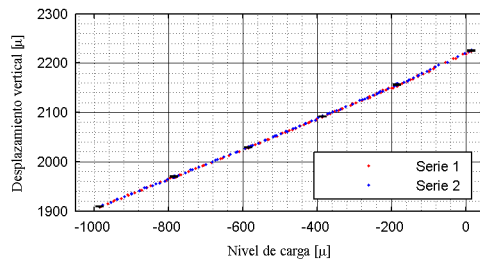
FIGURA E.26. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 1).



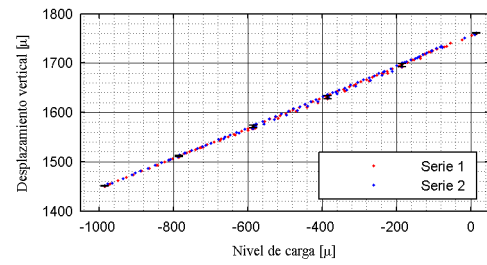
(a) Posición de medición P_2 .



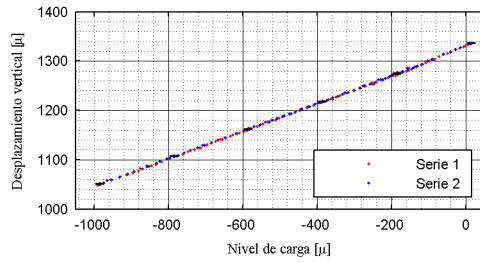
(b) Posición de medición P_4 .



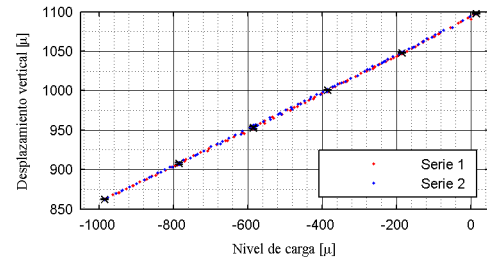
(c) Posición de medición P_6 .



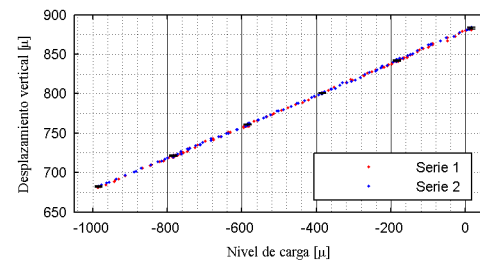
(d) Posición de medición P_8 .



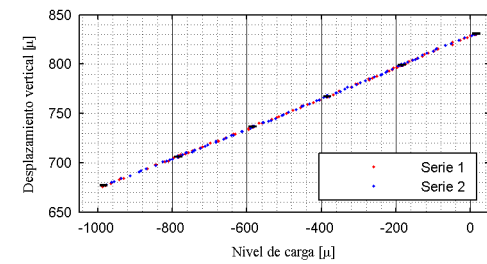
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

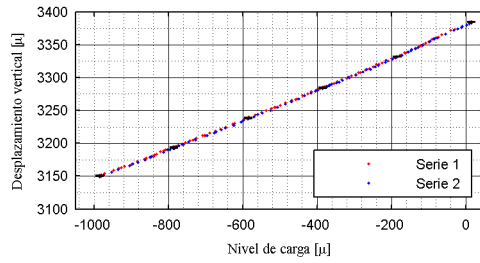


(g) Posición de medición P_{14} .

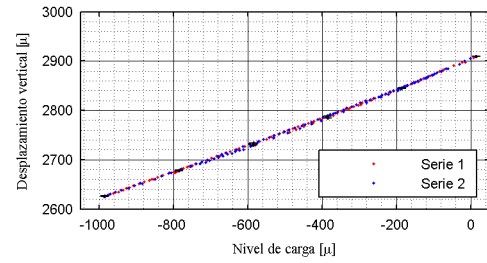


(h) Posición de medición P_{16} .

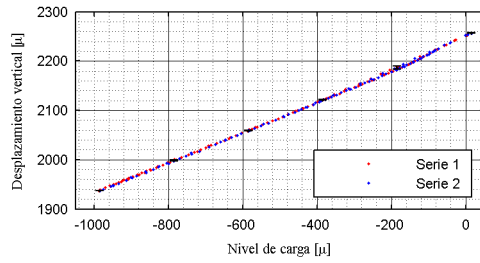
FIGURA E.27. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 2).



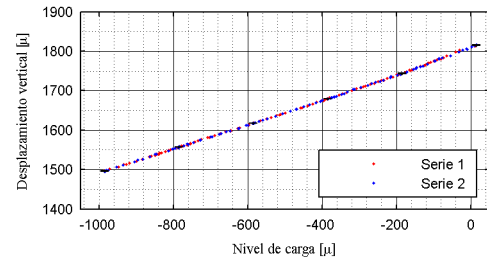
(a) Posición de medición P_2 .



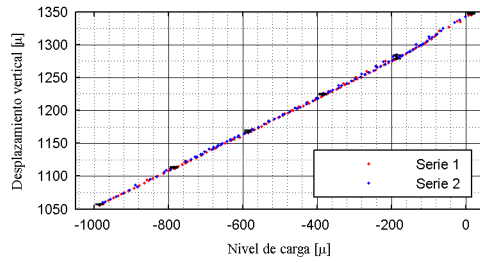
(b) Posición de medición P_4 .



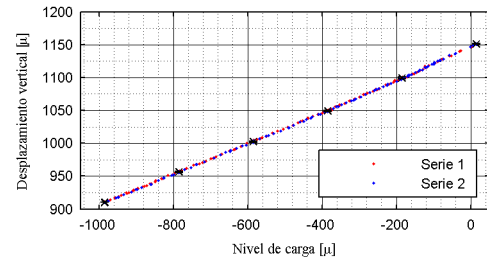
(c) Posición de medición P_6 .



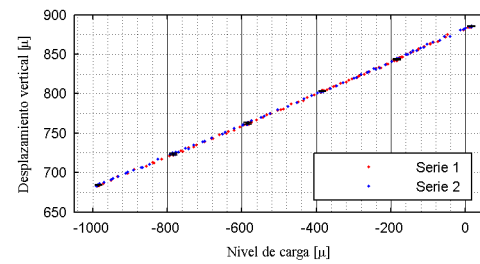
(d) Posición de medición P_8 .



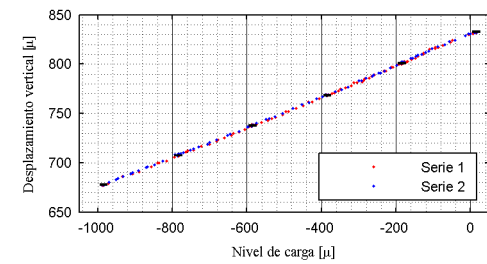
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

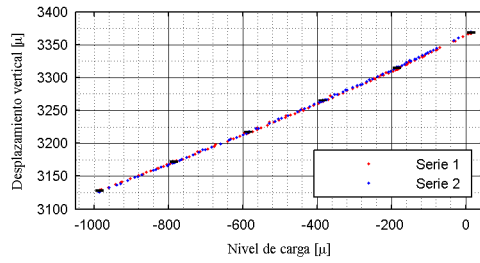


(g) Posición de medición P_{14} .

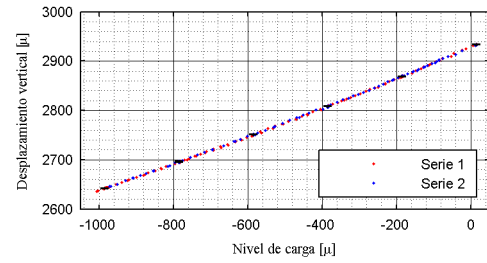


(h) Posición de medición P_{16} .

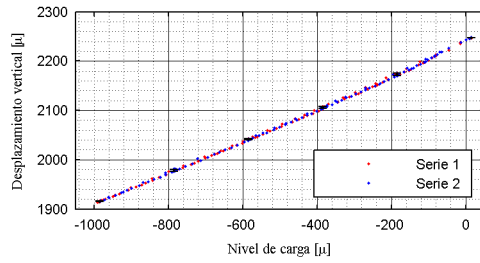
FIGURA E.28. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 3).



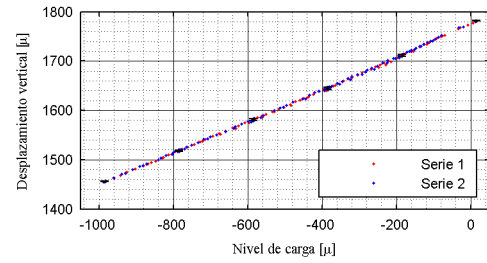
(a) Posición de medición P_2 .



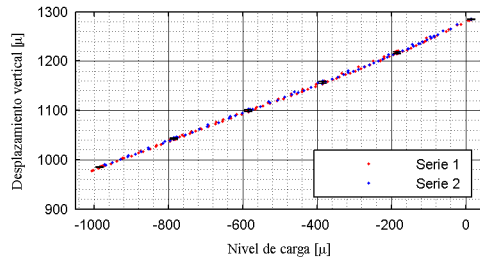
(b) Posición de medición P_4 .



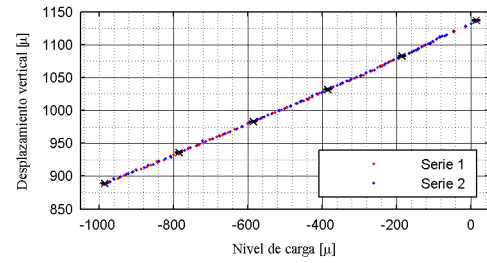
(c) Posición de medición P_6 .



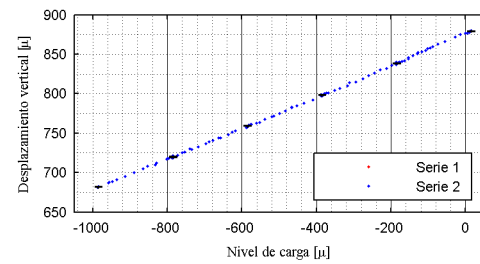
(d) Posición de medición P_8 .



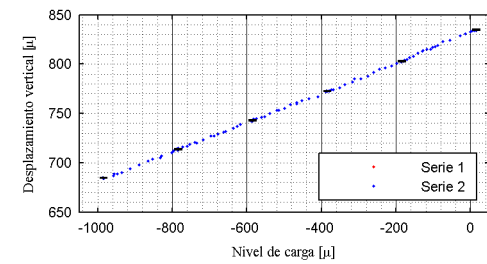
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

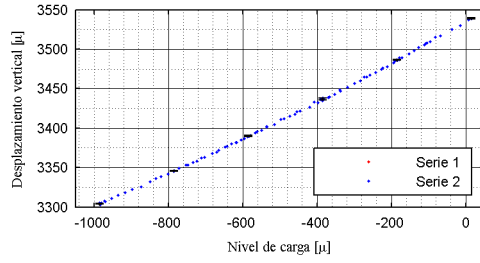


(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

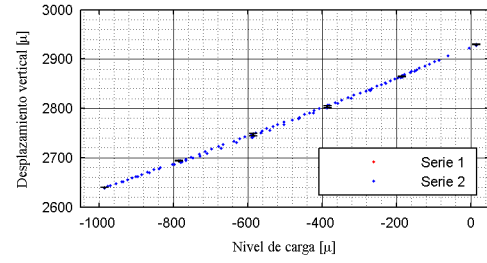


(h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

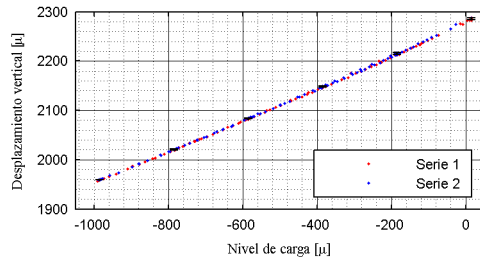
FIGURA E.29. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 4).



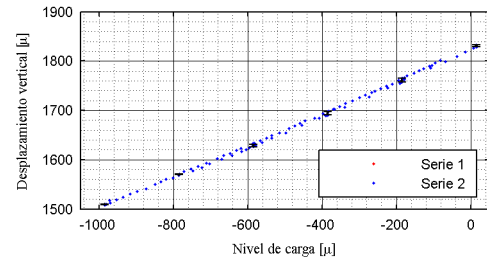
(a) Posición de medición P_2 (Se realizó una serie).



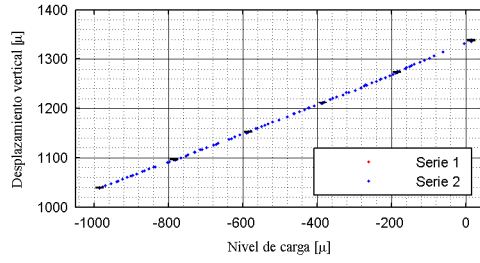
(b) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



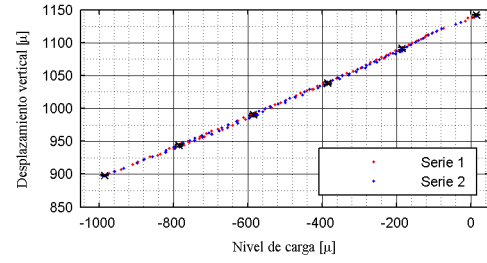
(c) Posición de medición P_6 .



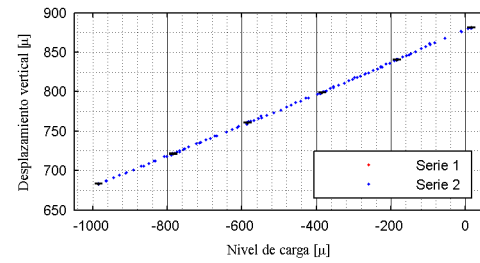
(d) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



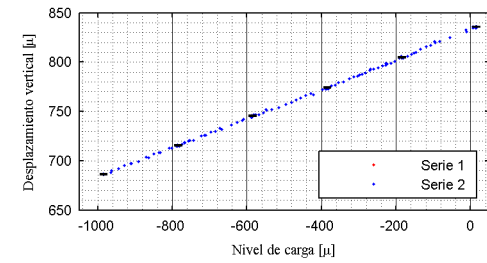
(e) Posición de medición P_{10} (Se realizó una serie).



(f) Posición de medición P_{12} .



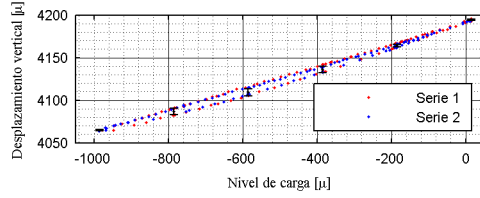
(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).



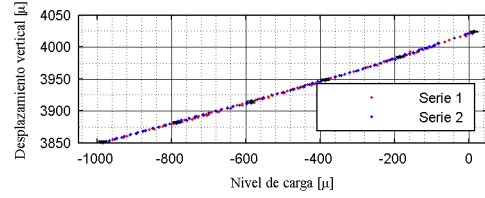
(h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

FIGURA E.30. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P2C2 (RE 5).

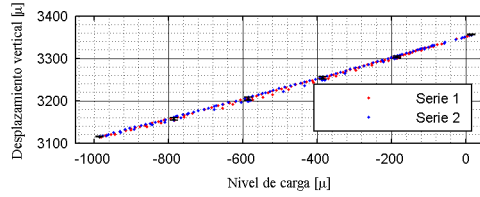
E.5. Resultados para el experimento P3C1



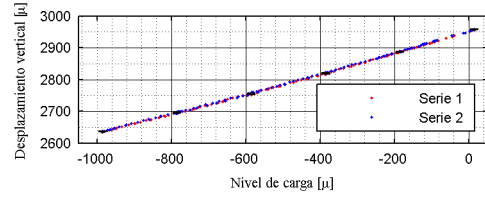
(a) Posición de medición P_1 .



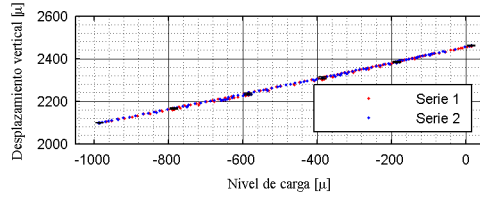
(b) Posición de medición P_2 .



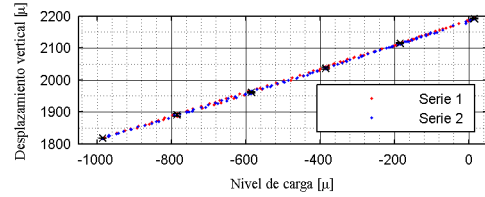
(c) Posición de medición P_4 .



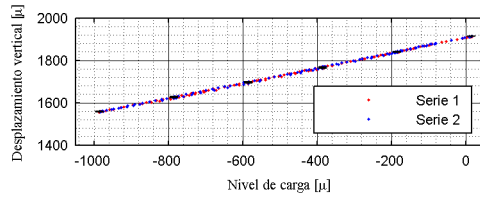
(d) Posición de medición P_6 .



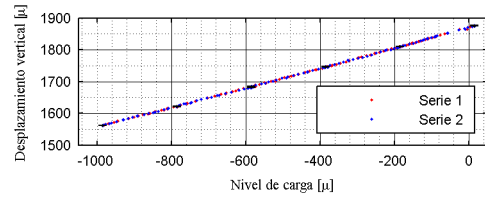
(e) Posición de medición P_8 .



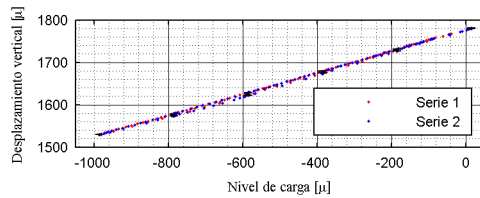
(f) Posición de medición P_{10} .



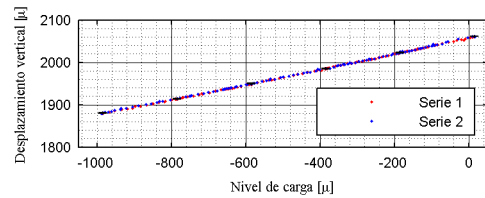
(g) Posición de medición P_{12} .



(h) Posición de medición P_{14} .

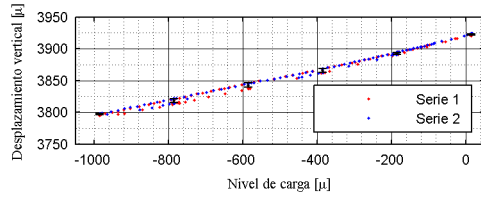


(i) Posición de medición P_{16} .

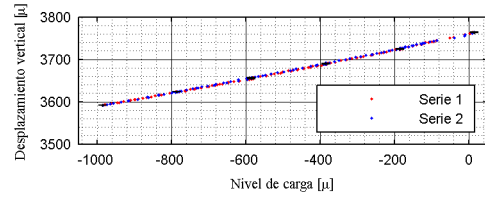


(j) Posición de medición P_{18} .

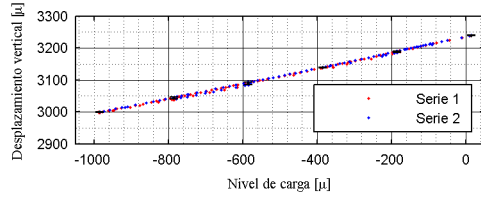
FIGURA E.31. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 1).



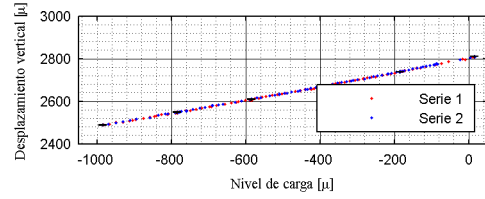
(a) Posición de medición P_1 .



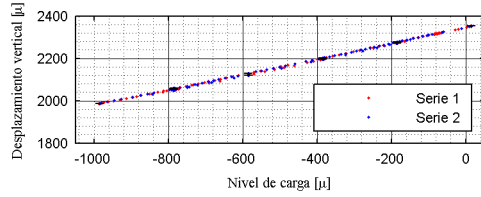
(b) Posición de medición P_2 .



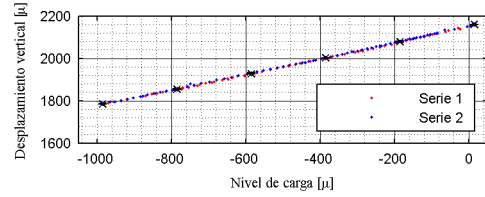
(c) Posición de medición P_4 .



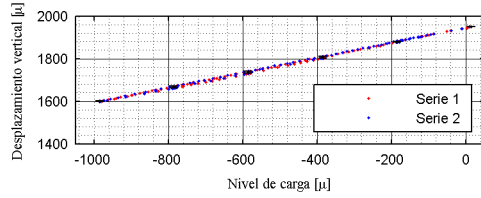
(d) Posición de medición P_6 .



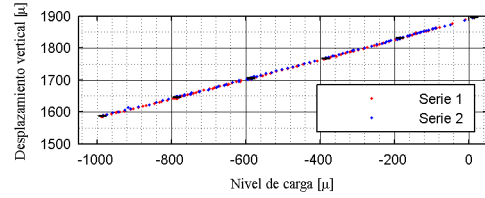
(e) Posición de medición P_8 .



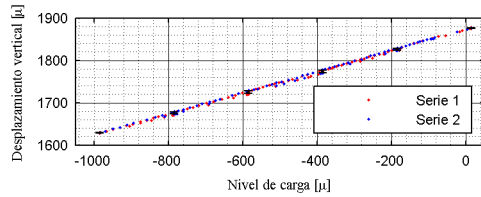
(f) Posición de medición P_{10} .



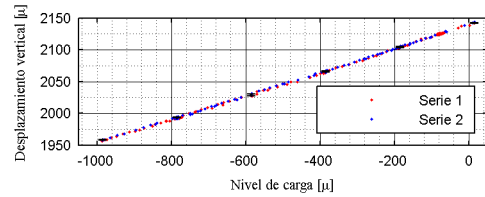
(g) Posición de medición P_{12} .



(h) Posición de medición P_{14} .

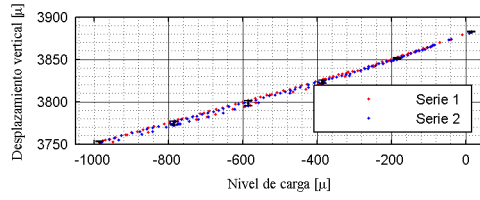


(i) Posición de medición P_{16} .

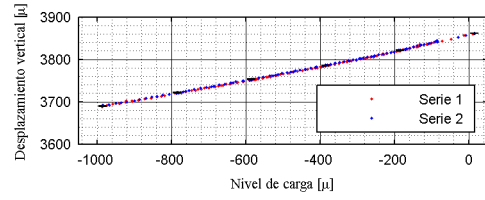


(j) Posición de medición P_{18} .

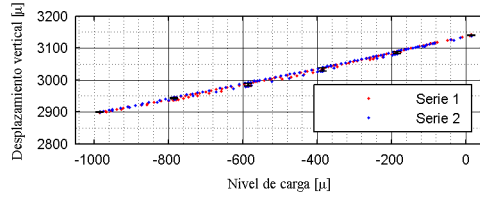
FIGURA E.32. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 2).



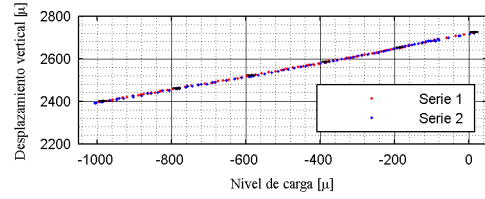
(a) Posición de medición P_1 .



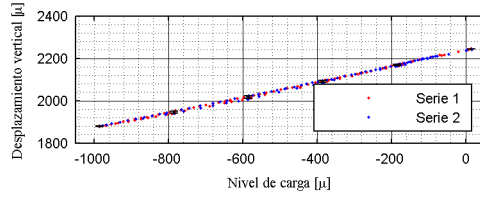
(b) Posición de medición P_2 .



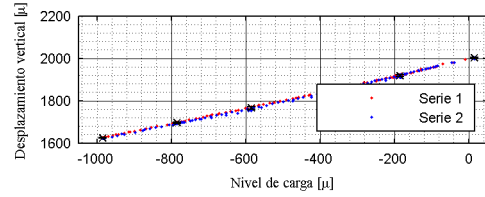
(c) Posición de medición P_4 .



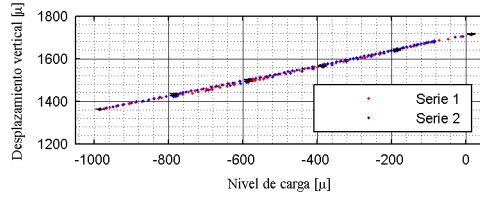
(d) Posición de medición P_6 .



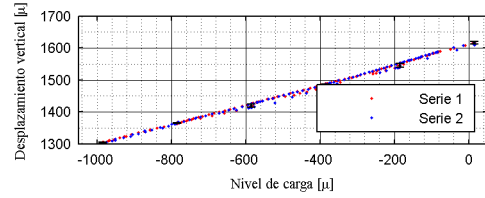
(e) Posición de medición P_8 .



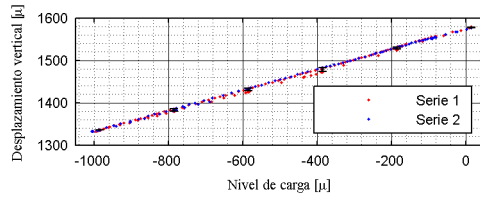
(f) Posición de medición P_{10} .



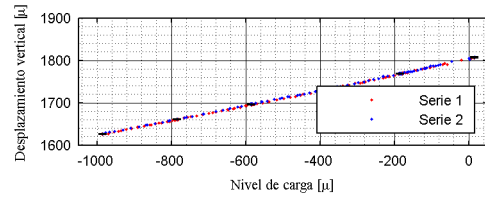
(g) Posición de medición P_{12} .



(h) Posición de medición P_{14} .

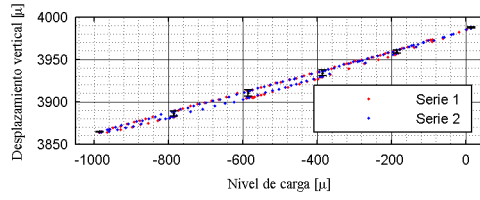


(i) Posición de medición P_{16} .

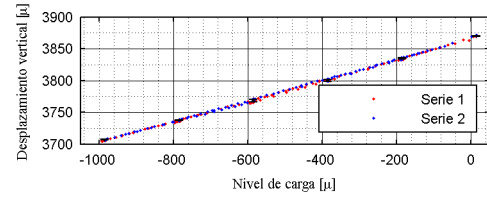


(j) Posición de medición P_{18} .

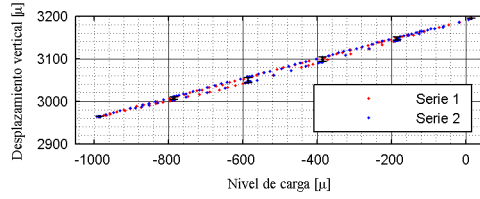
FIGURA E.33. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 3).



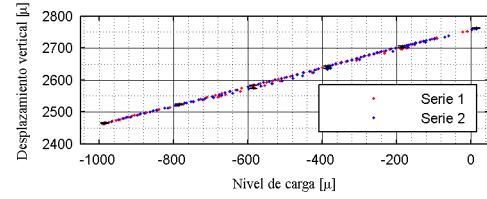
(a) Posición de medición P_1 .



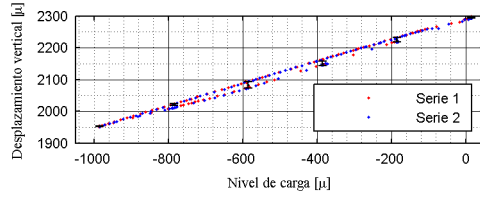
(b) Posición de medición P_2 .



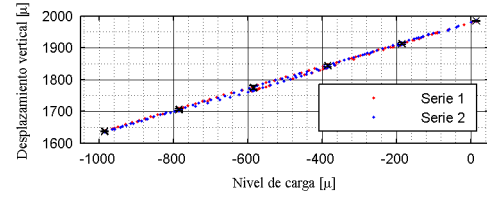
(c) Posición de medición P_4 .



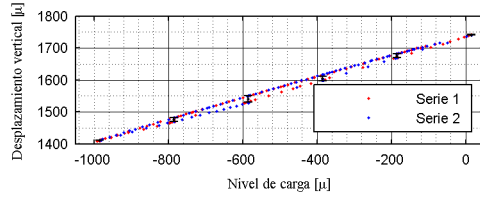
(d) Posición de medición P_6 .



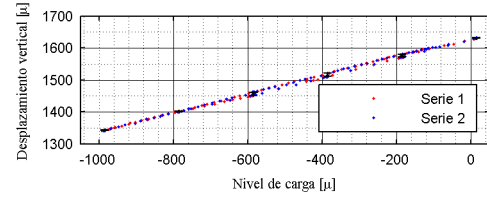
(e) Posición de medición P_8 .



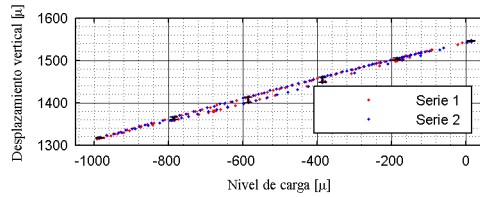
(f) Posición de medición P_{10} .



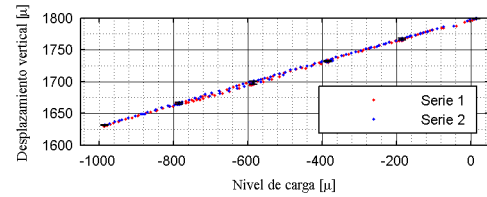
(g) Posición de medición P_{12} .



(h) Posición de medición P_{14} .

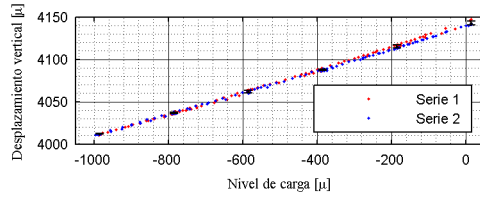


(i) Posición de medición P_{16} .

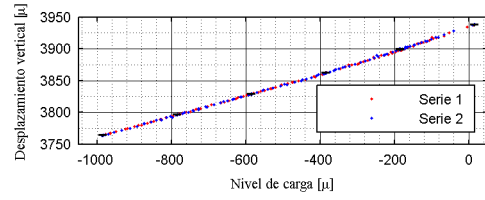


(j) Posición de medición P_{18} .

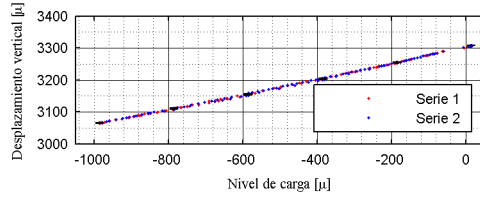
FIGURA E.34. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 4).



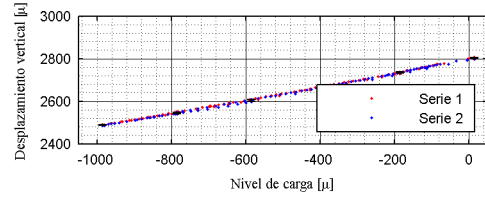
(a) Posición de medición P_1 .



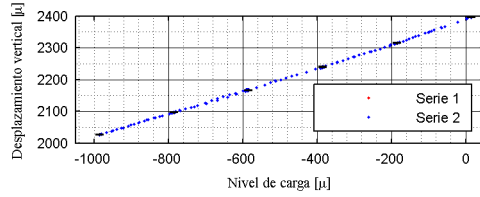
(b) Posición de medición P_2 .



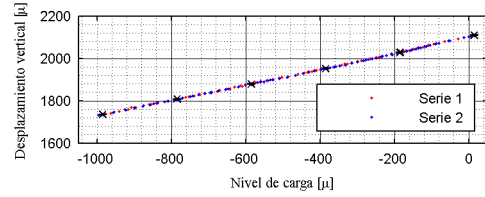
(c) Posición de medición P_4 .



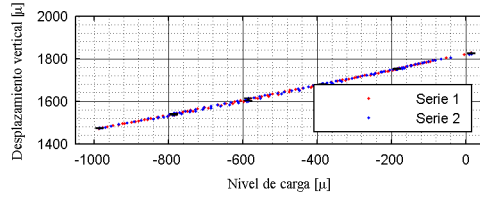
(d) Posición de medición P_6 .



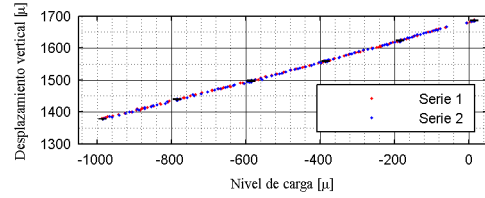
(e) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



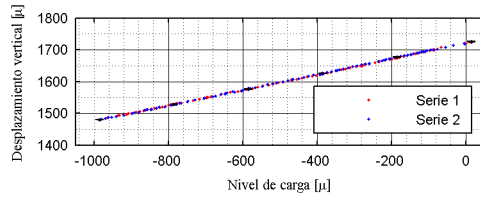
(f) Posición de medición P_{10} .



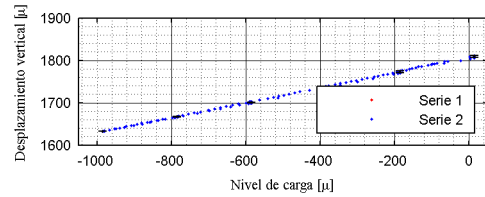
(g) Posición de medición P_{12} .



(h) Posición de medición P_{14} .



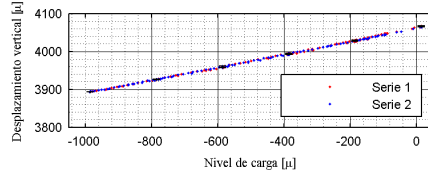
(i) Posición de medición P_{16} .



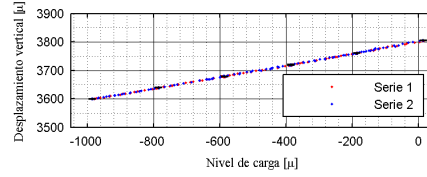
(j) Posición de medición P_{18} (Se realizó una serie).

FIGURA E.35. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C1 (RE 5).

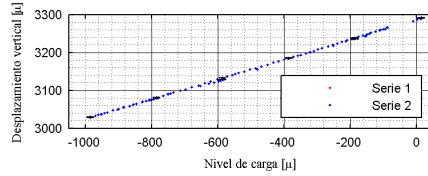
E.6. Resultados para el experimento P3C2



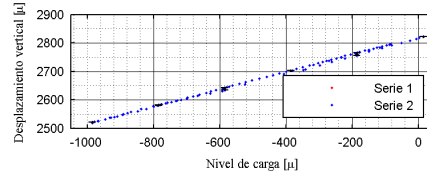
(a) Posición de medición P_1 .



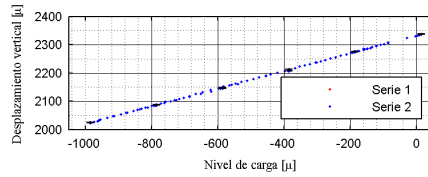
(b) Posición de medición P_2 .



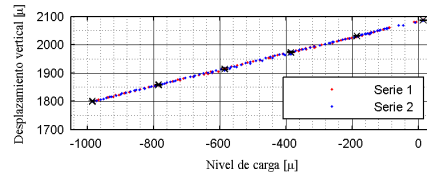
(c) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



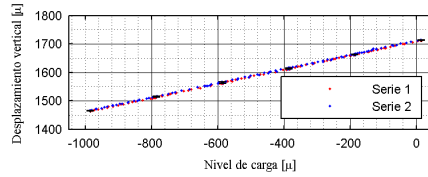
(d) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



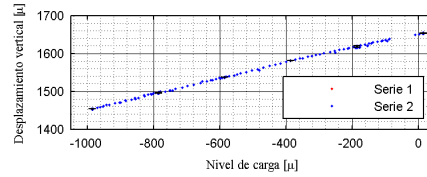
(e) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



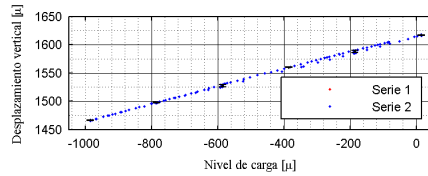
(f) Posición de medición P_{10} .



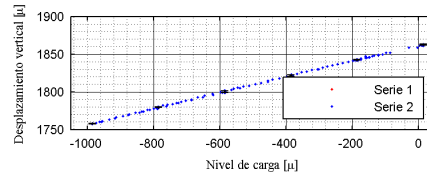
(g) Posición de medición P_{12} .



(h) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

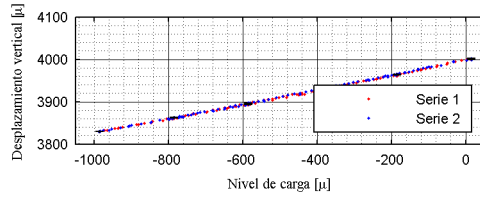


(i) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

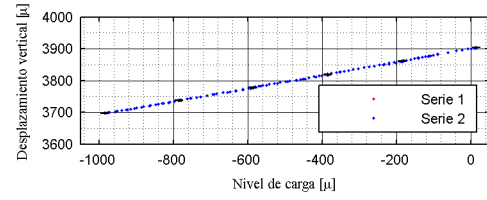


(j) Posición de medición P_{18} (Se realizó una serie).

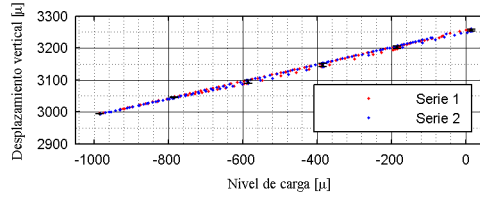
FIGURA E.36. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C2 (RE 1).



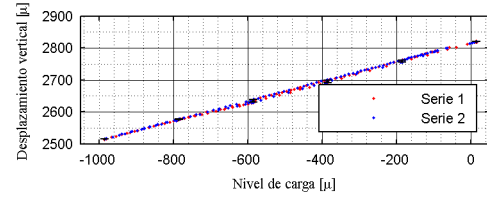
(a) Posición de medición P_1 .



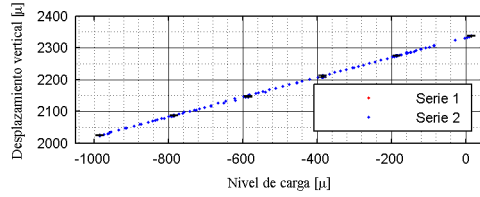
(b) Posición de medición P_2 (Se realizó una serie).



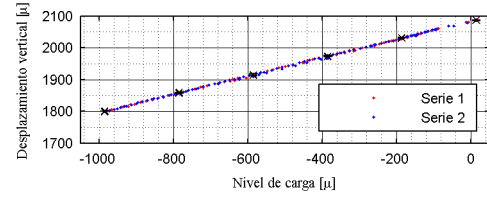
(c) Posición de medición P_4 .



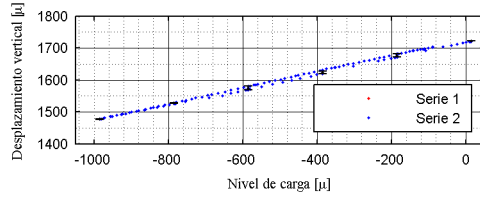
(d) Posición de medición P_6 .



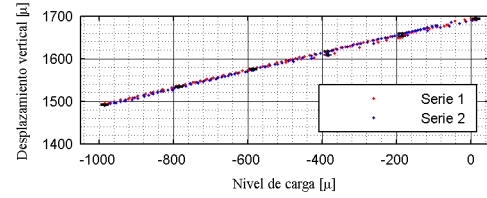
(e) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



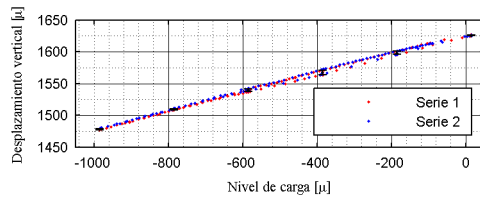
(f) Posición de medición P_{10} .



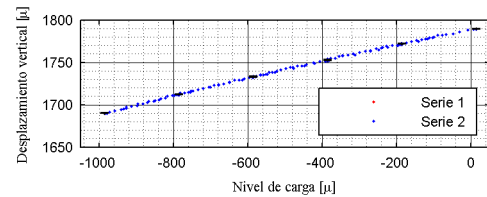
(g) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).



(h) Posición de medición P_{14} .

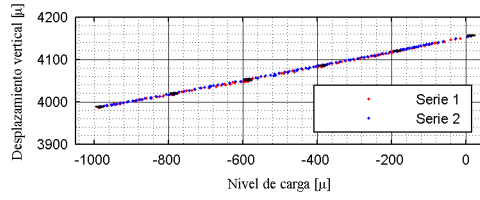


(i) Posición de medición P_{16} .

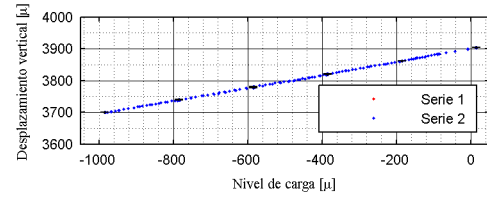


(j) Posición de medición P_{18} (Se realizó una serie).

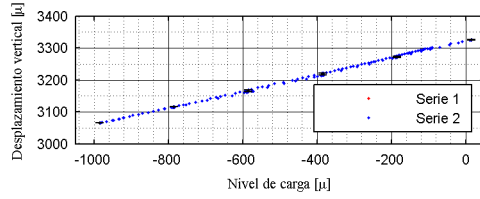
FIGURA E.37. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C2 (RE 2).



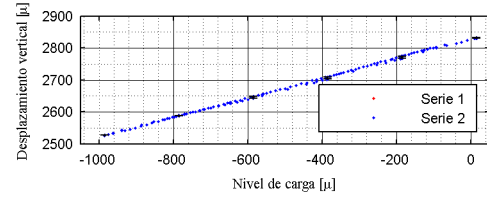
(a) Posición de medición P_1 .



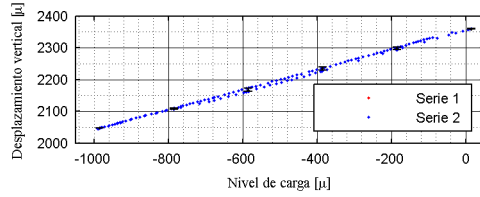
(b) Posición de medición P_2 (Se realizó una serie).



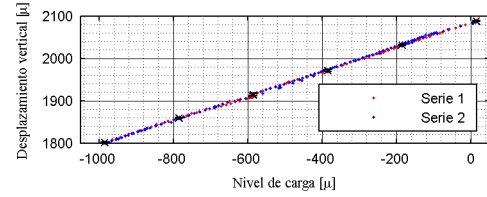
(c) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



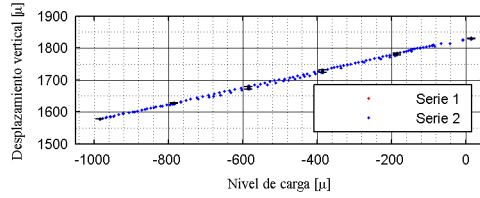
(d) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



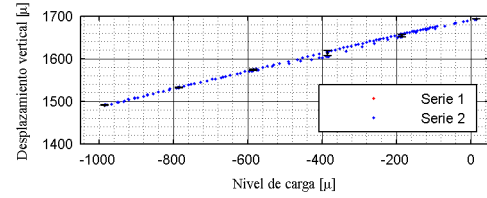
(e) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



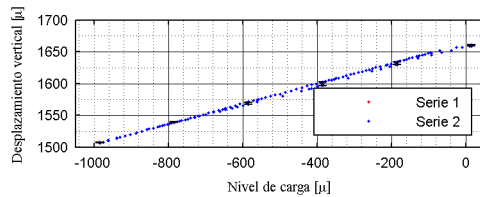
(f) Posición de medición P_{10} .



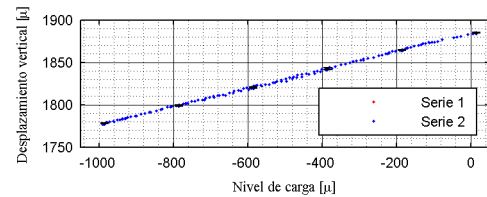
(g) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).



(h) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).



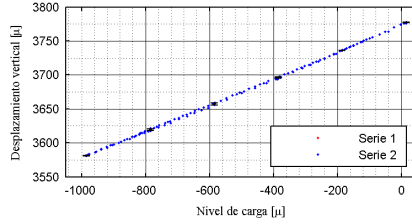
(i) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).



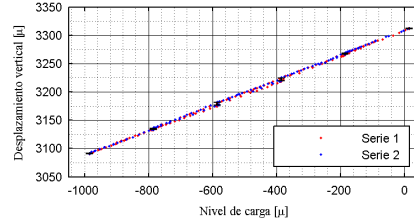
(j) Posición de medición P_{18} (Se realizó una serie).

FIGURA E.38. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C2 (RE 3).

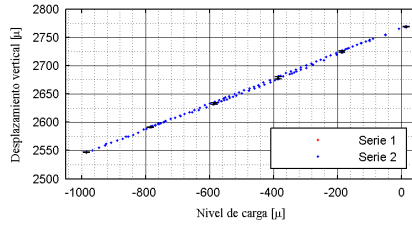
E.7. Resultados para el experimento P3C3



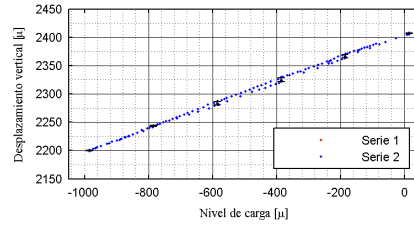
(a) Posición de medición P_2 (Se realizó una serie).



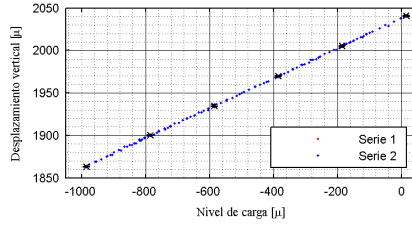
(b) Posición de medición P_4 .



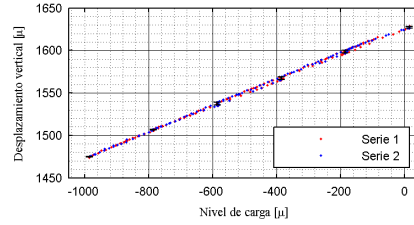
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



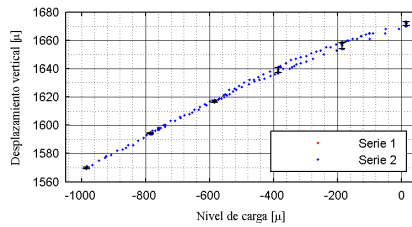
(d) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



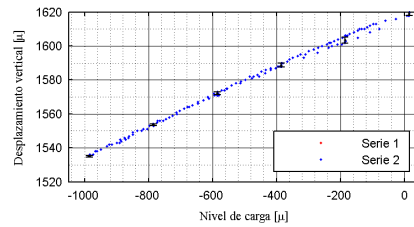
(e) Posición de medición P_{10} (Se realizó una serie).



(f) Posición de medición P_{12} .

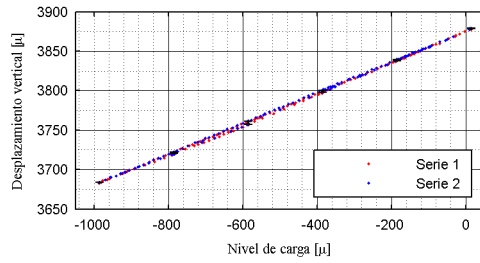


(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

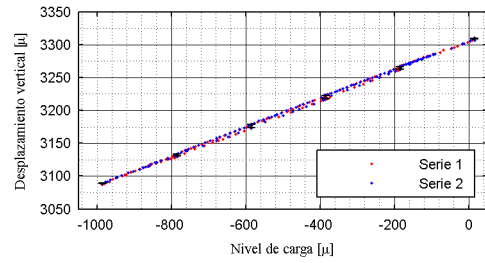


(h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

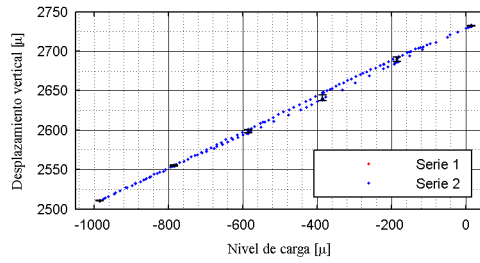
FIGURA E.39. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C3 (RE 1).



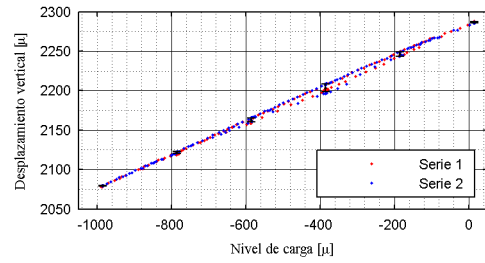
(a) Posición de medición P_2 .



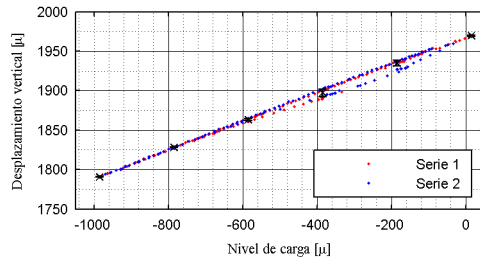
(b) Posición de medición P_4 .



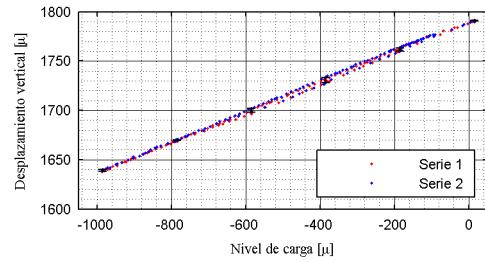
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



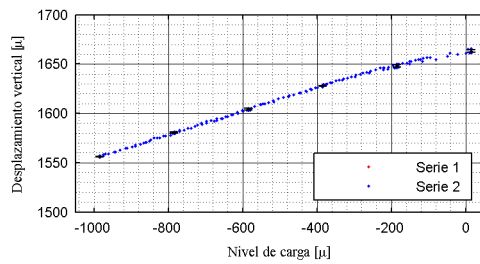
(d) Posición de medición P_8 .



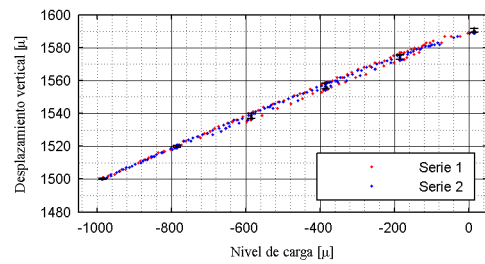
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

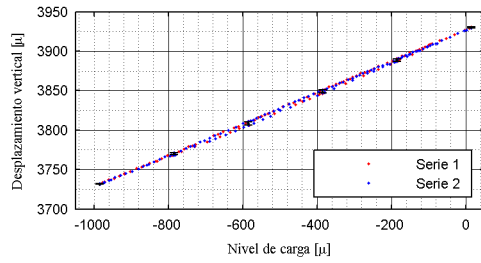


(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

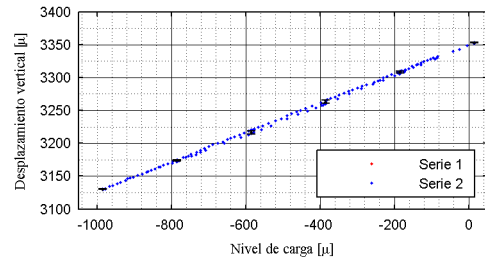


(h) Posición de medición P_{16} .

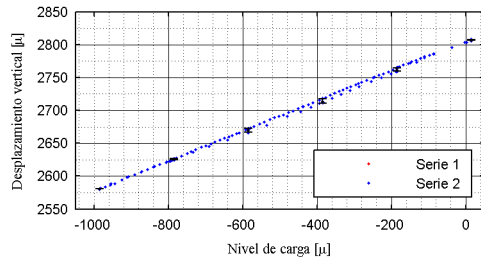
FIGURA E.40. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C3 (RE 2).



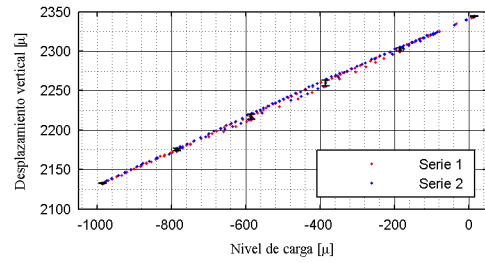
(a) Posición de medición P_2 .



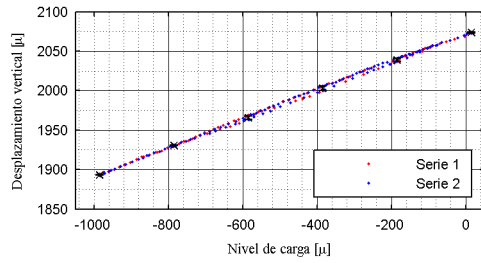
(b) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



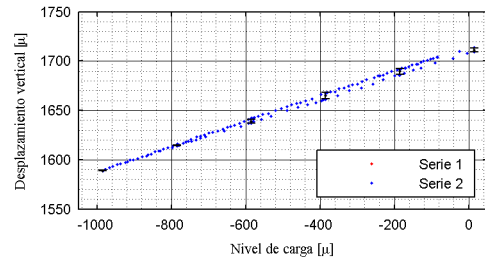
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



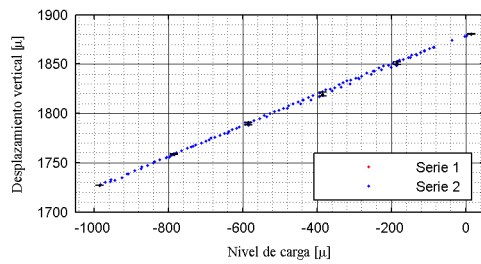
(d) Posición de medición P_8 .



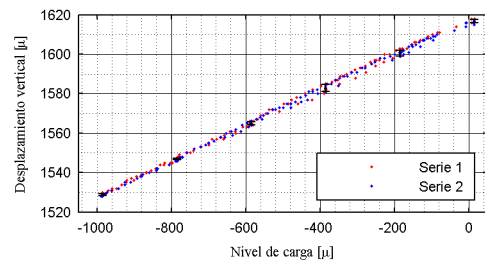
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).



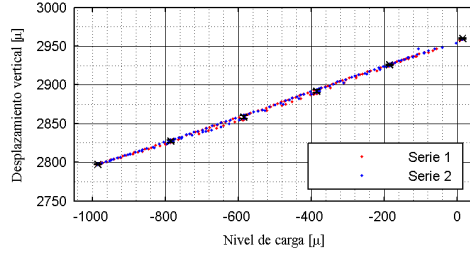
(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).



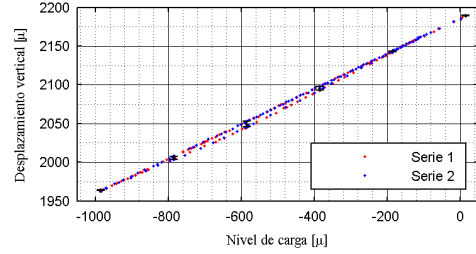
(h) Posición de medición P_{16} .

FIGURA E.41. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P3C3 (RE 3).

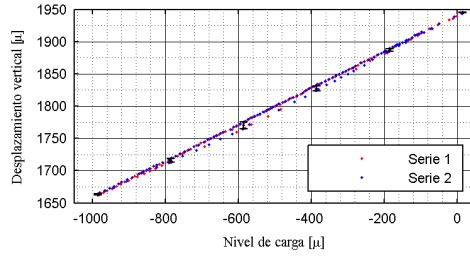
E.8. Resultados para el experimento P4C1



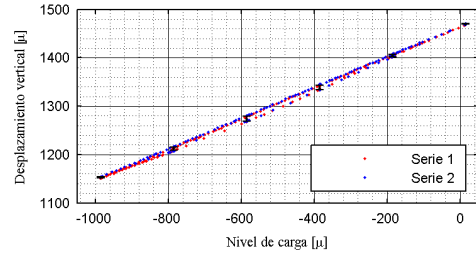
(a) Posición de medición P_2 .



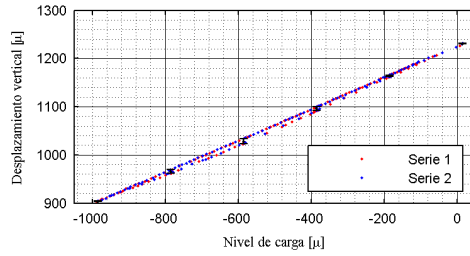
(b) Posición de medición P_4 .



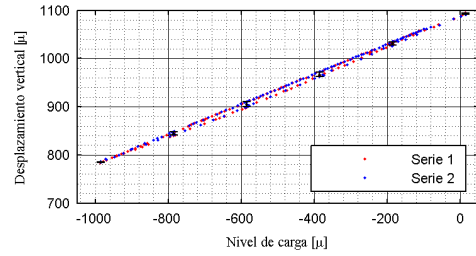
(c) Posición de medición P_6 .



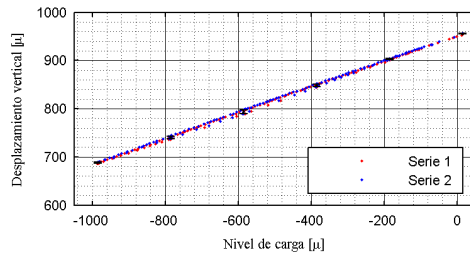
(d) Posición de medición P_8 .



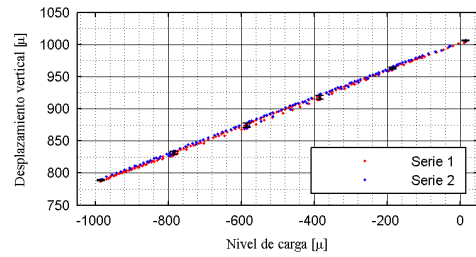
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

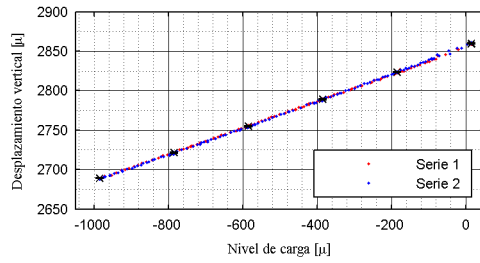


(g) Posición de medición P_{14} .

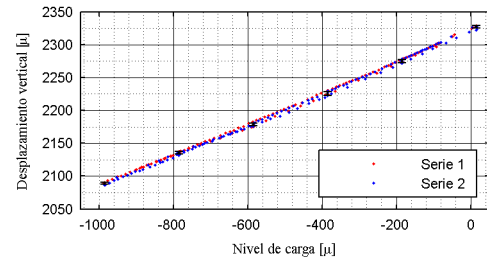


(h) Posición de medición P_{16} .

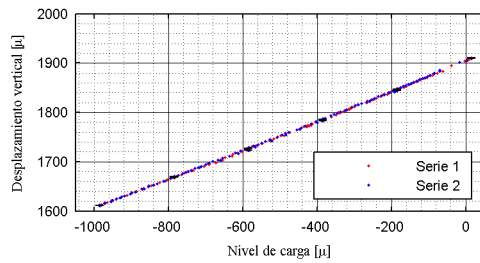
FIGURA E.42. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 1).



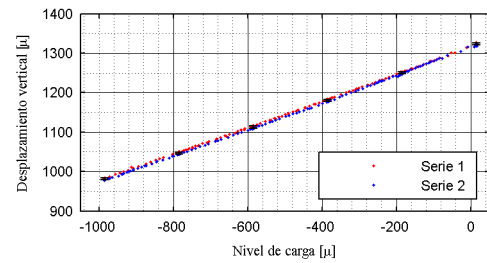
(a) Posición de medición P_2 .



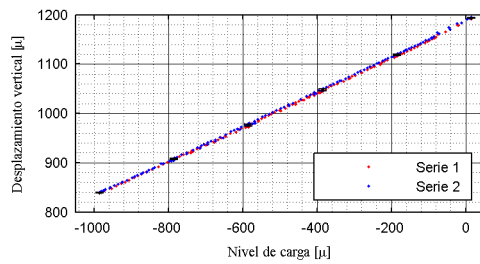
(b) Posición de medición P_4 .



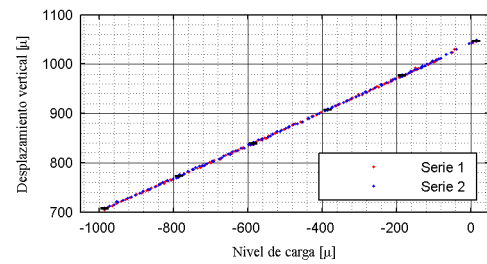
(c) Posición de medición P_6 .



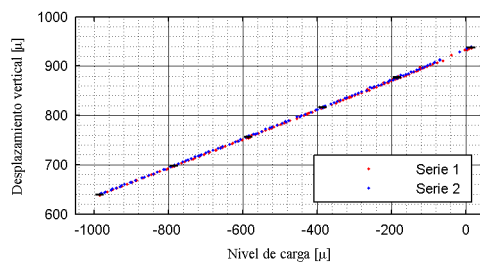
(d) Posición de medición P_8 .



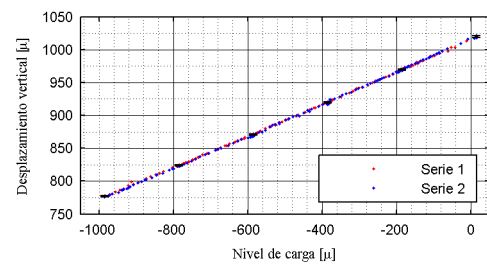
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

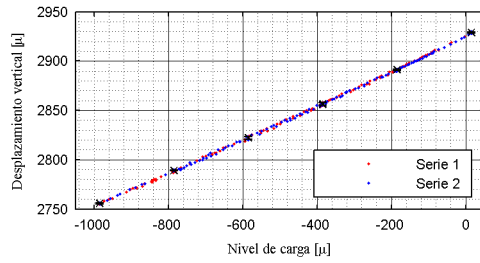


(g) Posición de medición P_{14} .

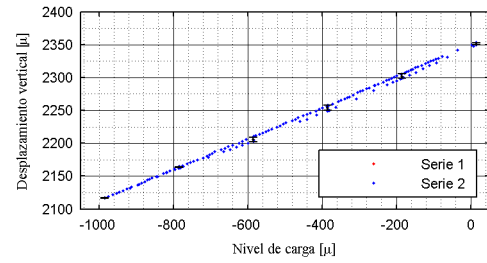


(h) Posición de medición P_{16} .

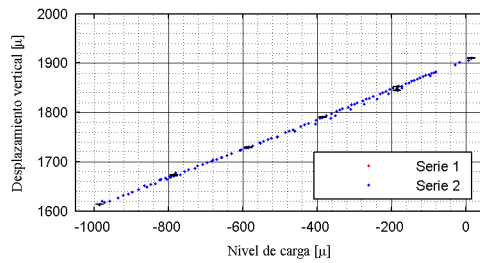
FIGURA E.43. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 2).



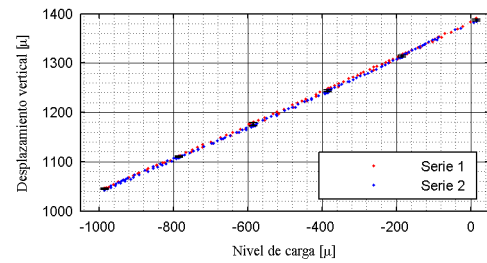
(a) Posición de medición P_2 .



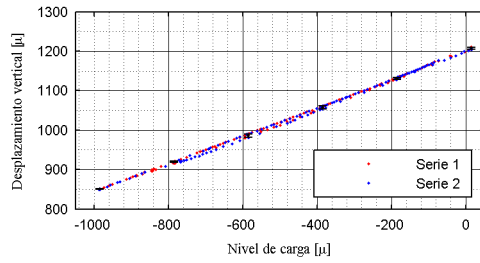
(b) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



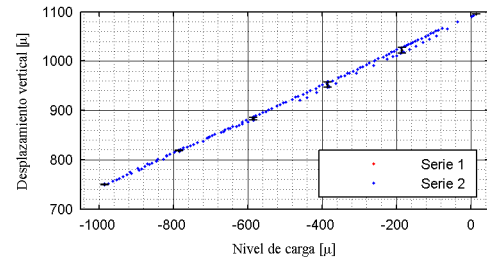
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



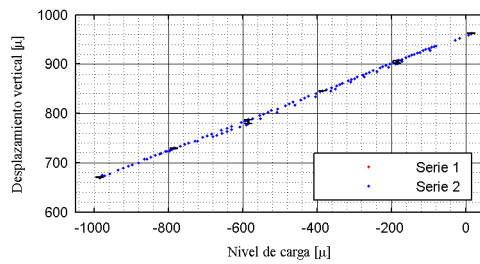
(d) Posición de medición P_8 .



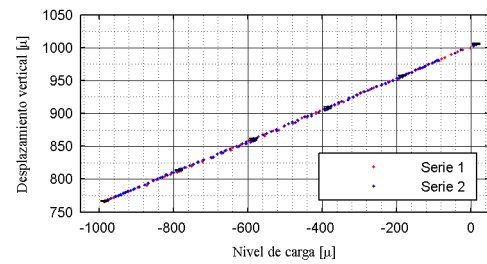
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).

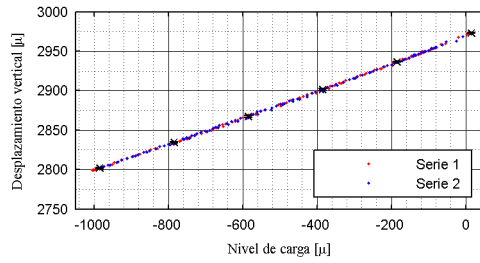


(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

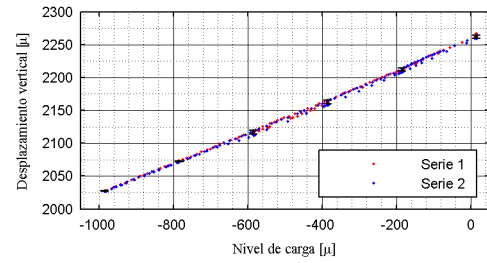


(h) Posición de medición P_{16} .

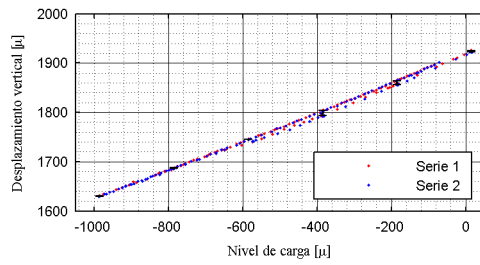
FIGURA E.44. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 3).



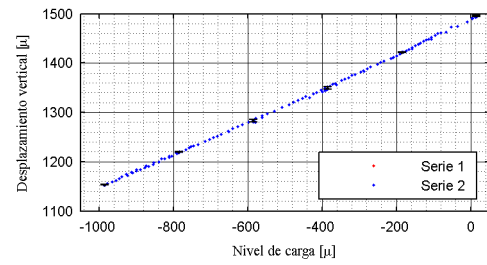
(a) Posición de medición P_2 .



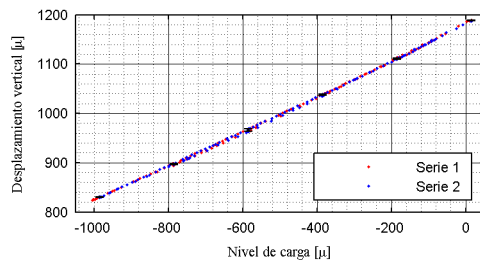
(b) Posición de medición P_4 .



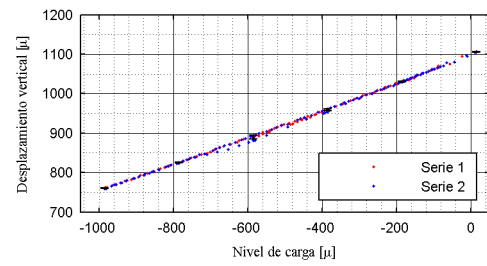
(c) Posición de medición P_6 .



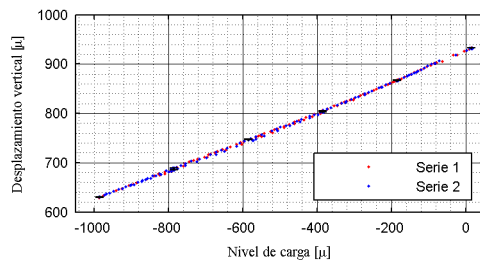
(d) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



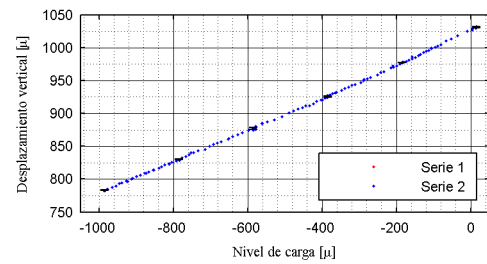
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

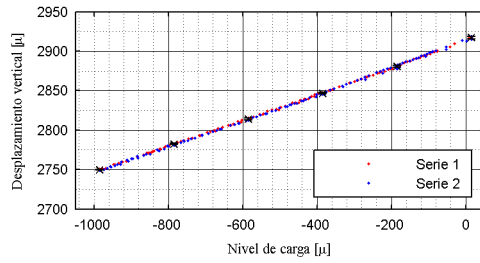


(g) Posición de medición P_{14} .

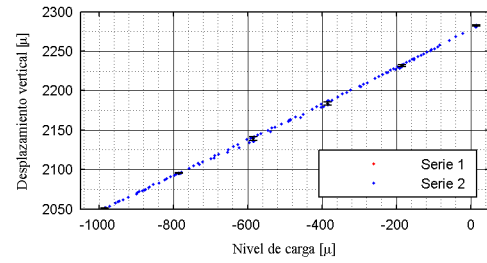


(h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

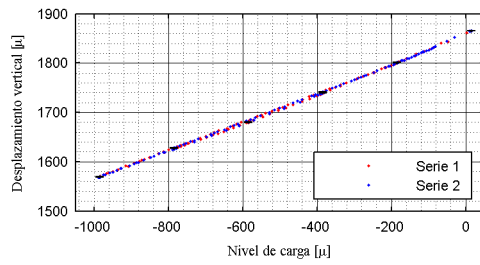
FIGURA E.45. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 4).



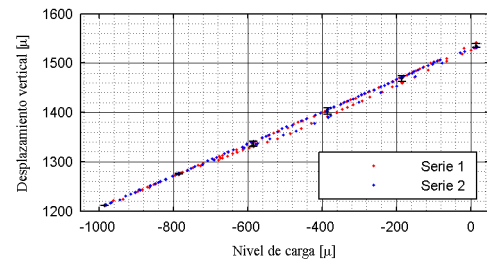
(a) Posición de medición P_2 .



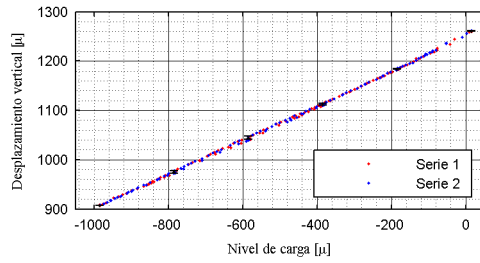
(b) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



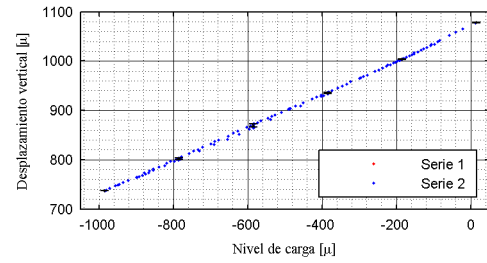
(c) Posición de medición P_6 .



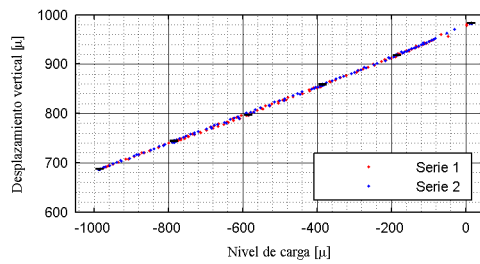
(d) Posición de medición P_8 .



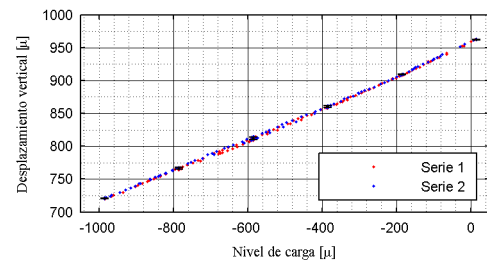
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).



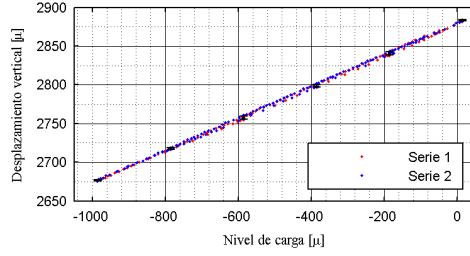
(g) Posición de medición P_{14} .



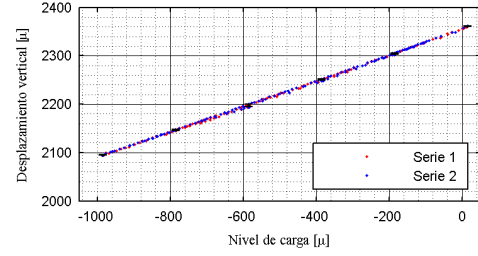
(h) Posición de medición P_{16} .

FIGURA E.46. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C1 (RE 5).

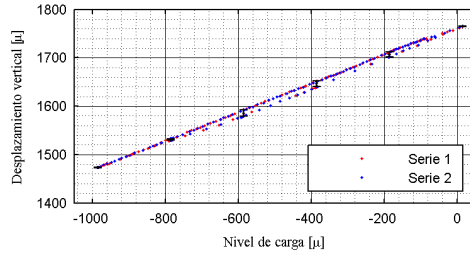
E.9. Resultados para el experimento P4C2



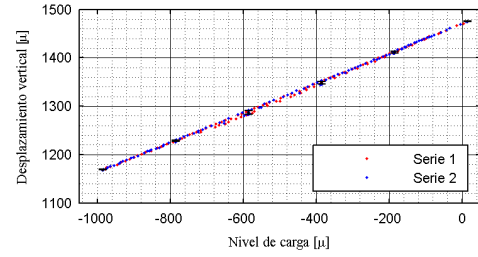
(a) Posición de medición P_2 .



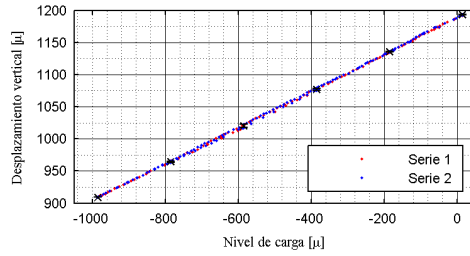
(b) Posición de medición P_4 .



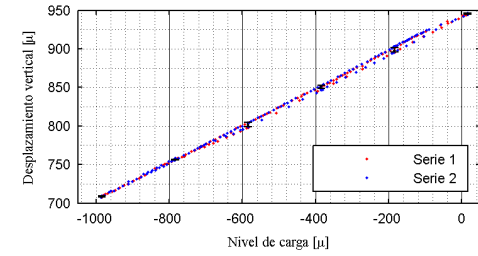
(c) Posición de medición P_6 .



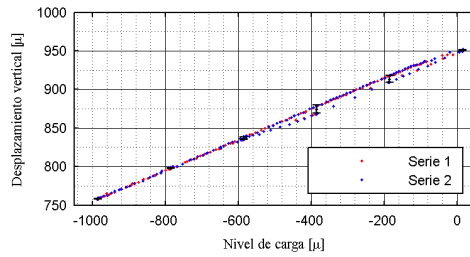
(d) Posición de medición P_8 .



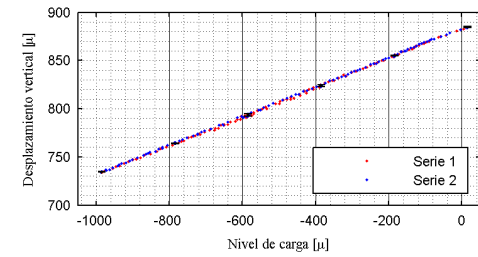
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

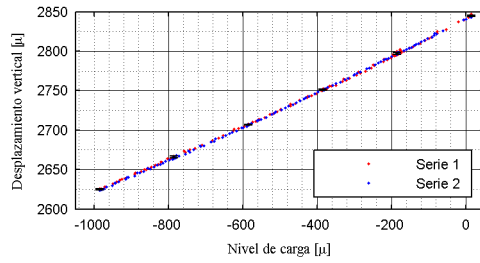


(g) Posición de medición P_{14} .

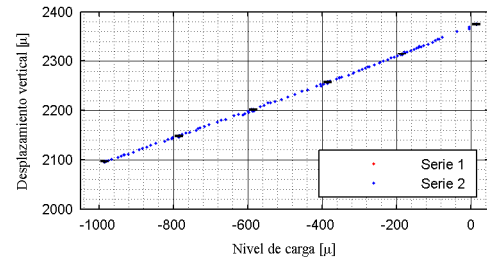


(h) Posición de medición P_{16} .

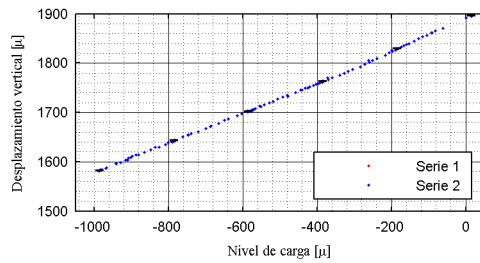
FIGURA E.47. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 1).



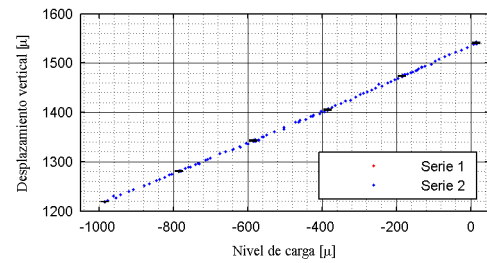
(a) Posición de medición P_2 .



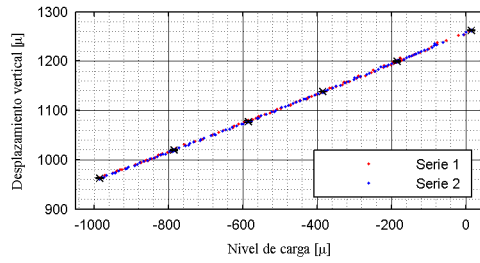
(b) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



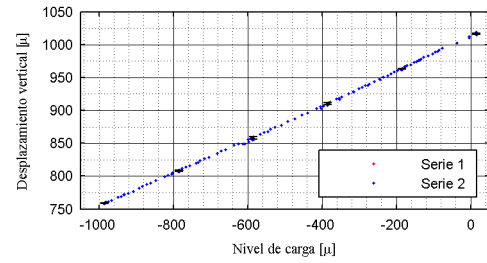
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



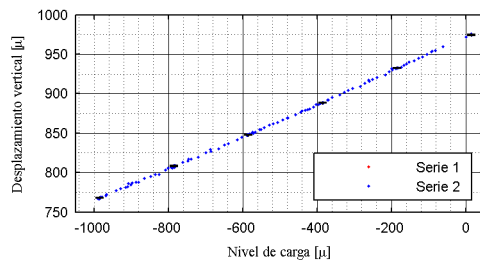
(d) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



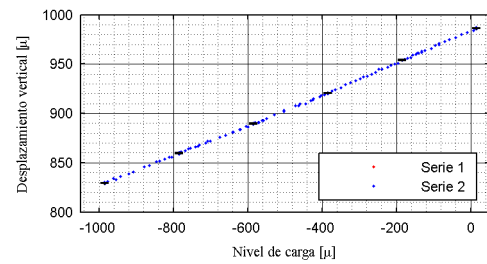
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).

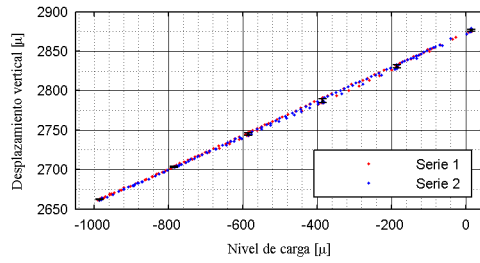


(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

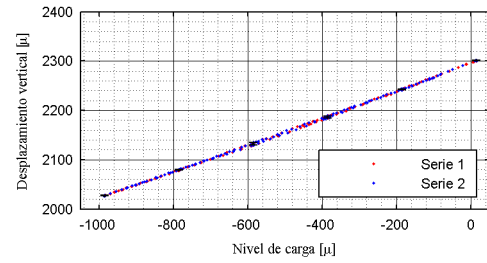


(h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

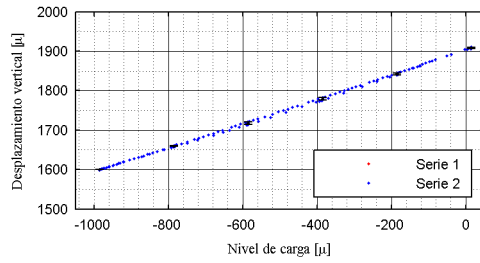
FIGURA E.48. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 2).



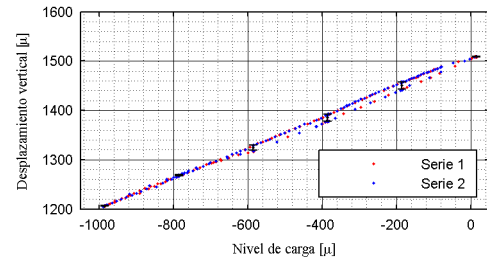
(a) Posición de medición P_2 .



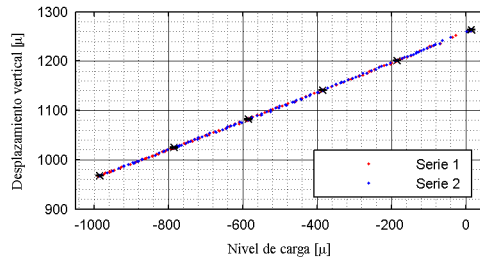
(b) Posición de medición P_4 .



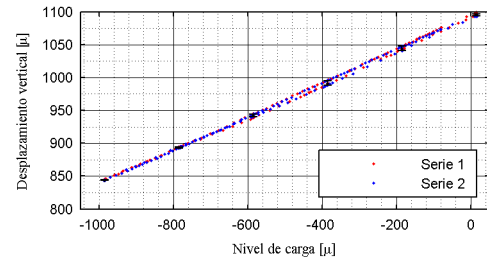
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



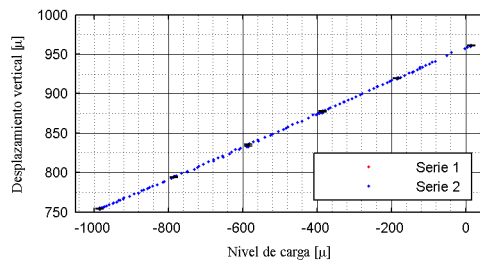
(d) Posición de medición P_8 .



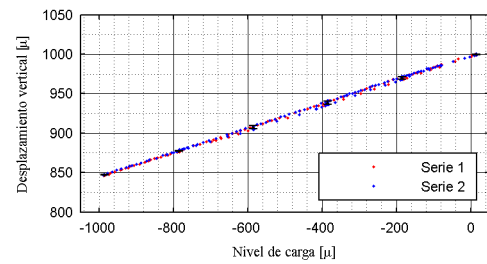
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .

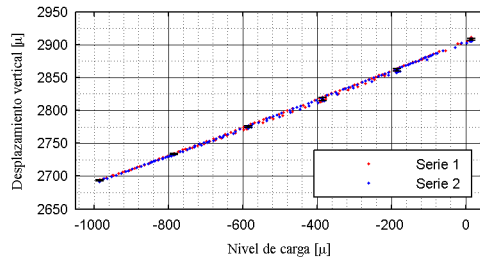


(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).

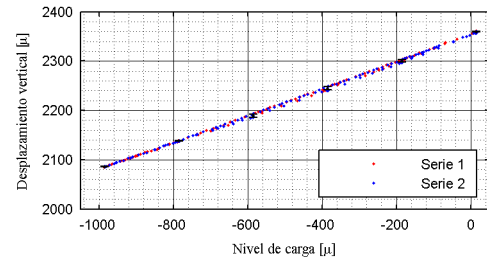


(h) Posición de medición P_{16} .

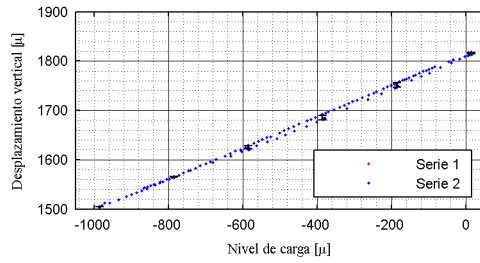
FIGURA E.49. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 3).



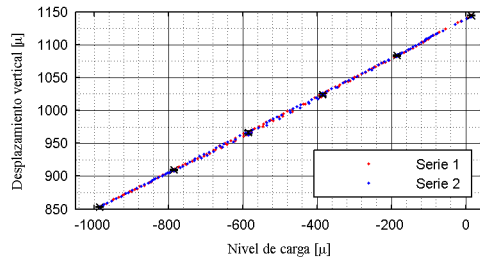
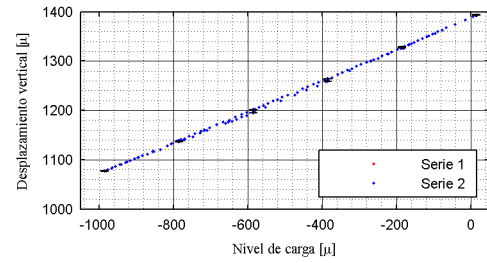
(a) Posición de medición P_2 .



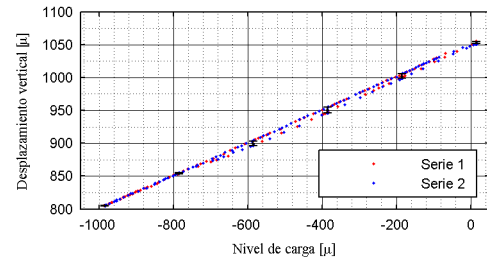
(b) Posición de medición P_4 .



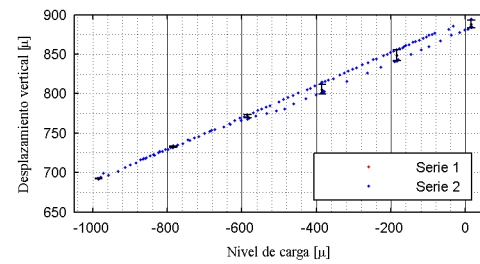
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie). (d) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} .



(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie). (h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

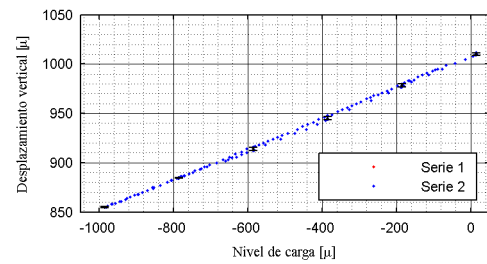
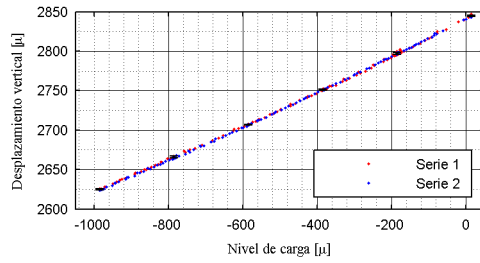
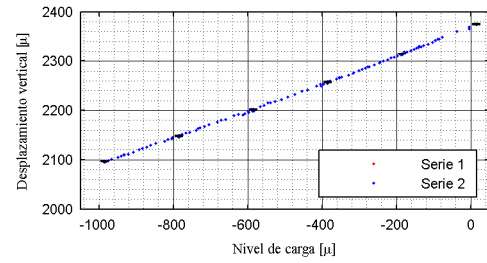


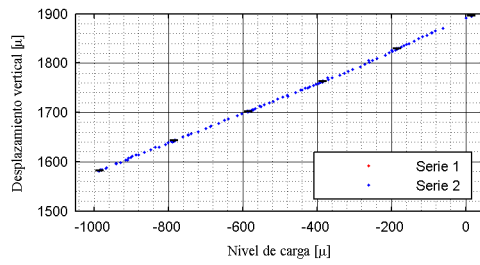
FIGURA E.50. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 4).



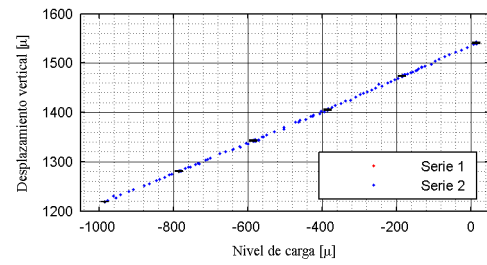
(a) Posición de medición P_2 .



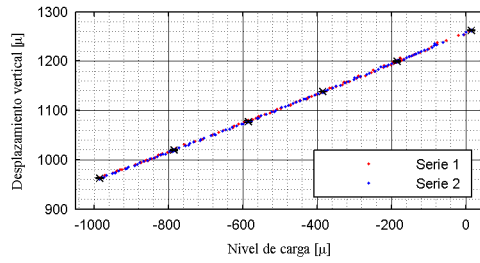
(b) Posición de medición P_4 (Se realizó una serie).



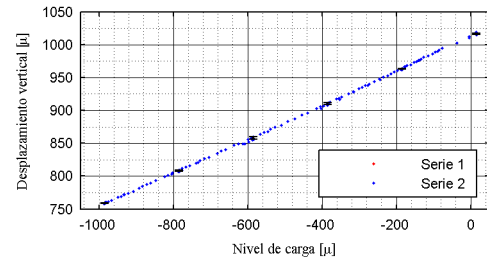
(c) Posición de medición P_6 (Se realizó una serie).



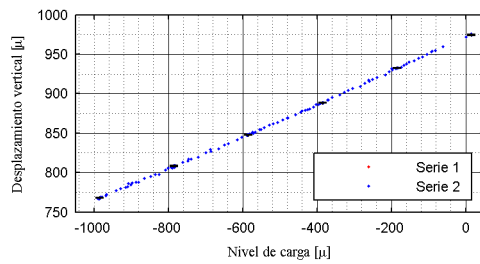
(d) Posición de medición P_8 (Se realizó una serie).



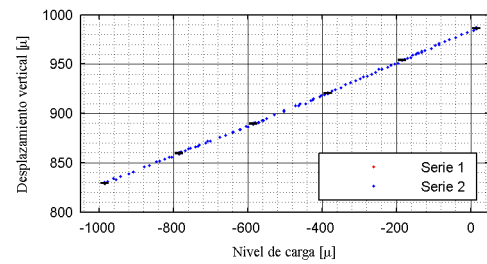
(e) Posición de medición P_{10} .



(f) Posición de medición P_{12} (Se realizó una serie).



(g) Posición de medición P_{14} (Se realizó una serie).



(h) Posición de medición P_{16} (Se realizó una serie).

FIGURA E.51. Desplazamientos verticales en la probeta para el experimento P4C2 (RE 5).