



Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación

Grado en Edificación

EVALUACIÓN DE DAÑO MEDIANTE EL MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA DE  
VIGAS DE MADERA ANTIGUA REFORZADAS CON CFRP

Realizado por:

Antonio Jesús Martínez Jiménez

Tutores:

Francisco José Rescalvo Fernández

Antolino Gallego Molina

CURSO 2015/2016



D. Francisco José Rescalvo Fernández, Investigador del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada y D. Antolino Gallego Molina, Profesor titular del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, como tutores del Proyecto Fin de Grado de D. Antonio Jesús Martínez Jiménez.

Informan:

Que el presente trabajo titulado:

“Evaluación de daño mediante el método de emisión acústica de vigas de madera antigua reforzadas con CFRP”.

ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo nuestra dirección, y con esta fecha autorizamos a su presentación.

Granada, a 5 de septiembre de 2016

Fdo.

Francisco José Rescalvo Fernández

Antolino Gallego Molina



## Evaluación de daño mediante el método de emisión acústica de vigas de madera antigua reforzadas con CFRP

**Antonio Jesús Martínez Jiménez**

### **Palabras clave:**

Emisión acústica, Vigas, Madera, CFRP, Daño, Ensayos a flexión, Refuerzo.

### **Resumen:**

Los materiales compuestos como el CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) tienen una capacidad resistente que está fuera de duda, extendiéndose su uso en industrias como la aeronáutica o la automoción. En cuanto a la construcción se usan, en la actualidad, de manera extensiva en el refuerzo de estructuras de hormigón, sin embargo su uso en estructuras de madera es muy limitado todavía.

Por otra parte, como es bien conocida la Emisión Acústica (EA) es un método pasivo de ensayos no destructivos (END). Su potencial radica en la enorme capacidad para llevar a cabo un diagnóstico estructural adecuado en tiempo real. La posibilidad de localización del daño en tiempo real es uno de sus mejores atributos. Sin embargo, la precisión de la localización a menudo puede ser limitada en materiales como la madera, debido a la influencia de factores tales como la heterogeneidad, dispersión, atenuación, conversiones de modo, reflexiones y otros efectos físicos que sufren las ondas elásticas que viajan dentro del material.

Se pretende en este proyecto evaluar el daño mediante el método de emisión acústica en vigas de madera antigua con y sin refuerzo de CFRP en su cara inferior (zona a tracción) en ensayos a flexión. Para ello se han utilizado 6 vigas en total; 2 sin refuerzo, 2 con refuerzo de CFRP y resina de la casa comercial *Sika S.A.U.* y 2 con refuerzo de CFRP y resina de la casa comercial *Drizoro S.A.U.* La evaluación del daño incluye una localización en tiempo real de los fallos que se producen en las vigas (nudos, fisuras, roturas de resina y CFRP, deslaminaciones, etc). Para ello, además de los ensayos a flexión evaluados con EA, se han realizado dos estudios previos de atenuación y localización en las vigas. El objetivo principal es predecir las zonas débiles y el daño determinante en la rotura final de la estructura antes de que ésta se produzca. El proyecto se enmarca dentro del proyecto de investigación *REVMAC* y con la empresa *Dávila Restauración de Monumentos S.L.* Las vigas se han extraído durante la rehabilitación de la cubierta de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada.



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a Antolino Gallego Molina por ofrecerme esta oportunidad de desarrollo tanto académico como personal. Agradecer también su amabilidad y trato que me han hecho sentir uno más de este grupo desde el primer día, así como su tiempo e implicación en el desarrollo de este proyecto.

No tengo palabras para agradecer todo el esfuerzo y dedicación a Francisco José Rescalvo Fernández. Por enseñarme todo lo que ha podido, por soportarme durante más de un año y por su amistad dentro y fuera de la universidad. Gracias.

A todos los miembros del grupo de investigación ADIME y compañeros, Alberto, Chihab, David, Elías, Francisco, Gonzalo, Ismael, Iván y Rubén por su recibimiento y compañerismo todo este tiempo.

Agradecer muy especialmente a Elisabet Suárez y David Jiménez por su paciencia y ayuda desinteresada en todo momento. Sin duda lo mejor que me llevo de esta experiencia es su amistad.

Por último, agradecer a toda mi familia, en especial a mis padres por su comprensión infinita y por todo su esfuerzo diario invertido en mi educación. Gracias a Marisa por suponer para mí un ejemplo de superación y por enseñarme la lección más valiosa de mi vida.



## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

EA	Emisión Acústica
END	Ensayos No Destructivos
CFRP	Polímero reforzado con fibra de carbono ( <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> )
MARSE	Área medida bajo la envolvente de la señal rectificadora ( <i>Measured Area Of The Rectified Signal Envelop</i> )
LUCY	Incertidumbre en la localización ( <i>Location Uncertainty</i> )
LVDT	Transformador diferencial variable lineal ( <i>Linear Variable Differential Transformer</i> )



---

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.2. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
<b>2. MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA .....</b>	<b>3</b>
2.1. CONCEPTO.....	3
2.2. DEFINICIONES.....	5
2.3. PARÁMETROS DE EA DE SEÑALES TRANSITORIAS.....	8
2.4. ATENUACIÓN.....	10
ATENUACIÓN GEOMÉTRICA.....	10
ABSORCIÓN .....	11
DISPERSIÓN ( <i>SCATTERING</i> ).....	12
DIFRACCIÓN.....	13
ATENUACIÓN EN MADERA.....	13
ATENUACIÓN EN CFRP .....	15
2.5. LOCALIZACIÓN LINEAL.....	15
2.5.1. INTRODUCCIÓN .....	15
2.5.2. LOCALIZACIÓN.....	18
<b>3. ENSAYO DE ATENUACIÓN .....</b>	<b>21</b>
3.1. ENSAYO: DESCRIPCIÓN.....	21
3.2. RESULTADOS. ....	23
SR1 (sin refuerzo) .....	23
SR2 (sin refuerzo) .....	24
LRS1 (con refuerzo laminado de CFRP) .....	26
LRS2 (con refuerzo laminado de CFRP) .....	27
LRD1 (con refuerzo laminado de CFRP) .....	29
LRD2 (con refuerzo laminado de CFRP) .....	30
<b>4. ENSAYO DE LOCALIZACIÓN DE ROTURAS DE MINA: VELOCIDAD .....</b>	<b>33</b>
4.1. ENSAYO: DESCRIPCIÓN.....	33
4.2. RESULTADOS .....	36
SR1.....	36
SR2.....	38
LRS1 .....	40
LRS2 .....	41

LRD1 .....	42
LRD2 .....	43
<b>5. ENSAYO A FLEXIÓN CON EMISIÓN ACÚSTICA .....</b>	<b>45</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	45
5.2. ENSAYO: DESCRIPCIÓN.....	46
5.3. INSTRUMENTACIÓN .....	47
EMISIÓN ACÚSTICA .....	47
CARGA Y DESPLAZAMIENTO.....	51
5.4. RESULTADOS .....	53
SR1.....	53
SR2.....	58
LRS1 .....	65
LRS2 .....	73
LRD1 .....	80
LRD2 .....	86
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>99</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	99
6.2. TRABAJOS FUTUROS.....	100
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fuente de EA generando una onda de EA por un estímulo del material. Cadena del proceso de EA: sensor, señal de EA, preamplificador, sistema de adquisición y ordenador. ....	3
Figura 2.2. Aplicación del método de emisión acústica en la estructura de un puente. ....	4
Figura 2.3. Aplicación del método de emisión acústica en vasijas de gas a presión. ....	5
Figura 2.4. Aplicación del método de emisión acústica en una tubería. ....	5
Figura 2.5. Izquierda: Señal de EA transitoria generada por la rotura de una mina en una superficie de madera. Derecha: Señal de EA continua generada por el ruido de fondo en un laboratorio.....	9
Figura 2.6. Parámetros de EA tradicionalmente usados. ....	10
Figura 2.7. Dispersión de una onda plana en un nudo de madera (se generan frentes de ondas secundarios). ....	12
Figura 2.8. Difracción de la onda en una rendija. ....	13
Figura 2.9. Fotografía de nudo en madera.....	14
Figura 2.10. Fotografía de fendas en una viga de madera.....	14
Figura 2.11. Fotografía de una viga de madera con cambios en la orientación de la fibra. ....	14
Figura 2.12. Fotografía de una viga de madera afectada por pudrición.....	15
Figura 2.13. Pasos en un proceso de localización. ....	16
Figura 2.14. Determinación del tiempo de llegada con el criterio TOA = FTC usando distintos umbrales.....	16
Figura 2.15. Clasificación de los métodos de localización.....	18
Figura 2.16. Esquema de sensores en una viga de madera. Cotas en mm. ....	19
Figura 2.17. Esquema en localización lineal en caso de que ambos vecinos al FHC son <i>hits</i> del evento. ....	20
Figura 2.18. Esquema en localización lineal en caso de que sólo un vecino del FHC es <i>hit</i> del evento. ....	20
Figura 3.1. Sensores tipo VS45-H. ....	21
Figura 3.2. Respuesta en frecuencia de un sensor tipo VS45-H.....	21
Figura 3.3. Esquema de posición de sensor EA en la viga y de roturas HN. Cotas en mm. ....	22
Figura 3.4. Esquema del ensayo de atenuación de EA.....	22
Figura 3.5. Designación de caras en las vigas. Izquierda: Vigas sin refuerzo (SR). Derecha: Viga con refuerzo (LR). ....	22
Figura 3.6. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga SR1. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.....	24
Figura 3.7. Fotografía cara latera (C) de la viga SR1.....	24

Figura 3.8. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga SR2. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.....	25
Figura 3.9. Fotografía cara latera (C) de la viga SR2.....	25
Figura 3.10. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRS1. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.....	27
Figura 3.11. Fotografía cara latera (C) de la viga LRS1.....	27
Figura 3.12. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRS2. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.....	28
Figura 3.13. Fotografía cara latera (C) de la viga LRS2.....	29
Figura 3.14. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRD1. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.....	30
Figura 3.15. Fotografía cara latera (C) de la viga LRD1.....	30
Figura 3.16. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRD2. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.....	31
Figura 3.17. Fotografía cara latera (C) de la viga LRD2.....	32
Figura 4.1. Esquema de posicionamiento de sensores de EA en la viga (S1 a S6). Cotas en mm. ....	33
Figura 4.2. Localización lineal de una fuente de EA. La fuente F está situada entre dos sensores, S2 y S4. ....	34
Figura 4.3. Arriba: Amplitud (mV) con respecto al tiempo ( $\mu$ s) de un <i>hit</i> registrado por el S1. Abajo: Amplitud (mV) con respecto al tiempo ( $\mu$ s) de un <i>hit</i> registrado por el S3. Viga LRS1. ..	35
Figura 4.4. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga SR1.....	37
Figura 4.5. Localización lineal de una fuente de EA. La fuente F está situada fuera de los dos sensores S2 y S4. Cotas en mm. ....	37
Figura 4.6. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga SR1. ....	38
Figura 4.7. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga SR2.....	39
Figura 4.8 Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga SR2. ....	39
Figura 4.9. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRS1.....	40
Figura 4.10. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRS1..	40
Figura 4.11. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRS2.....	41

Figura 4.12. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRS2..	41
Figura 4.13. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRD1. ....	42
Figura 4.14. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRD1.	42
Figura 4.15. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRD2. ....	43
Figura 4.16. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRD2.	44
Figura 5.1. Ensayo a flexión de viga de madera de 1,3 m de longitud.....	45
Figura 5.2. Pasos seguidos en el proceso de selección de las distintas disposiciones de refuerzos de CFRP.....	45
Figura 5.3. Esquema del ensayo a flexión y posición de los sensores de EA en la viga. Cotas en mm. ....	46
Figura 5.4. Ensayo a flexión de la viga LRS1. ....	47
Figura 5.6. Grasa de silicona utilizada como acoplante acústico. ....	48
Figura 5.7. Montaje de un sensor mediante un fijador magnético. ....	49
Figura 5.8. Cable sensor-preamplificador. ....	49
Figura 5.9. Preamplificador de EA. ....	49
Figura 5.10. Cable coaxial.....	50
Figura 5.11. Equipo de adquisición de Emisión Acústica. ....	50
Figura 5.12. Portátil utilizado en los ensayos de EA.....	51
Figura 5.13. Máquina de ensayos modelo CH4-ST-100. ....	51
Figura 5.14. Galga extensiométrica. Cotas en mm. ....	52
Figura 5.15. Disposición de los LVDTs. ....	52
Figura 5.16. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga SR1.....	54
Figura 5.17. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga SR1. ....	54
Figura 5.18. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga SR1. ....	55
Figura 5.19. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga SR1. ....	55
Figura 5.20. Esquema de daños en la cara C de la viga SR1. Cotas en mm.....	56
Figura 5.21. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga SR1. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.....	57
Figura 5.22. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: <i>Hits</i> en cada tramo de carga. Violeta: <i>Hits</i> de todo el ensayo. Viga SR1.....	58
Figura 5.23. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga SR1.....	59

Figura 5.24. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga SR2. ....	59
Figura 5.25. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga SR2. ....	60
Figura 5.26. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga SR2. ....	60
Figura 5.27. Esquema de daños de la viga SR2. Cotas en mm. ....	61
Figura 5.28. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Rojo: Eventos localizados de EA en correlación. Verde: Eventos localizados de EA en distribución. Sólo eventos con LUCY mayor que 20 cm. Viga SR2. ....	62
Figura 5.29. Energía respecto al eje de la viga. Verde: Eventos localizados de EA en correlación. Rojo: Energía localizada y de EA en distribución. Sólo eventos con LUCY mayor que 20 cm. Viga SR2. ....	63
Figura 5.30. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga SR2. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga. ....	64
Figura 5.31. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: <i>Hits</i> en cada tramo de carga. Violeta: <i>Hits</i> de todo el ensayo. Viga SR2. ....	65
Figura 5.32. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRS1. ....	66
Figura 5.33. Azul: Carga aplicada referida en tanto por ciento frente al tiempo. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga LRS1. ....	67
Figura 5.34. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga LRS1. ....	67
Figura 5.35. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRS1. ....	68
Figura 5.36. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRS1. ....	68
Figura 5.37. Esquema de daños de la viga LRS1. Cotas en mm. ....	69
Figura 5.38. Nudo interno separado en 2 mitades. Viga LRS1. ....	69
Figura 5.39. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRS1. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga. ....	72
Figura 5.40. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: <i>Hits</i> en cada tramo de carga. Violeta: <i>Hits</i> de todo el ensayo. Viga LRS1. ....	73
Figura 5.41. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRS2. ....	74
Figura 5.42. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga LRS2. ....	74
Figura 5.43. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRS2. ....	75
Figura 5.44. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRS2. ....	75
Figura 5.45. Esquema de daños de la viga LRS2. Cotas en mm. ....	76
Figura 5.46. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRS2. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga. ....	78

Figura 5.47. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: <i>Hits</i> en cada tramo de carga. Violeta: <i>Hits</i> de todo el ensayo. Viga LRS2.....	79
Figura 5.48. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRD1.....	80
Figura 5.49. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga LRD1.....	81
Figura 5.50. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRD1.....	81
Figura 5.51. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRD1.....	82
Figura 5.52. Esquema de daños de la viga LRD1. Cotas en mm.....	83
Figura 5.53. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Rojo: Eventos localizados de EA en correlación. Verde: Eventos localizados de EA en distribución. Viga LRD1.....	84
Figura 5.54. Energía respecto al eje de la viga. Verde: Eventos localizados de EA en correlación. Rojo: Energía localizada y de EA en distribución. Viga LRD1.....	84
Figura 5.55. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRD1. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.....	85
Figura 5.56. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: <i>Hits</i> en cada tramo de carga. Violeta: <i>Hits</i> de todo el ensayo. Viga LRD1.....	86
Figura 5.57. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRD2.....	87
Figura 5.58. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: <i>Hits</i> por canal de EA frente al tiempo. Viga LRD2.....	88
Figura 5.59. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRD2.....	88
Figura 5.60. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRD2.....	89
Figura 5.61. Esquema de daños de la viga LRD2. Cotas en mm.....	90
Figura 5.62. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRD2. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.....	91
Figura 5.63. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: <i>Hits</i> en cada tramo de carga. Violeta: <i>Hits</i> de todo el ensayo. Viga LRD2.....	92
Figura 5.64. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR1.....	93
Figura 5.65. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR1.....	93
Figura 5.66. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR2.....	94
Figura 5.67. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR2.....	94
Figura 5.68. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS1.....	95
Figura 5.69. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS1.....	95
Figura 5.70. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS2.....	96
Figura 5.71. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS2.....	96
Figura 5.72. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD1.....	97

Figura 5.73. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD1. .... 97

Figura 5.74. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD2... 98

Figura 5.75. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD2. .... 98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Dependencia aproximada de la amplitud de la onda con la distancia fuente-sensor para diferentes tipos de ondas, en campo lejano (distancias alejadas de la fuente). .....	11
Tabla 3.1. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga SR1.....	23
Tabla 3.2. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga SR1.....	23
Tabla 3.3. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga SR2.....	25
Tabla 3.4. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRS1.....	26
Tabla 3.5. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRS1.....	26
Tabla 3.6. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRS2.....	28
Tabla 3.7. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRS2.....	28
Tabla 3.8. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRD1.....	29
Tabla 3.9. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRD1.....	29
Tabla 3.10. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRD2.....	31
Tabla 3.11. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRD2.....	31
Tabla 3.12. Atenuación en dBAE/m de todas las vigas.....	32
Tabla 4.1. Posición real de los sensores en la viga SR1.....	36
Tabla 4.2. Posición de las fuentes de EA (xt) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga SR1.....	36
Tabla 4.3. Posición real de los sensores en la viga SR2.....	38
Tabla 4.4. Posición de las fuentes de EA (xt) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga SR2.....	38
Tabla 4.5. Posición real de los sensores en la viga LRS1.....	40
Tabla 4.6. Posición de las fuentes de EA (xt) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRS1.....	40
Tabla 4.7. Posición real de los sensores en la viga LRS2.....	41
Tabla 4.8. Posición de las fuentes de EA (xt) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRS2.....	41

Tabla 4.9. Posición real de los sensores en viga LRD1. ....	42
Tabla 4.10. Posición de las fuentes de EA (xt) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRD1. ....	42
Tabla 4.11. Posición real de los sensores en la viga LRD2.....	43
Tabla 4.12. Posición de las fuentes de EA (xt) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRD2. ....	43
Tabla 4.13. Resultados del error relativo y de la velocidad de propagación optimizada para cada viga y su densidad. ....	44
Tabla 5.1. Disposiciones de los refuerzos de CFRP sobre las vigas sometidas a ensayos a flexión en este Proyecto Fin de Grado.....	46
Tabla 5.2. Número de serie de los sensores utilizados en el ensayo a flexión. ....	48
Tabla 5.3. Número de serie de los preamplificadores utilizados en los ensayos a flexión. ....	50

---

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Históricamente la madera ha sido un material ampliamente utilizado en la construcción arquitectónica. Al ser un recurso fácil de encontrar y manejar y, gracias a sus buenas propiedades mecánicas, la humanidad ha construido edificaciones de madera desde sus inicios. En la actualidad la madera sigue siendo un material constructivo de alta calidad y se emplea en un gran número de países como material principal en la construcción de todo tipo de edificaciones. Se estima que existen en el mundo en torno a 16.000 especies de madera diferentes, de las cuales se emplean de forma comercial alrededor de 2.000.

En España la utilización de la madera ha tenido especial relevancia en las estructuras antiguas, aunque gracias a sus características, vuelve a cobrar importancia en la actualidad. Este hecho hace del refuerzo de estructuras de madera una oportunidad laboral en la construcción. La rehabilitación de estructuras es además, más sostenible que la demolición y reposición de una estructura nueva.

El refuerzo de estructuras de madera se puede realizar de distintas formas, siendo las usadas habitualmente: armados, madera laminada, elementos metálicos, losas de hormigón, abrazaderas, pasadores roscados, cosido con barras, etc. Estas intervenciones plantean problemas tales como añadir peso a la estructura, dificultad de adaptarse a ella por su geometría o dañarla mediante perforaciones y huecos.

Nuevas formas de intervención como el uso de los materiales compuestos pueden solucionar estos problemas. Entre estos materiales se encuentra el *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), es decir, el material compuesto de fibras de carbono embebidas en una matriz polimérica de resina epoxi.

El CFRP se ha utilizado en refuerzo de estructuras de hormigón, metal, madera o mampostería. La mayoría de aplicaciones son en refuerzos de estructuras de hormigón armado, no existiendo una extensa aplicación y trabajo previo sobre su uso en estructuras de madera. El procedimiento de cálculo, recogido en las guías existentes, se basa en los mismos principios que los refuerzos con chapas de acero, considerando el comportamiento elástico lineal del CFRP y los posibles modos de fallo de la estructura reforzada. Merece especial atención la adherencia entre el material y el refuerzo y el fallo conocido como deslaminación, en el que el refuerzo se desprende de manera repentina para valores de tensión y deformación muy inferiores a los de rotura del CFRP. Las guías de diseño limitan estos valores para prevenir este tipo de fallo [1].

La situación actual en España marca una tendencia hacia la necesidad de rehabilitar y reforzar estructuras frente a la construcción de obra nueva. Con esta condición, se debe destacar que el refuerzo con CFRP tiene grandes ventajas sobre las técnicas tradicionales, aunque es necesario continuar investigando ante la falta de guías o normas de cálculo y ejecución.

La aplicación de técnicas de Ensayos No Destructivos (END) como la Emisión Acústica (EA) al refuerzo de estructuras de madera con materiales compuestos es totalmente novedosa. No se han encontrado referencias en la bibliografía al uso de la EA para determinar el fallo del refuerzo ni para monitorizar el daño en tiempo real. Este método tiene un uso extendido en el estudio

del comportamiento de los dos materiales por separado, pero no en el uso conjunto de ambos como refuerzo.

El método de EA, a diferencia de otros END, necesita que el elemento genere una emisión que pueda registrarse, la cual puede ser generada por procesos de fisuración, corrosión, deslaminación entre dos materiales, etc. Por tanto, la estructura, en nuestro caso, vigas de madera de 4,5 m de longitud, debe estar sometida a un factor externo que le haga reaccionar produciendo ondas que puedan ser registradas mediante sensores de EA. Este método consiste en la colocación de sensores en la superficie del elemento a monitorizar registrando las señales transitorias generadas por los fallos que aparecen en el material.

Según esto, **los objetivos de este Proyecto Fin de Grado son los siguientes:**

Ensayar ocho vigas de madera antigua de 4,5 m de longitud a flexión, siendo 2 de ellas sin refuerzo y las 6 restantes reforzadas en su cara inferior mediante laminados unidireccionales de CFRP adheridos a la madera con resinas de las casas comerciales *Sika S.A.U.* y *Drizoro S.A.U.*

Monitorizar con el método de Emisión Acústica los ensayos y determinar los mecanismos de daño del sistema MADERA-CFRP. Se trata de establecer criterios para la identificación y localización de fallos en estructuras reales de madera reforzadas mediante CFRP.

## 1.2. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente Proyecto Fin de Grado se ha llevado a cabo en el marco de una línea de investigación en curso orientada a estudiar el comportamiento de estructuras de madera reforzadas con el material compuesto CFRP, siendo uno de los objetivos estudiar el mecanismo de deslaminación entre estos materiales que provoca el colapso final de la estructura con el método de Emisión Acústica (EA), sobre el que se ha centrado este Proyecto Fin de Grado.

La línea de investigación se desarrolla en el proyecto conocido con el acrónimo REVMAC: *Rehabilitación de Vigas de Madera mediante refuerzos de material Compuesto laminado de fibra de carbono (CFRP). Comportamiento mecánico y evaluación de fallos con emisión acústica.* El proyecto es fruto de la colaboración entre el grupo de investigación ADIME (TEP232) dentro de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada y la empresa *Dávila Restauración de Monumentos S.L.* También colaboran las empresas *Sika S.A.U.* y *Drizoro S.A.U.* El director del proyecto es el profesor Antolino Gallego Molina.

## 2. MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA

### 2.1. CONCEPTO

Se denomina ensayo no destructivo END a cualquier método que no altere las propiedades físicas, mecánicas, químicas o dimensionales del material que examine. Estos tipos de ensayos implican menor coste que el resto ya que no conllevan la destrucción del material a estudiar.

Todos los ensayos no destructivos están basados en principios físicos, es decir, en la determinación de alguna propiedad física del material o de su variación local. Esto permite la caracterización del estado y/o naturaleza de los materiales y poner de manifiesto sus discontinuidades. Entre los métodos de END se encuentra la emisión acústica (EA).

El concepto de emisión acústica (EA), *acoustic emission* (AE) en inglés, se utiliza para describir tres situaciones: un proceso físico, un tipo de señal y un método de END [2].

La EA consiste en la liberación espontánea de energía de un material cuando se le somete a un estímulo (deformación, corrosión, fractura, etc.) Esta energía se traduce en ondas elásticas transitorias dentro del material. La definición de emisión acústica engloba tanto proceso de generación de la onda como a la propia onda. Cuando esta onda se produce, se propaga dentro del material alcanzando, normalmente, la superficie del mismo produciendo pequeños desplazamientos temporales en su superficie. Unos sensores colocados en la superficie registran estas ondas y mediante un proceso de adquisición, filtrado y acondicionamiento pueden ser mostradas en la pantalla de un ordenador. Se describen en la Figura 2.1 los pasos en el registro y procesado de las señales de EA [3].

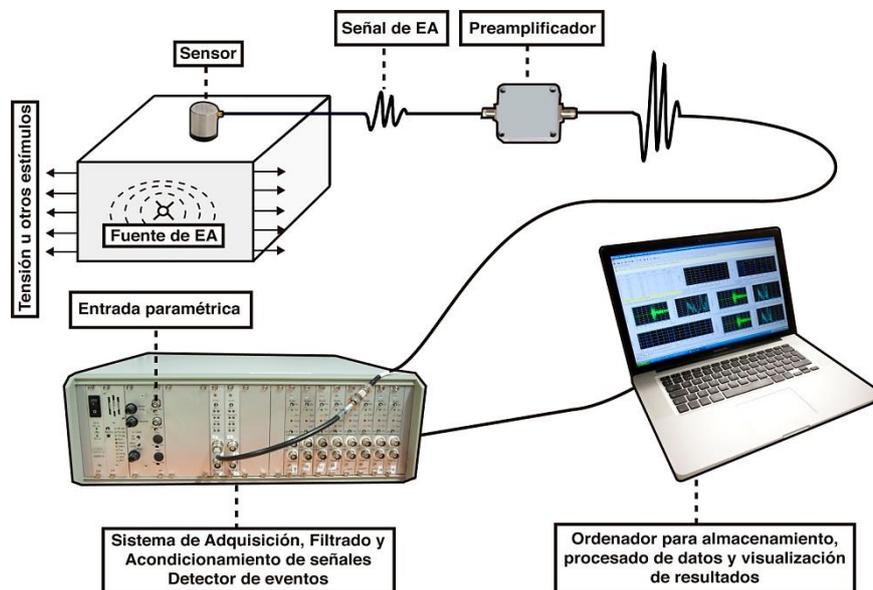


Figura 2.1. Fuente de EA generando una onda de EA por un estímulo del material. Cadena del proceso de EA: sensor, señal de EA, preamplificador, sistema de adquisición y ordenador.

Hay que señalar que la emisión acústica puede ser audible por el ser humano pero en muchas ocasiones esto no es posible por tener las ondas poca intensidad y/o porque su frecuencia está fuera del rango audible de frecuencias. Esto es lo que ocurre en la mayoría de ensayos con EA,

por lo que se hace necesario un sistema de EA como el que muestra la Figura 2.1 para registrar, procesar y mostrar estas ondas elásticas de una forma adecuada para su análisis.

El fenómeno de la EA es la base del método de END denominado Método de Emisión Acústica, en inglés *Acoustic Emission Testing* (AT), que presenta diferencias con la mayoría de métodos END como ultrasonidos o radiografía. Una de ellas es la monitorización en tiempo real de las estructuras puestas en cargar sin necesidad de aplicación de ninguna onda externa, ya que el método de EA recibe directamente las ondas producidas por el propio material. Otra diferencia es que el método de EA detecta movimientos en tiempo real, es decir, cuando el daño se está produciendo, y no discontinuidades geométricas sin movimiento o avance, previamente existentes en el material.

La EA tiene numerosas aplicaciones en campos como:

- Construcción: Monitorización de estructuras de todo tipo, siendo el hormigón y el acero los materiales más estudiados.
- Aeronáutica: Inspección de materiales compuestos o plásticos reforzados muy utilizados en este campo.
- Ingeniería civil: Monitorización de presas y puentes de hormigón armado y acero.
- Industria de materiales: Revisión en la fabricación de materiales para detectar daños antes de acabar o sacar el producto al mercado.
- Investigación geológica.
- Industria eléctrica: Detección y localización de descargas de alto voltaje en grandes transformadores.
- Industria energética: Inspección del estado de aerogeneradores y reactores nucleares.
- Biomedicina: Monitorización de huesos humanos.
- Arte: Diagnóstico de obras y patrimonio cultural.
- Instalaciones: Detección y localización de fugas en tuberías y tanques a presión.

Se muestran a modo de ejemplo en las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4 aplicaciones del método de EA en los diversos campos y materiales ya citados.



Figura 2.2. Aplicación del método de emisión acústica en la estructura de un puente.

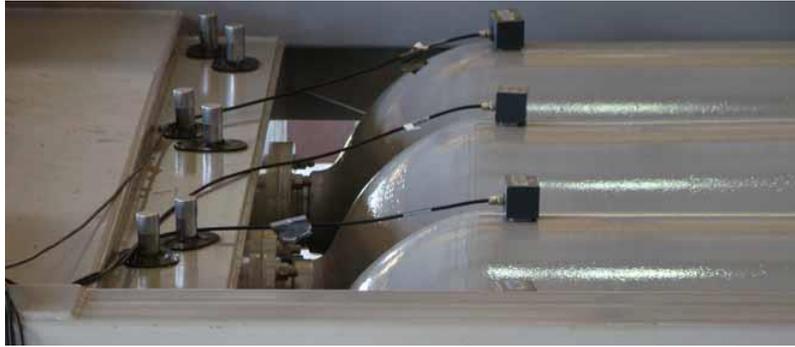


Figura 2.3. Aplicación del método de emisión acústica en vasijas de gas a presión.



Figura 2.4. Aplicación del método de emisión acústica en una tubería.

Como se puede observar las aplicaciones del método de EA son numerosas y variadas. Esto no es de extrañar, pues este método presenta diversas ventajas con respecto a otros métodos de END. Entre ellas se pueden citar las siguientes:

- Es dinámico, ya que proporciona el crecimiento de los fallos en la estructura en tiempo real.
- Puede detectar y evaluar la magnitud de discontinuidades a través de toda la estructura en único ensayo.
- Puede detectar fallos en zonas más inaccesibles que otros métodos, ya que solo se requiere un acceso limitado.
- Puede utilizarse para prevenir fallos catastróficos de sistemas con discontinuidades desconocidas.
- Permite una monitorización global del elemento sin necesidad de instalar el equipo en un lugar próximo al fallo.
- Responde mejor a la anisotropía del material, por lo que es menos sensible a la geometría de éste.

## 2.2. DEFINICIONES

La norma europea EN 1330 elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 138 *Ensayos no destructivos* (END) en el año 1998, recibió el rango de norma nacional por el Comité Técnico AEN/CTN 130 *Ensayos no destructivos* (AEND), siendo editada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). La norma consta de 11 partes, siendo su novena relativa a la terminología

del método de emisión acústica (EA). No se muestran en el párrafo siguiente todas las definiciones de la norma, solo las necesarias para entender el presente Proyecto Fin de Grado. En la norma, los términos se dividen en los cuatro bloques que se citan a continuación [5].

**Bloque 1: Términos relativos al fenómeno físico.**

- Evento de emisión acústica: Fenómeno físico que genera una emisión acústica.
- Fuente de emisión acústica: Elemento espacial a partir del cual se originan uno o más eventos de emisión acústica.
- Ondas de emisión acústica: Ondas elásticas transitorias generadas por la liberación de energía en un material o por un proceso.
- Energía de la onda de emisión acústica: Energía de la onda elástica liberada por un evento de emisión acústica.

**Bloque 2: Términos relativos a la detección de emisión acústica.**

- Sensor de emisión acústica: Dispositivo que transforma el movimiento de las partículas producido por la onda elástica en una señal eléctrica.
- Acoplante de emisión acústica: Material utilizado en la interfase objeto-sensor para mejorar la transmisión de las ondas de emisión acústica a través de la interfase.
- Emisión discreta: Emisión acústica de eventos que pueden separarse unos de otros en el tiempo.
- Emisión continua: Emisión acústica de eventos que no pueden separarse unos de otros en el tiempo.
- Señal de emisión acústica: Señal eléctrica procedente de un sensor producida por la onda de emisión acústica. Esta onda puede presentar otras interferencias como por ejemplo las EMI (interferencias electromagnéticas).
- Señal discreta: Señal de emisión acústica con un principio y un final identificables.
- Señal continua: Señal de emisión acústica con un principio y un final no identificables.
- Ruido de emisión acústica: Señales que no son relevantes para los objetivos del ensayo. Pueden ser de origen electromagnético, térmico o mecánico.
- Ruido de fondo: Ruido de emisión acústica que puede excluirse aumentando el umbral de detección o el filtrado de la frecuencia.
- Canal de emisión acústica: Conjunto formado por un único sensor de emisión acústica y los instrumentos asociados a este para detectar y procesar señales.

**Bloque 3. Términos relativos a la(s) señal(es) de emisión acústica medida(s).**

- Umbral de detección de emisión acústica: Nivel de tensión que ha de sobrepasarse antes de que se detecte una señal discreta.
- Hit: detección de una señal discreta en un canal de emisión acústica.
- Umbral de evaluación de la emisión acústica: Valor del umbral utilizado para el análisis de los datos del ensayo.
- Parámetros de la señal discreta: Características específicas de una señal discreta (por ejemplo: amplitud máxima, duración, tiempo de subida, energía).
- Parámetros de la señal continua: Características específicas de una señal continua (por ejemplo: ASL, RMS).
- Tiempo de llegada: Momento en el que una señal discreta cruza por primera vez el umbral de detección.
- Delta t ( $\Delta t$ ): Diferencia entre dos tiempos de llegada. Generalmente delta T se determina a partir de *hits* de diferentes canales resultantes del mismo evento.

- Duración de la señal discreta: Intervalo de tiempo entre la primera y la última vez que la señal discreta cruza el umbral de detección.
- Amplitud máxima de la señal discreta: Amplitud máxima de la tensión durante la duración de la señal discreta. Generalmente se expresa en  $dB_{AE}$ .
- Tiempo de subida de la señal discreta: Intervalo de tiempo entre el primer cruce del umbral y la amplitud máxima de la señal discreta.
- Energía de la señal discreta: Integral del cuadrado de la tensión de señal de la emisión acústica durante la duración de la señal discreta.
- Potencia de la señal discreta: Integral de la tensión rectificadora de la señal de emisión acústica durante la duración de la señal discreta.
- Escala en decibelios de emisión acústica; escala en  $dB_{AE}$ : Escala en dB de la tensión de la señal de emisión acústica de referencia  $U$ , con relación a la entrada del preamplificador. Definido por:  

$$dB_{AE} = 20 \log (U, U_r)$$
- Datos de emisión acústica: Conjunto de los parámetros medidos de la señal acústica y de los parámetros exteriores asociados.
- Curva de atenuación: Descenso de la amplitud de la señal con la distancia.

#### **Bloque 4: Términos relativos a las aplicaciones de la emisión acústica.**

- Ensayo de emisión acústica (AT): Inspección o examen de un objeto durante un estímulo controlado mediante equipos de emisión acústica, para detectar y analizar las fuentes de emisión acústica.
- Vigilancia mediante emisión acústica: Supervisión de un proceso, o supervisión continua de un objeto en servicio mediante emisión acústica.
- Análisis de la emisión acústica: Interpretación y evaluación de los datos de emisión acústica para describir y caracterizar las fuentes de emisión acústica.
- Actividad de emisión acústica: Numero de *hits* como una función del tiempo o parámetros externos. La actividad puede hacer referencia a uno o más canales. Un evento de emisión acústica único puede producir más de un *hit*.
- Intensidad de la emisión acústica: Término genérico relativo a uno de los parámetros de intensidad como una función del tiempo o de parámetros externos. Los parámetros de intensidad de la señal discreta son la amplitud máxima, la potencia de la señal, y dentro de un cierto nivel, el número de pulsos. Los parámetros de intensidad de las emisiones continuas son la tensión de la señal, la raíz cuadrada del cuadrado medio (RMS), y el nivel medio de la señal (ASL).
- Determinación de la localización de un evento: Posición espacial determinada con ayuda de un conjunto de sensores y de medidas de  $\Delta t$ .
- Agrupación de localización de emisión acústica: Concentración espacial de fuentes de emisión acústica en un elemento de dimensión y forma definidas. La concentración espacial puede derivarse de los  $\Delta t$ .
- Localización de la fuente: Designación de uno o más lugares de emisión acústica en relación con un elemento espacial, en el objeto sometido a ensayo. Debería establecerse una tolerancia para la incertidumbre de los resultados computarizados.
- Localización plana: Determinación de la posición espacial de un evento de emisión acústica sobre la superficie del objeto sometido a ensayo a partir de las mediciones de  $\Delta t$ , suponiendo que la onda se propaga en el interior de la chapa.
- Localización lineal: Caso especial de localización plana en la que la localización del evento de emisión acústica se realiza en una única dimensión.

- Error de localización de la fuente: Desviación de la posición de la fuente de emisión acústica real en relación con el resultado calculado de su localización.
- Efecto Felicity: Aparición de una emisión acústica significativa con un nivel de carga inferior al nivel máximo aplicado previamente, por ejemplo el que se observa en los materiales compuestos.
- Relación Felicity: La relación entre la carga a la que reaparece la emisión acústica durante la siguiente aplicación de la carga y la carga máxima precedente.
- Fuente Hsu-Nielsen (rotura de una mina): Dispositivo para simular un suceso de emisión acústica utilizando la rotura de una mina de grafito sostenida por un soporte adecuado. La mina de grafito debería tener un diámetro de 0,5 mm y una dureza 2H. Si se utilizan unas minas de diámetro y durezas diferentes, debería indicarse. Las variaciones de la mina pueden producir variaciones en las señales.
- Efecto káiser: Ausencia de emisión acústica detectable hasta el momento en el que se excede el nivel de carga máxima previamente aplicada.
- Mosaico de sensores: Combinación de sensores de emisión acústica posicionados para la localización de fuentes.
- Sensor guarda: Sensor de emisión acústica utilizado para discriminar las fuentes que provienen del exterior de la zona de interés.
- Sensibilidad del sensor de emisión acústica: Relación entre el desplazamiento de la onda acústica en el punto de medición y la señal eléctrica emitida por el sensor. Esta relación será una función de la frecuencia y del tipo de onda (por ejemplo, ondas guiadas o volumétricas). Generalmente expresada en voltios por metro por segundo o voltios por microbar.

### 2.3. PARÁMETROS DE EA DE SEÑALES TRANSITORIAS

Como se ha comentado en el Apartado 2.2 las señales de emisión acústica pueden clasificarse en dos tipos: Señales continuas y señales transitorias o discretas. La señal continua no tiene un principio y un fin identificables, a diferencia de la señal transitoria o discreta que si los tienen. Las señales transitorias tienen por tanto, una duración bien definida y pueden tener su origen en la apertura de una grieta en la madera o en la rotura de material compuesto. Por el contrario, las señales continuas, aunque presentan variaciones en su amplitud y frecuencia a lo largo del tiempo, no tienen un principio y final definidos y se mantienen mientras el proceso que las ha generado esté activo. Las señales continuas se pueden generar en fugas de tuberías y tanques, por ejemplo. En la Figura 2.5 se muestran dos gráficas de una señal continua y una señal transitoria.

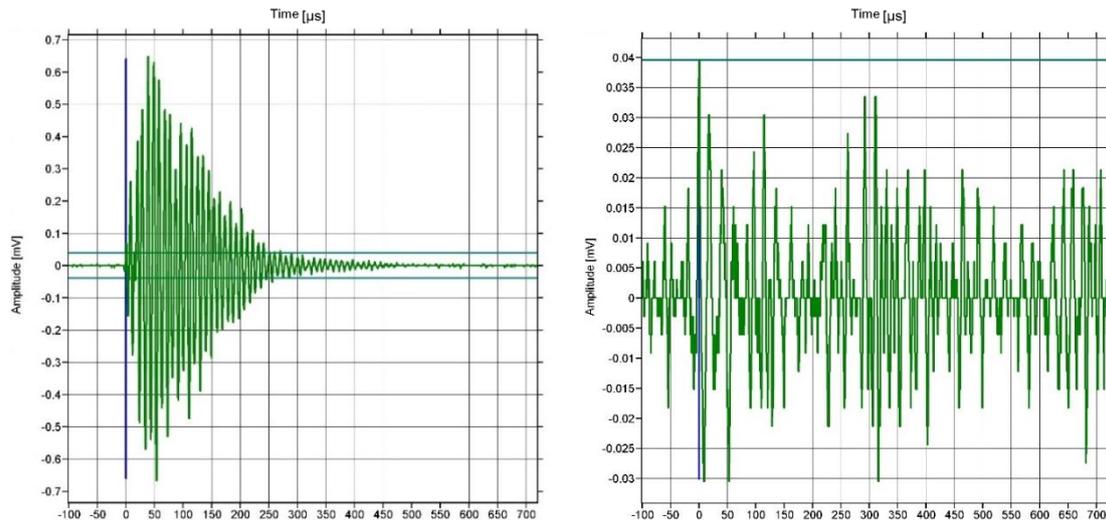


Figura 2.5. Izquierda: Señal de EA transitoria generada por la rotura de una mina en una superficie de madera. Derecha: Señal de EA continua generada por el ruido de fondo en un laboratorio.

En los ensayos que se realizan en este Proyecto Fin de Grado se obtienen únicamente señales transitorias. Considerándose las señales continuas como ruido de fondo y siendo éstas eliminadas. Se definen por tanto, los parámetros o características de las señales transitorias necesarios para los posteriores análisis a realizar (Figura 2.6).

- **Amplitud:** La amplitud de una señal es el voltaje más alto (amplitud pico). Para manejar el amplio rango de amplitudes, se utiliza una escala de decibelios que, en el método de EA, se denominan  $dB_{AE}$ . La amplitud en esta escala se calcula de la siguiente forma:

$$A (dB_{AE}) = 20 \log V_p \quad (2.1)$$

siendo  $V_p$  el voltaje pico de la señal en  $\mu V$  a las salida del preamplificador.

- **Duración:** Intervalo de tiempo entre la primera y la última vez que la señal transitoria cruza el umbral de detección establecido por el usuario. Resulta, junto con la amplitud, un parámetro de clasificación de mecanismos muy importante y un excelente identificador de señales no deseadas (larga duración). De hecho, es habitual verlo representado en gráficas frente a la amplitud. La duración se establece por defecto en  $\mu s$ .
- **Energía:** Existen varias formas de definir la energía de una señal transitoria de EA (también llamada *strength* o *energy* en inglés), de las cuales la empleada en este Proyecto Fin de Grado es la energía MARSE (*Measured Area under Rectified Signal Envelope*). La energía MARSE es la definida como la integral de la tensión rectificadora de la señal de emisión acústica durante la duración de la señal discreta. También se denomina potencia de la señal, y sus unidades son  $V \cdot s$ , es decir:

$$MARSE = \int V^t(t)dt, \quad (2.2)$$

siendo  $V^t$  la envolvente de la señal rectificadora de EA. El cálculo de la integral se extiende sobre toda su duración. Lógicamente su valor está afectado por la amplitud y la duración de la señal, aunque no depende del umbral.

- **Tiempo de subida (*Rise-time*):** Intervalo de tiempo entre el primer cruce del umbral y la amplitud máxima de la señal transitoria. Es, al igual que la duración, útil para la

clasificación de las señales de EA y para el filtrado del ruido, tanto acústico como eléctrico.

- **Cuentas o pulsos:** Es el número de veces que la señal cruza el umbral de detección. Al ser un parámetro dependiente del umbral ha sido sustituido de manera importante por la energía de la señal.

Se representan en la Figura 2.6 los parámetros definidos anteriormente para su mejor comprensión.

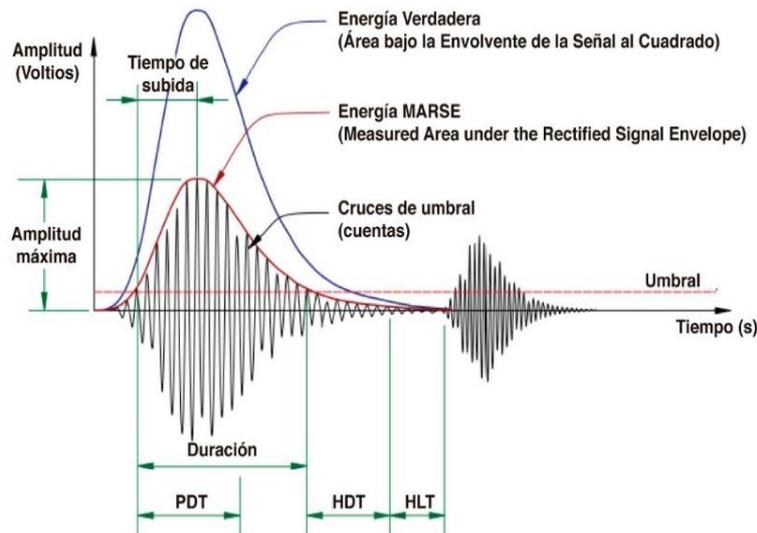


Figura 2.6. Parámetros de EA tradicionalmente usados.

## 2.4. ATENUACIÓN

Cuando una onda generada en una fuente se propaga hacia otras zonas del medio, su energía por unidad de área, y por tanto su amplitud, decrecen debido a una serie de factores, entre los cuales podemos citar los siguientes:

- Atenuación geométrica.
- Absorción.
- Dispersión (*scattering*).
- Difracción.

En definitiva, la atenuación de una onda es la disminución de su amplitud cuando viaja a través de un medio. Se trata, no obstante, de un factor clave en el método de EA, pues gobierna la detectabilidad de fuentes de EA con respecto a la distancia fuente-sensor. De hecho, a partir de una distancia fuente-sensor, la amplitud de la onda puede disminuir tanto que la onda quede por debajo del ruido de fondo existente y sea indetectable.

### ATENUACIÓN GEOMÉTRICA

Incluso en medios sin pérdidas, se produce atenuación de la onda generada por la fuente, debido a lo que se conoce como atenuación geométrica. A medida que el frente de ondas avanza, su superficie es mayor y, por tanto, para que se mantenga constante la energía, la amplitud de la

onda debe ir aumentando a medida que la distancia a la fuente aumenta. La atenuación geométrica tiene las siguientes características generales:

- Es independiente de la frecuencia de la onda y del material de propagación.
- Solo depende de la geometría, y sobre todo, del tipo de onda (Tabla 2.1).

TIPOS DE ONDAS	ATENUACIÓN GEOMÉTRICA
Cilíndricas y esféricas	$\approx \frac{1}{r}$
Ondas de volumen P y S	$\approx \frac{1}{r}$
Ondas de superficie y ondas de Lamb	$\approx \frac{1}{\sqrt{r}}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ondas planas en medios infinitos o semiinfinitos</li> <li>- Ondas generadas por una fuente lineal en el plano de una placa</li> <li>- Ondas 1-D en cuerdas barras o vigas</li> </ul>	No hay atenuación

Tabla 2.1. Dependencia aproximada de la amplitud de la onda con la distancia fuente-sensor para diferentes tipos de ondas, en campo lejano (distancias alejadas de la fuente).

### ABSORCIÓN

Durante la propagación de las ondas en medios reales, la energía mecánica asociada con el movimiento no se conserva. Esta pérdida de energía puede estar asociada a diversos factores, como fricción interna entre superficies, comportamientos viscoelásticos del material, inclusiones no completamente adheridas, interacciones magnetoelásticas, interacción con electrones de conducción en metales, etc.

Todo este tipo de fenómenos físicos produce una pérdida de energía mecánica y, por tanto, un decrecimiento de la amplitud de la onda cuando esta viaja a través de un medio. Si el medio y los mecanismos de pérdidas son homogéneos, la pérdida se producirá uniformemente en todo el material. En particular, en el caso de una onda armónica plana, el desplazamiento de la partícula puede expresarse de la siguiente manera:

$$u = A_0 e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t), \tag{2.1}$$

donde  $A_0$  es la amplitud de la onda en el punto inicial ( $x=0$ ) y  $\alpha$  es un coeficiente de pérdidas de absorción, cuyas unidades son  $1/m$  en el Sistema Internacional. No obstante, es común expresarlo en términos de decibelios por unidad de longitud, esto es

$$\alpha_{dB} = 20 \log e^\alpha = 8,7 \alpha, \tag{2.2}$$

cuyas unidades son dB/m. El coeficiente de absorción y, por tanto la disminución de amplitud por absorción, depende fuertemente de la frecuencia de la onda y del material. En general, se puede decir que a mayor frecuencia habrá mayores pérdidas por absorción.

Como puede verse en la Ecuación 2.21, la absorción produce señales de EA cuya amplitud decae exponencialmente con la distancia. Esto significa que a distancias de la fuente suficientemente grandes, la atenuación geométrica tendrá más influencia que la absorción.

La absorción depende totalmente del material y de la frecuencia. A mayor frecuencia, mayor absorción. Es baja en acero, aluminio y agua. Sin embargo es muy elevada en materiales no metálicos, como madera, plásticos, materiales compuestos, rocas, hormigón, pinturas y recubrimientos metálicos, etc.

#### DISPERSIÓN (SCATTERING)

Cuando la onda elástica se propaga por un material con muchos contornos complejos y discontinuidades, al llegar a ellos se refleja, aunque sea al menos parcialmente. Esto genera ondas secundarias que se propagan a gran diversidad de direcciones, reduciendo el flujo de energía de la onda original y, por tanto, produciendo una atenuación de la onda. A este fenómeno se le denomina dispersión y puede estar producido por multitud de causas como inclusiones en el material, orientación de las estructuras cristalinas, anisotropía del material, contornos de grano, superficies de corrosión de metales, interfaces entre capas de compuestos laminados, etc. Dicha dispersión es uno de los factores a tener en cuenta en la madera, debido a la presencia de nudos, fendas, gemas, etc.

No obstante, la evaluación de la atenuación debida a la dispersión es bastante difícil o imposible de hacer analíticamente salvo en geometrías muy simples, recurriéndose a aproximaciones empíricas.

El caso más común de mecanismo de dispersión es el producido en los contornos de granos de un material (Figura 2.7). Este mecanismo no será importante para las ondas con longitud de onda mucho mayor al tamaño medio del grano. Sin embargo, a medida que la longitud de onda sea más comparable al tamaño de grano o menor, aparecerá dispersión y por tanto atenuación de la onda.

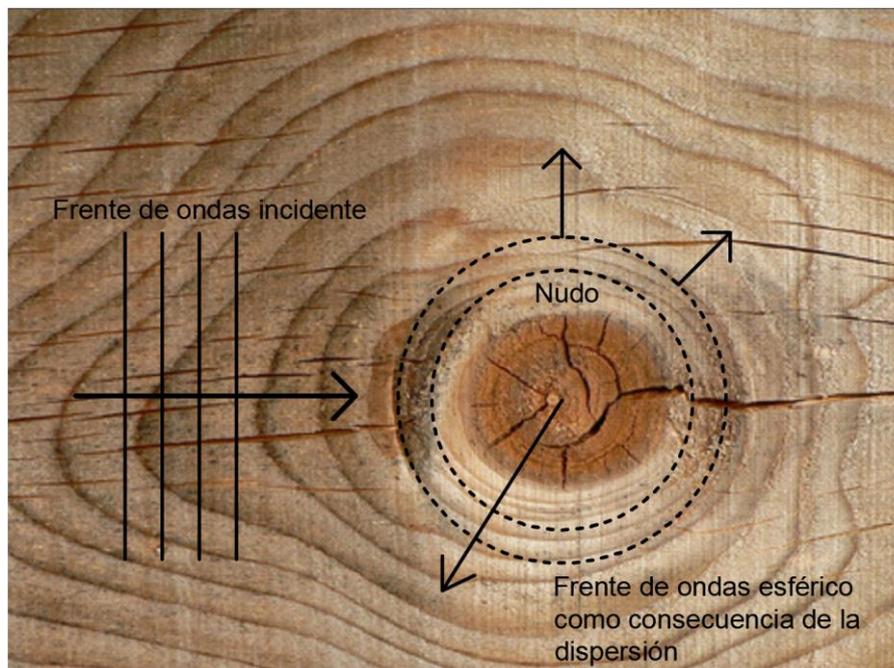


Figura 2.7. Dispersión de una onda plana en un nudo de madera (se generan frentes de ondas secundarios).

## DIFRACCIÓN

De manera similar al mecanismo anterior, cuando una onda elástica se encuentra con un fuerte borde como una fractura o ranura en un sólido, un agujero, una cavidad, etc., se refleja fuertemente. Parte de la energía de la onda pasa el borde, se curvará hacia la zona de la región de la sombra de la discontinuidad (fractura, ranura, etc.). Este fenómeno se le denomina difracción, y en general sus efectos son muy difíciles de evaluar. Al igual que la dispersión, normalmente conduce a un decrecimiento de la amplitud de la onda, aunque en algunos casos puede provocar un aumento de la misma, convirtiéndose así en otro posible mecanismo físico de atenuación. El fenómeno ha sido ampliamente estudiado, y depende fuertemente de la longitud de onda de la onda incidente en el borde. Será tanto mayor cuanto más comparables sean la longitud de onda y las dimensiones del borde que la produce. Como en el caso anterior, este mecanismo influye fuertemente en la madera por la gran cantidad de fendas que contienen las vigas.

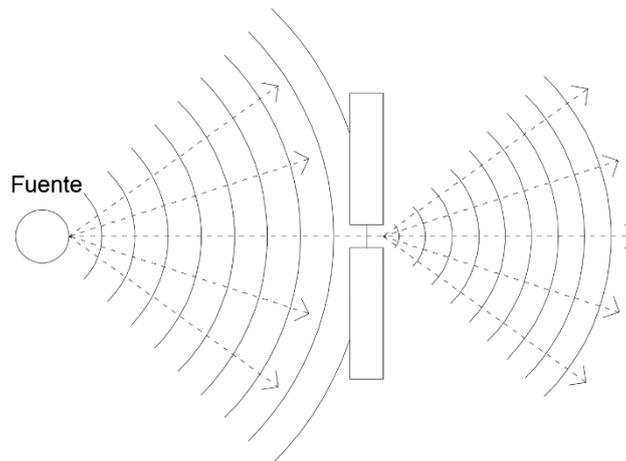


Figura 2.8. Difracción de la onda en una rendija.

## ATENUACIÓN EN MADERA

Se sabe que la madera es un material anisótropo, es decir, que presenta diferente comportamiento en función de la dirección en la que se propaga la onda. Además, se puede considerar un material ortótropo, cuyas propiedades dependen de tres dimensiones: axial, radial y tangencial [5].

Se citan y definen a continuación las características de la madera más influyentes en la atenuación:

- **Nudos:** Son anomalías locales de la madera, producidas por la base de una rama del tronco, que van quedando englobadas en la madera (Figura 2.9).

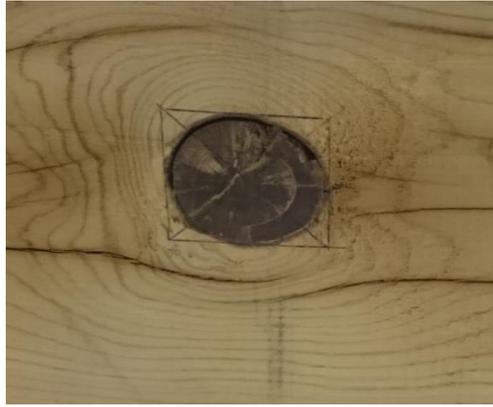


Figura 2.9. Fotografía de nudo en madera.

- **Fendas:** Son cualquier raja longitudinal que se extiende a través del anillo de crecimiento de la madera (Figura 2.10).



Figura 2.10. Fotografía de fendas en una viga de madera.

- **Orientación de la fibra:** Las fibras de la madera se disponen de distinta forma en función de la dirección del corte. Se ha constatado que la orientación de la fibra en la madera respecto a la dirección de propagación de la onda es determinante. La atenuación de la onda será menor si viaja paralela a las fibras que si lo hace transversalmente. En la Figura 2.11 se muestra una parte de una viga en la que se pueden apreciar cambios en la orientación de la fibra.



Figura 2.11. Fotografía de una viga de madera con cambios en la orientación de la fibra.

- **Humedad:** Debido a su gran porosidad la madera absorbe agua del ambiente que lo rodea, según éste sea húmedo o seco y consecuentemente en relación con la época del año. La madera no obstante posee una cierta cantidad de agua estimada en un 20% - 30% de su

peso. En la Figura 2.12 se muestra una viga de madera con parte afectada por pudrición debido a la humedad.



Figura 2.12. Fotografía de una viga de madera afectada por pudrición.

## ATENUACIÓN EN CFRP

El CFRP se fabrica impregnando una resina (epoxi normalmente) con fibras de carbono que actúan como material de refuerzo. Esta composición de materiales se traduce en distintas interfaces que la onda tiene que atravesar y que disminuyen su amplitud. Este hecho conlleva que las reflexiones y efectos de dispersión y absorción sean muy relevantes en este material. Además, al igual que en la madera la dirección de la fibra de carbono influye mucho en la atenuación del CFRP.

No se pretende en este Proyecto Fin de Grado realizar un análisis exhaustivo de la atenuación en la madera y el CFRP sino tener un conocimiento de cómo y cuánto decrece la amplitud en los especímenes ensayados en los experimentos programados.

Este conocimiento determina la distancia máxima entre los sensores de Emisión Acústica y establece un criterio de posicionamiento de éstos para evitar una atenuación mayor. Además, estos datos son importantes a la hora de realizar un correcto análisis final en los ensayos a flexión y, por tanto, se tendrán en cuenta.

## 2.5. LOCALIZACIÓN LINEAL

### 2.5.1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto de enorme interés y utilidad en la presente investigación es determinar las coordenadas de las fuentes de EA de la forma más precisa posible a partir de los datos recogidos por los sensores colocados en la superficie de las vigas de madera.

En un proceso de localización de fuentes de EA (Figura 2.13) pueden distinguirse los siguientes pasos, antes de proporcionar el resultado final (la ubicación de la fuente):

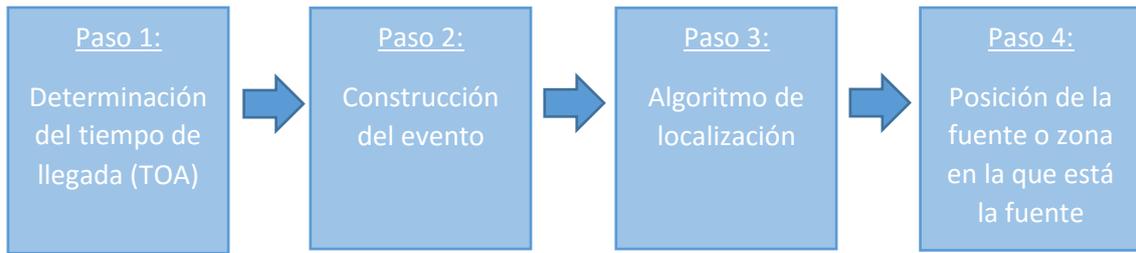


Figura 2.13. Pasos en un proceso de localización.

**Paso 1: Determinación del tiempo de llegada de las ondas de EA a los sensores.** Este es un aspecto fundamental en todo proceso de localización, siendo además el origen de muchos errores. La técnica más sencilla y más comúnmente usada en equipos comerciales para ensayos de EA es la de establecer el tiempo de llegada como el primer cruce del umbral (FTC), es decir  $TOA = FTC$ . Sin embargo, la elección del umbral resulta determinante en este caso. Tal y como se puede observar en la Figura 2.14 si el umbral es muy alto, el tiempo de llegada está sobrestimado, y si es muy bajo, podría estar determinado de manera errónea por el ruido de fondo. Como se puede apreciar un umbral de 30 dB sería el adecuado en la señal de EA de la Figura 2.14. Aparte de esta técnica existen otras más avanzadas, como el método de Akaike o la Transformada de Wavelet.

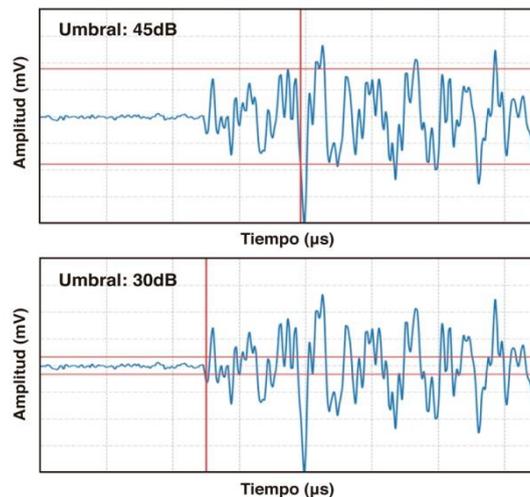


Figura 2.14. Determinación del tiempo de llegada con el criterio  $TOA = FTC$  usando distintos umbrales.

**Paso 2: Construcción del evento.** La actividad de EA es registrada por el equipo en secuencias de *hits* individuales. Estas secuencias, sin embargo, no tienen información obvia de las fuentes de las que proceden, y por tanto deben ser agrupadas adecuadamente en eventos, asumiendo que cada evento es un conjunto de *hits* que proceden de la misma fuente de EA. Esta construcción de los eventos o agrupamiento de los *hits* en eventos es clave para el posterior proceso de localización. Este agrupamiento se debe realizar en términos de una serie de criterios que deben estar especificados por el usuario. Un evento está formado por un primer *hit* (*first hit*) y, en los casos de eventos con más de un *hit*, por *hits* subsiguientes según los criterios anteriormente citados.

El constructor de eventos es independiente de la localización, en el sentido de que se pueden agrupar los *hits* en eventos, y no hacer una localización puntual posterior. De hecho si se aplica

solo el constructor de eventos, se estaría realizando estrictamente una localización zonal. En resumen:

- Constructor de eventos + Localizador = Localización puntual.
- Constructor de evento = Localización zonal.

Es obvio que la localización puntual está basada en el constructor de eventos, por lo que los fallos en dicha construcción, implicarán fallos en la localización.

Los parámetros para la construcción de eventos pueden variar según el sistema usado. Se indica aquí el usado en este Proyecto Fin de Grado:

- Tiempo de discriminación del canal de primera llegada (FHCDT): Se detecta el primer *hit* del evento cuando el periodo de tiempo hasta el *hit* previo (del mismo canal o de otro canal) es mayor que FHCDT. Para pequeñas estructuras (distancia al sensor mucho menor que la distancia de detección) se recomienda que FHCDT sea 2 o 3 veces igual a la distancia al sensor dividido por la velocidad de la onda. Para grandes estructuras (distancia del sensor próxima a la máxima distancia de detección, se recomienda que FHCDT sea 1,5 veces el cociente de la distancia de detección máxima dividido por la velocidad de la onda.

Existen, sin embargo, varias definiciones de la distancia máxima de detección. La máxima distancia de detección es la distancia a la cual la amplitud de la fuente es capaz de cruzar el umbral.

La máxima distancia del sensor depende de la mínima amplitud de la fuente que va a detectarse, de la atenuación del material y de la sensibilidad del sensor usado. En presencia del ruido de fondo, el umbral debe elegirse al menos 6 dB por encima de la amplitud de pico de dicho ruido.

- Diferencia de tiempo máxima entre el *hit* de primera llegada y el último *hit* de un evento (DT1X-Max): Máxima diferencia entre el primer y último *hit* permitida dentro de un evento. Los *hits* que lleguen con una diferencia de tiempo menor que DT1X-Max tras el primer *hit*, son asignados al mismo evento. El evento se cierra si la diferencia de tiempo entre un nuevo *hit* y el primer *hit* es mayor que DT1X-Max.
- Diferencia de tiempo entre dos *hits* consecutivos de un evento (DTNX-Max): Es la máxima diferencia de tiempo entre un *hit* e *hits* previos dentro de un evento. Por tanto, si DTNX-Max se cumple sin detectar ningún *hit* nuevo, el evento se cierra. El siguiente *hit* no será asignado a este evento, incluso si DT1X-Max no se ha cumplido aún.

Por tanto, un evento se cierra si:

- DT1X-Max se sobrepasa sin detectar un *hit* o;
- DTNX-Max se sobrepasa sin detectar un *hit*.

En general se recomienda elegir los valores de estas variables iguales, aunque valores diferente pueden ayudar a un usuario avanzado a optimizar el proceso de construcción del evento y reducir la generación de eventos falsos o dejar eventos incompletos.

**Paso 3: Algoritmo de localización.** Una vez se conocen los tiempos de llegada para los diferentes *hits* de cada evento, se debe aplicar un determinado algoritmo de localización para determinar las coordenadas de la fuente.

## 2.5.2. LOCALIZACIÓN

Para resolver un problema de localización de fuentes de EA, en general, es necesario conocer la siguiente información:

- Los tiempos de llegada de las ondas a cada sensor (TOA).
- Las coordenadas de los sensores usados.
- La velocidad de propagación de las ondas.

Una localización precisa de las fuentes de EA depende de muchos factores. Para conseguirla, se tiene que poder seleccionar el algoritmo más adecuado para las condiciones dadas. Un método de localización se refiere al procedimiento matemático que resuelve el problema a partir de observaciones físicas del evento de EA. Existen básicamente cinco tipos de aproximaciones matemáticas [2]:

- Aproximación triaxial: Usa dos tipos de datos físicos; la amplitud y el tiempo de llegada de la señal.
- Localización zonal y puntual: Localización puntual se refiere a algoritmos que tratan de obtener unas coordenadas espaciales para la fuente de EA. Por el contrario, la localización zonal se refiere a los algoritmos que determinan si la fuente de EA proviene de una zona predeterminada. Ambas localizaciones requieren de los tiempos de llegada (TOA) al grupo de sensores usados.
- Métodos no iterativos: La localización de fuentes proporciona un conjunto de ecuaciones (lineal o no lineal). Este conjunto puede resolverse por métodos iterativos o no iterativos. Los no iterativos se refieren a los algoritmos que resuelven dichas ecuaciones sin el uso de ninguna aproximación numérica. Estos métodos son simples y fáciles de aplicar, aunque no siempre es posible aplicarlos.
- Métodos iterativos: Son más flexibles para adaptarse a problemas prácticos. Entre ellos cabe citar el método de Geiger y el método Simplex como los más destacados.
- Aproximación del tiempo de llegada (TOA): Este tipo de algoritmos usan exclusivamente la información del tiempo de llegada, que puede corresponder a cualquier tipo de onda (P, S, Rayleigh). La información se considera más estable que la proporcionada por la aproximación triaxial, pues la amplitud está muy influenciada por las propiedades del medio de propagación. Por esta razón, es la que habitualmente se usa en ensayos de EA y es la empleada en este Proyecto Fin de Grado.

La Figura 2.15 muestra esquemáticamente esta clasificación de métodos.

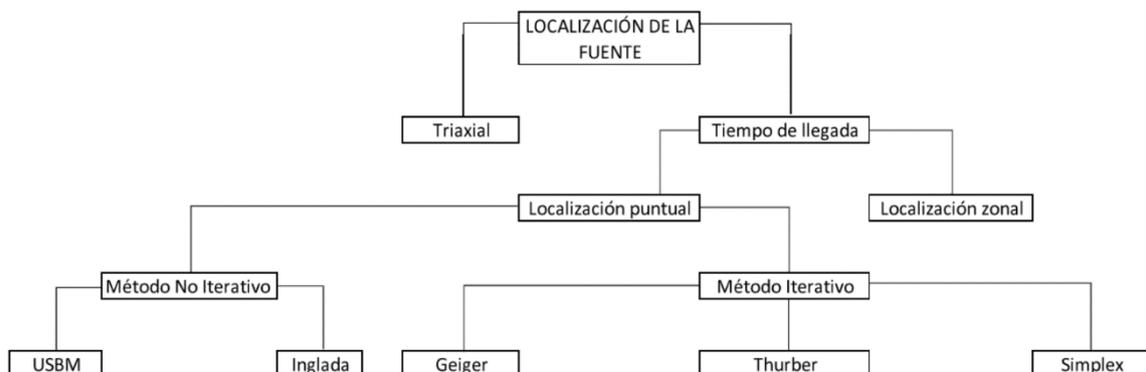


Figura 2.15. Clasificación de los métodos de localización.

Desde un punto de vista geométrico, los algoritmos de localización se suelen dividir en algoritmos en una (1D), dos (2D) o tres dimensiones (3D). Sea cual fuere la formulación usada, el número de incógnitas a calcular en una localización de dimensión  $D_n$ , es  $D_n + 1$ , es decir, para localización en 1 dimensión necesitaremos como mínimo 2 sensores, en 2 dimensiones 3 sensores, y así, sucesivamente.

En el caso de que se usen más sensores que los estrictamente necesarios (más de 2 en una localización lineal), el problema de localización es sobre-estimado. En este caso, el algoritmo debe incorporar un criterio para elegir la solución entre las infinitas soluciones posibles. Un posible algoritmo sería el comentado en el siguiente párrafo.

Habitualmente sólo los canales inmediatamente vecinos al FHC (canal de primera llegada), son usados en la localización. Por tanto, los eventos que tienen un número requerido de vecinos al FHC son considerados para la localización. En una localización lineal como la de la Figura 2.16, el primero y último canal (sensores S5 y S6) solo tienen un vecino, mientras que el resto (S1, S2, S3 y S4) tienen dos vecinos.

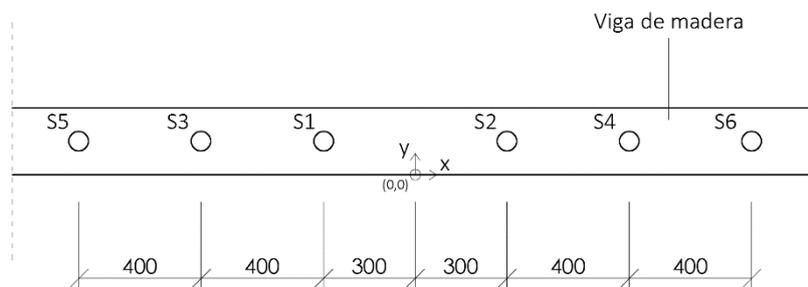


Figura 2.16. Esquema de sensores en una viga de madera. Cotas en mm.

El algoritmo opera de la siguiente forma:

- **Ambos vecinos al FHC son hits del evento (Figura 2.17):** En este caso el algoritmo calcula una primera localización ( $x_{F1}$ ) usando la diferencia de tiempo entre los dos vecinos del FHC ( $t_6$  y  $t_2$ ) y determina si la posición de la fuente está a la derecha o a la izquierda del FHC (S4). Es decir, mediante la fórmula

$$x_{F1} = \frac{1}{2} v (t_6 - t_2) + \frac{(x_6 + x_2)}{2}, \quad (2.3)$$

siendo  $v$  la velocidad de propagación de la onda y  $x_2$  y  $x_6$  la posición de los sensores 2 y 6.

Posteriormente, se realiza una segunda localización ( $x_{F2}$ ) usando la diferencia de tiempos entre el FHC (S4) y su sensor vecino en el sentido de la fuente (S2), previamente calculado. Es decir

$$x_{F2} = \frac{1}{2} v (t_2 - t_4) + \frac{(x_2 + x_4)}{2}, \quad (2.4)$$

El resultado final ( $x_{FT}$ ) es un promedio de las dos localizaciones:

$$x_{FT} = \frac{x_{F1} + x_{F2}}{2}. \quad (2.5)$$

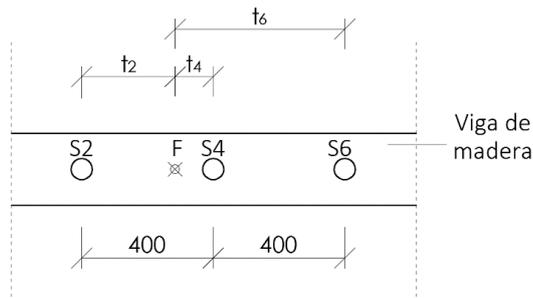


Figura 2.17. Esquema en localización lineal en caso de que ambos vecinos al FHC son *hits* del evento.

- **Sólo un vecino de FHC es *hit* del evento (Figura 2.18):** Se realiza una única localización ( $x_{FT}$ ) entre el FHC (S6) y dicho *hit* del sensor vecino (S4). Es decir

$$x_{FT} = \frac{1}{2} v (t_4 - t_6) + \frac{(x_4 + x_6)}{2}. \quad (2.6)$$

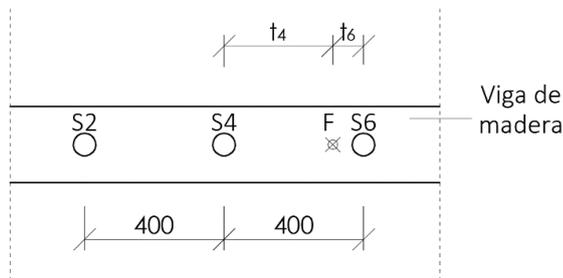


Figura 2.18. Esquema en localización lineal en caso de que sólo un vecino del FHC es *hit* del evento.

- **En canal del segundo *hit* del evento no es un vecino del FHC:** En este caso no se proporciona localización.

### 3. ENSAYO DE ATENUACIÓN

#### 3.1. ENSAYO: DESCRIPCIÓN

La configuración de la EA fue la que se describe a continuación. A partir de este momento siempre que se hable de un ensayo de EA estará realizado con esta configuración. Estos parámetros se introducen antes de la adquisición de los datos por el equipo de EA, es decir, previos al ensayo.

- Umbral: 40,0 dB.
- Frecuencia de muestreo de las señales: 5 MHz.
- Número de datos: 4096.
- Longitud de las señales: 819,2  $\mu$ s.
- *Duration Discrimination Time (DDT)*: 100  $\mu$ s.
- *Rearm time* (tiempo de rearme): 0,9984 ms.
- *Pretrigger* (número de muestras antes de cruzar el umbral): 500 muestras.
- Ganancia del preamplificador: 34 dB.
- Canales usados: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.
- Filtros en frecuencia: 40-500 kHz.

Los sensores utilizados fueron del tipo VS45-H (Figura 3.1). Los sensores VS45-H tienen buena respuesta en las frecuencias 80, 110, 150, 280, 390 y 460 kHz como muestra la Figura 3.2, es decir, son multi-resonantes.



Figura 3.1. Sensores tipo VS45-H.

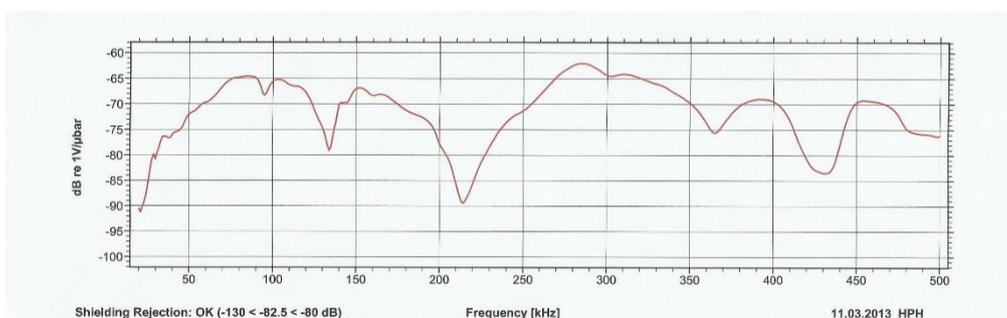


Figura 3.2. Respuesta en frecuencia de un sensor tipo VS45-H.

Para realizar el ensayo de atenuación, se colocó un único sensor de EA (S1) en el centro de la cara lateral de la viga y se generaron fuentes Hsu-Nielsen (HN) como muestra la Figura 3.3, en

las caras lateral e inferior de la viga. Al generar fuentes de EA cada vez más alejadas del sensor se puede apreciar y medir el decrecimiento de la amplitud de la onda con la distancia. Con el objetivo de obtener una mayor precisión se generaron tres fuentes de EA en cada punto. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada espécimen.

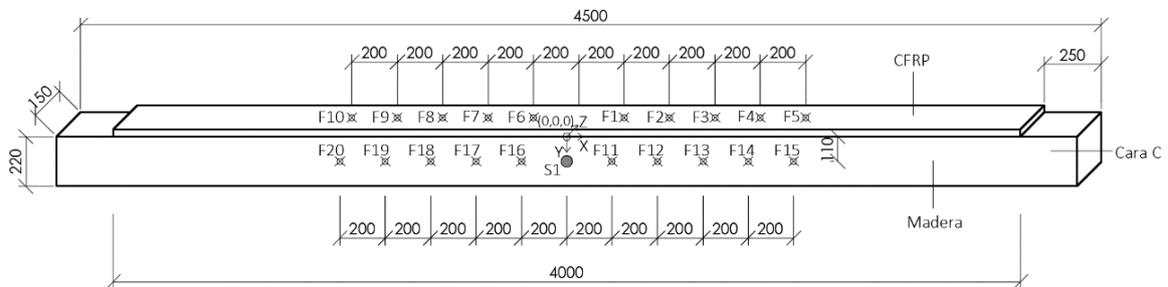


Figura 3.3. Esquema de posición de sensor EA en la viga y de roturas HN. Cotitas en mm.

Como se observa en la Figura 3.3, desde el punto F1 al F10 las roturas se realizan en la cara del refuerzo, por lo que salvo para los especímenes SR (sin refuerzo) en los cuales las roturas se realizaron en madera, el resto se llevaron a cabo sobre CFRP. Se muestra en la Figura 3.4 el proceso del experimento desde la creación de la fuente HN hasta su registro por el canal 1 del equipo de EA.

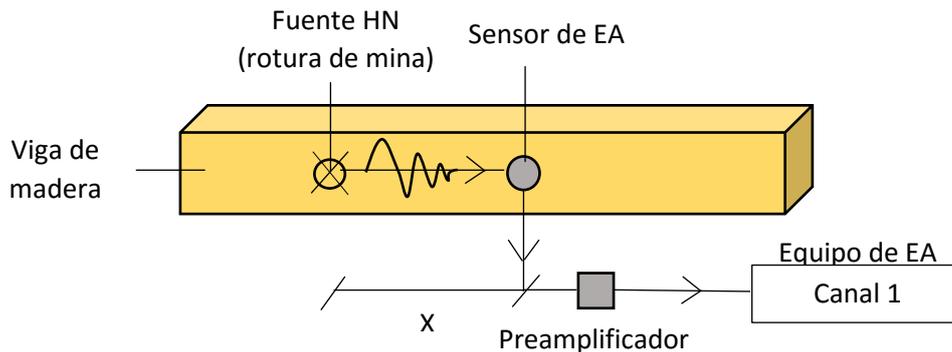


Figura 3.4. Esquema del ensayo de atenuación de EA.

Con el objetivo de establecer un orden en los ensayos se estableció una designación de las 4 caras de las vigas como muestra la Figura 3.5, siendo la cara lateral C, la cara donde se colocan los sensores y la cara inferior B donde se coloca el refuerzo de CFRP en caso de llevarlo.

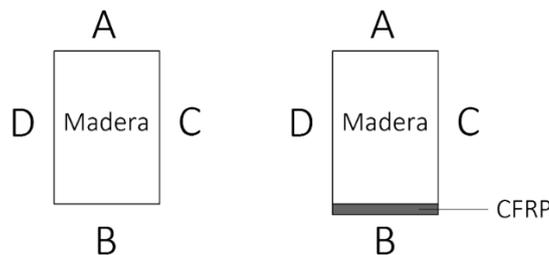


Figura 3.5. Designación de caras en las vigas. Izquierda: Vigas sin refuerzo (SR). Derecha: Viga con refuerzo (LR).

### 3.2. RESULTADOS

#### SR1 (sin refuerzo)

El promedio de la amplitud de las señales generadas por las tres fuentes de HN creadas en cada punto y la posición de los puntos donde se generaron dichas fuentes se indican en las Tablas 3.1 y 3.2. Igualmente se muestra en la Figura 3.6 la amplitud de la señal respecto a la distancia del sensor. Cabe recordar que las vigas SR1 y SR2 no están reforzadas con CFRP en su cara inferior B, por lo que las fuentes artificiales en este caso se generan siempre sobre la superficie de madera. En algunas ocasiones, debido al umbral utilizado es posible que la onda se atenúe tanto que su amplitud no llegue a superar el umbral mínimo para que el sensor la registre. Por ello, por ejemplo, en el punto -100 cm de la cara lateral B, no hay una amplitud registrada.

X cara lateral (cm)	Amplitud (dB)
-100	53,4
-80	58,8
-60	72,1
-40	76,1
-20	90,7
20	87,1
40	72,3
60	64,3
80	52,4

Tabla 3.1. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga SR1.

X cara inferior (cm)	Amplitud (dB)
-80	54,9
-60	61,1
-40	68,4
-20	76,6
20	77,0
40	69,3
60	54,8
80	51,9

Tabla 3.2. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga SR1.

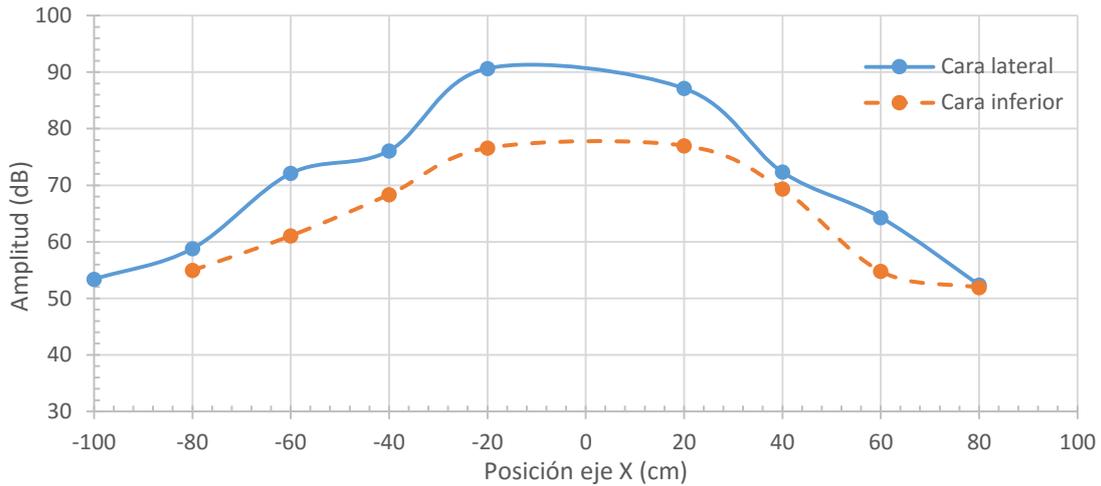


Figura 3.6. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga SR1. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.

Se puede apreciar en la Figura 3.6 que la atenuación en la viga SR1 es en general uniforme con pendientes similares tanto en la cara lateral como inferior. Esto es debido a que, aunque en la cara lateral (C) de la viga (Figura 3.7) se observa la presencia de numerosas fendas, éstas no influyen en el estudio de atenuación por situarse en todo momento por encima del sensor S1 y de las roturas de minas.

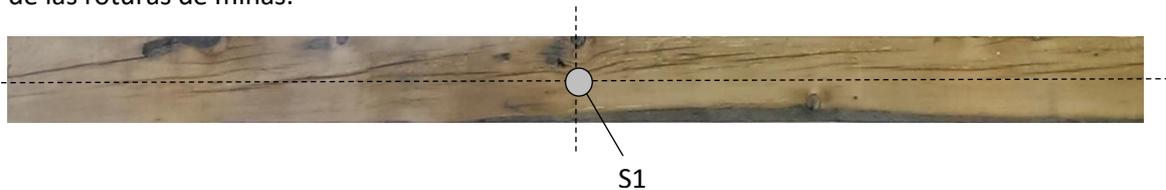


Figura 3.7. Fotografía cara lateral (C) de la viga SR1.

#### SR2 (sin refuerzo)

La media de la amplitud de las señales generadas por las tres fuentes de HN creadas en cada punto del eje X de la cara lateral y la posición de los puntos donde se generaron dichas fuentes se indica Tabla 3.3. Igualmente se muestra en la Figura 3.8 la amplitud de la señal respecto a la distancia del sensor. Se puede observar en estos resultados un hecho a menudo frecuente en este tipo de material como es la madera. Y es que de 40 a 60 cm la amplitud de la onda que detecta el sensor, aumenta en lugar de disminuir. Este hecho es común ya que la madera por ser un material heterogéneo puede atenuar en mayor o menor medida la onda según donde se genera la fuente de EA. Un nudo, una fenda o un cambio de dirección de las fibras cerca de la creación de la fuente pueden ocasionar una disminución enorme de la amplitud de la onda. Por tanto es de suponer que la onda generada en el punto a 40 cm se ve afectada por un nudo, fenda o cambio de dirección de las fibras cercano. En este caso debido a un problema de tiempos con la prensa multiensayos no se pudo realizar la medida de la atenuación en la cara inferior B.

X cara lateral (cm)	Amplitud (dB)
-100	37,1
-80	40,1
-60	47,5
-40	56,4
-20	80,6
0	96,9
20	89,5
40	73,6
60	74,9
80	59,3
100	53,1

Tabla 3.3. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga SR2.

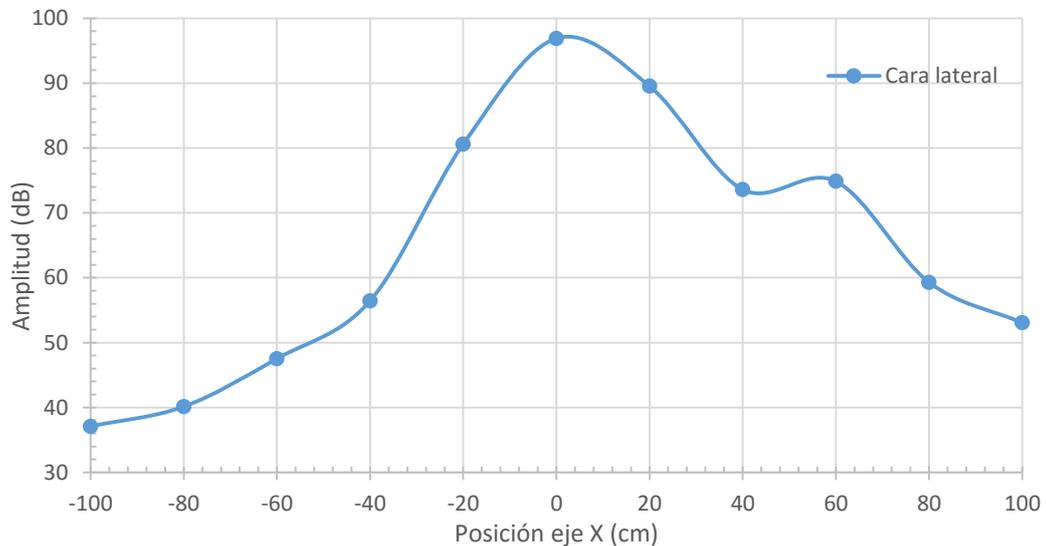


Figura 3.8. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga SR2. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.

Se observa en la (Figura 3.8) una clara diferencia de atenuación entre la parte izquierda y la derecha de la cara lateral (C) de la viga. Esto se debe con toda probabilidad al gran nudo que se sitúa en la parte izquierda de la cara provocando un descenso en la atenuación de la onda (Figura 3.9).

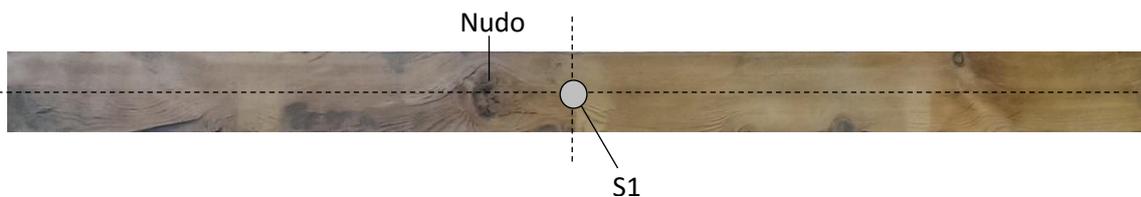


Figura 3.9. Fotografía cara lateral (C) de la viga SR2.

LRS1 (con refuerzo laminado de CFRP)

El promedio de la amplitud de las señales generadas por las tres fuentes de HN creadas en cada punto y la posición de los puntos donde se generaron dichas fuentes se indican en las Tablas 3.4 y 3.5. Igualmente se muestra en la Figura 3.10 la atenuación que sufre la señal respecto a la distancia del sensor. Al igual que en la viga anterior SR2 se observa un resultado ilógico a priori. En la posición -100 cm el sensor recibe mayor amplitud de onda en la cara inferior (más alejada del sensor) que en la cara lateral. Como ya se ha comentado anteriormente la heterogeneidad de la madera puede provocar estos resultados. Se aprecia una gran diferencia en la posición cero entre la cara lateral C y la cara inferior B. Cabe recordar que en este caso la cara inferior está reforzada con CFRP y la atenuación de la onda se ve afectada pues debe atravesar CFRP, resina, imprimación y madera para llegar al sensor.

X cara lateral (cm)	Amplitud (dB)
-100	43,1
-80	54,5
-60	62,4
-40	66,6
-20	85,6
0	97,4
20	81,1
40	74,9
60	69,8
80	57,9
100	54,6

Tabla 3.4. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRS1.

X cara inferior (cm)	Amplitud (dB)
-100	50,3
-40	60,2
-20	64,7
0	70,0
20	68,7
40	64,8
100	41,5

Tabla 3.5. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRS1.

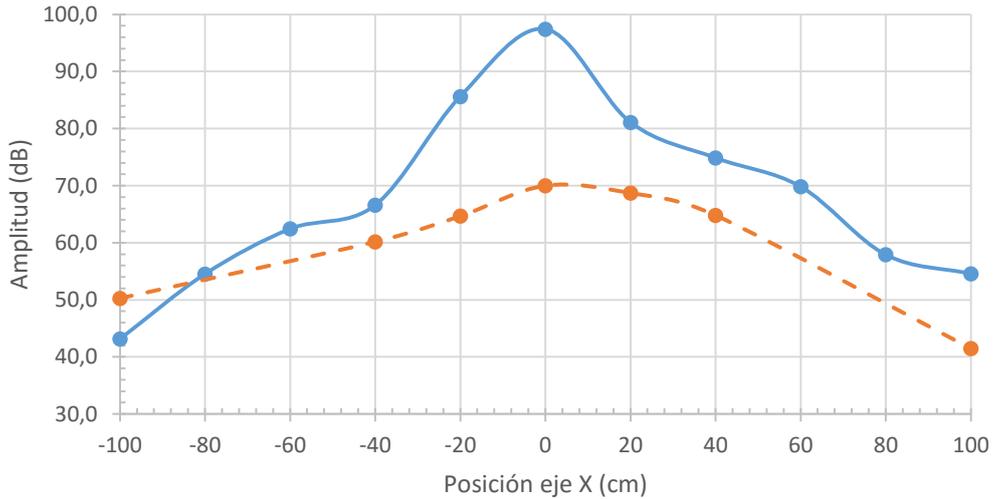


Figura 3.10. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRS1. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.

Se aprecia una mayor atenuación en la parte izquierda de la cara lateral (C) que en la derecha (Figura 3.10). Esta diferencia del orden de  $13 \text{ dB}_{AE}$  entre las dos caras tiene fácil explicación. Se observa en la Figura 3.11 una gran fenda que atraviesa longitudinalmente la mitad de la cara C abriendo un hueco entre las roturas de mina y el sensor de EA (S1). Una fenda en la parte derecha afecta en menor medida a la atenuación por no dividir totalmente al sensor de las roturas de minas. Además, un gran nudo en la parte izquierda de la cara puede provocar la mayor atenuación de la onda.

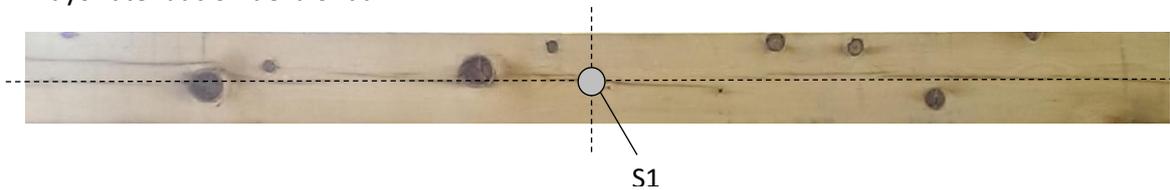


Figura 3.11. Fotografía cara lateral (C) de la viga LRS1.

#### LRS2 (con refuerzo laminado de CFRP)

Se representan en las Tabla 3.6 y 3.7 el promedio de la amplitud de las señales generadas por las tres fuentes de HN creadas en cada punto y la posición de los puntos donde se generaron dichas fuentes. En la Figura 3.12 se muestra la atenuación sufrida por la señal con respecto a la distancia del sensor. Se aprecia en este caso que hay mayor amplitud a una distancia de 40 cm que de 20 cm en la cara lateral de la viga, resultado que tiene su explicación en la heterogeneidad de la madera como ya se ha reseñado anteriormente.

X cara lateral (cm)	Amplitud (dB)
-100	44,7
-80	44,5
-60	51,1
-40	62,2
-20	82,9
3	97,7
20	71,8
40	72,6
60	63,5
80	56,2
100	49,9

Tabla 3.6. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRS2.

X cara inferior (cm)	Amplitud (dB)
-80	38,1
-60	44,8
-40	53,0
-20	67,1
20	65,3
40	57,9
60	54,7
80	51,6
100	42,5

Tabla 3.7. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRS2.

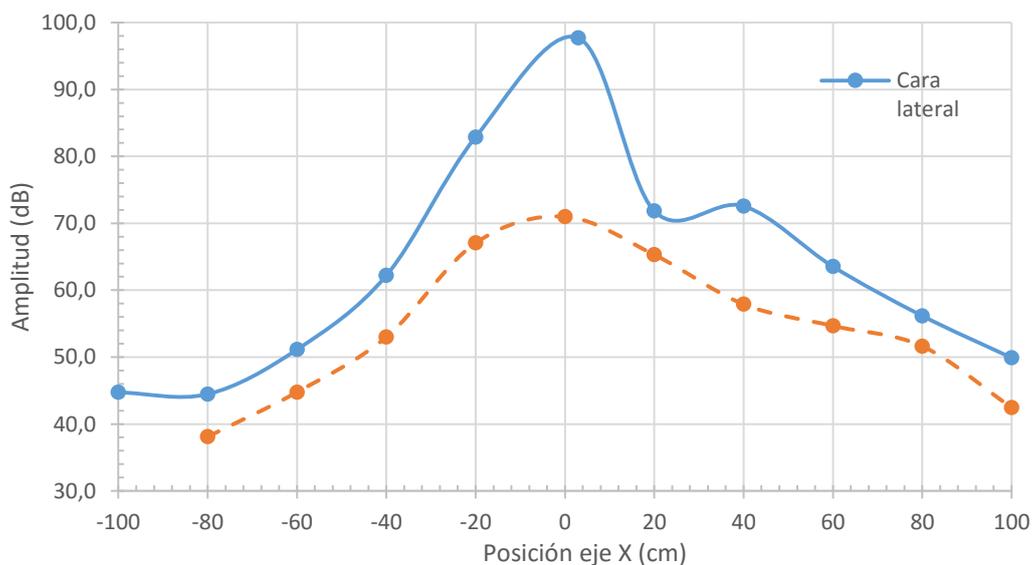


Figura 3.12. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRS2. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.

Se aprecia en la Figura 3.12 poca simetría entre la parte izquierda y derecha de la cara lateral (C) de la viga. Si se observa esta cara (Figura 3.13) se puede constatar que contiene numerosas fendas de gran grosor que atraviesan todo el ancho y largo de la viga. Por tanto, no es de extrañar la poca similitud entre las pendientes de atenuación en esta cara.

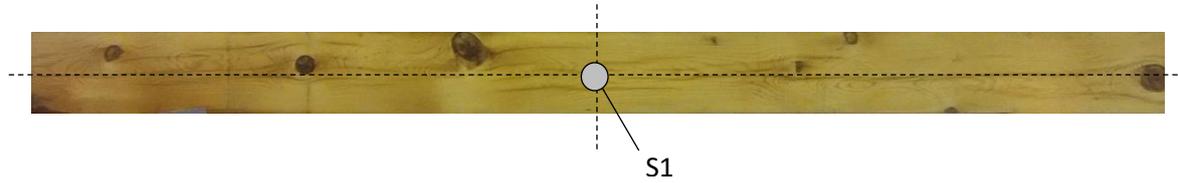


Figura 3.13. Fotografía cara lateral (C) de la viga LRS2.

LRD1 (con refuerzo laminado de CFRP)

El promedio de la amplitud de las señales generadas por las tres fuentes de HN creadas en cada punto y la posición de los puntos donde se generaron dichas fuentes se indican en las Tablas 3.8 y 3.9. Igualmente se muestra en la Figura 3.14 la atenuación que sufre la señal respecto a la distancia del sensor. Como ya se ha apuntado puede ser que en casos aislados la amplitud no decaiga con la distancia debido a la heterogeneidad de la madera tal y como ocurre en los puntos -20 y -40 cm entre las dos caras.

X cara lateral (cm)	Amplitud (dB)
-100	49,4
-80	48,6
-60	58,5
-40	60,4
-20	70,2
0	99,0
20	96,4
40	76,9
60	65,8
80	51,6
100	45,4

Tabla 3.8. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRD1.

X cara inferior (cm)	Amplitud (dB)
-80	43,7
-60	51,9
-40	62,2
-20	72,7
0	75,0
20	70,6
40	59,4
60	54,9
80	48,8

Tabla 3.9. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRD1.

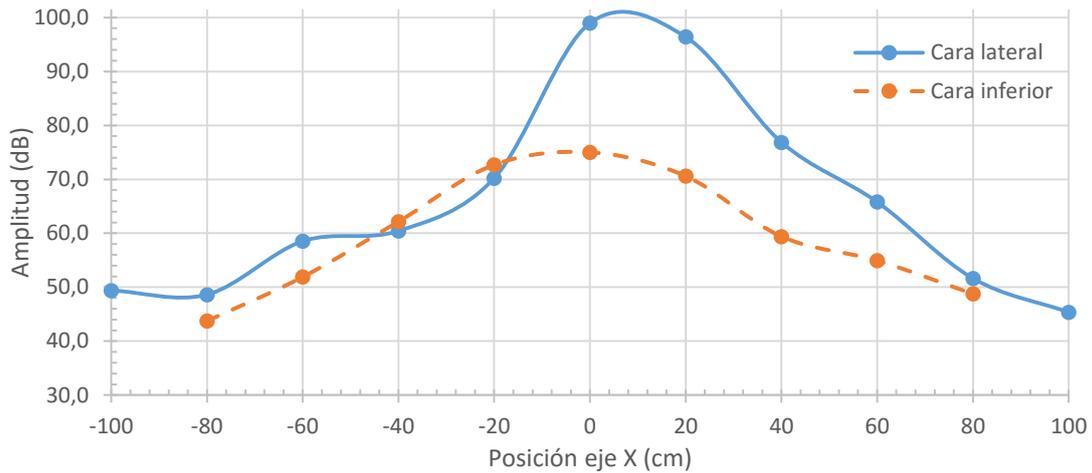


Figura 3.14. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRD1. Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.

Se constata en la Figura 3.14 un claro descenso en la atenuación desde el punto inicial 0 cm hasta el punto -20 cm en la cara lateral (C). Observando la parte izquierda de esta cara en la Figura 3.15 se puede apreciar la presencia de un grupo de nudos entre estos dos puntos, lo cual explica este gran descenso de la atenuación de la onda siendo un aspecto a tener en cuenta en los análisis de EA de los ensayos posteriores.

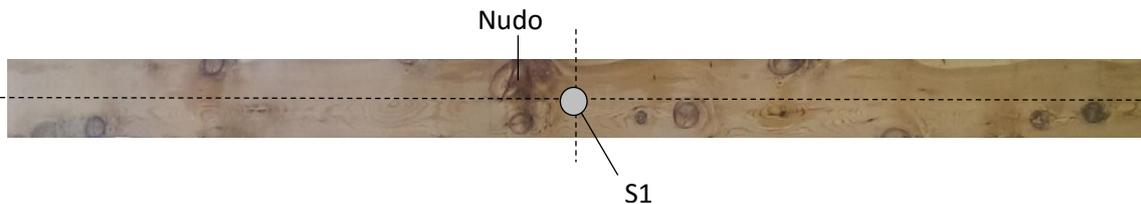


Figura 3.15. Fotografía cara lateral (C) de la viga LRD1.

LRD2 (con refuerzo laminado de CFRP)

Por último, como en el resto de vigas se representan en las Tabla 3.10 y 3.11 el promedio de la amplitud de las señales generadas por las tres fuentes de HN creadas en cada punto y la posición de los puntos donde se generaron dichas fuentes. En la Figura 3.16 se muestra la atenuación sufrida por la señal con respecto a la distancia del sensor.

X cara lateral (cm)	Amplitud (dB)
-100	52,3
-80	56,8
-60	61,7
-40	72,5
-20	86,3
0	97,8
20	83,5
40	74,4
60	66,6
80	55,2

100	54,8
-----	------

Tabla 3.10. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA. Roturas de minas generadas en la cara lateral C de la viga LRD2.

X cara inferior (cm)	Amplitud (dB)
-100	42,5
-80	51,5
-60	54,1
-40	62,7
-20	66,6
0	66,6
20	69,4
40	64,6
60	57,2
80	49,7
100	48,0

Tabla 3.11. Posición de las fuentes artificiales generadas y amplitud de las señales de EA en la cara inferior B de la viga LRD2.

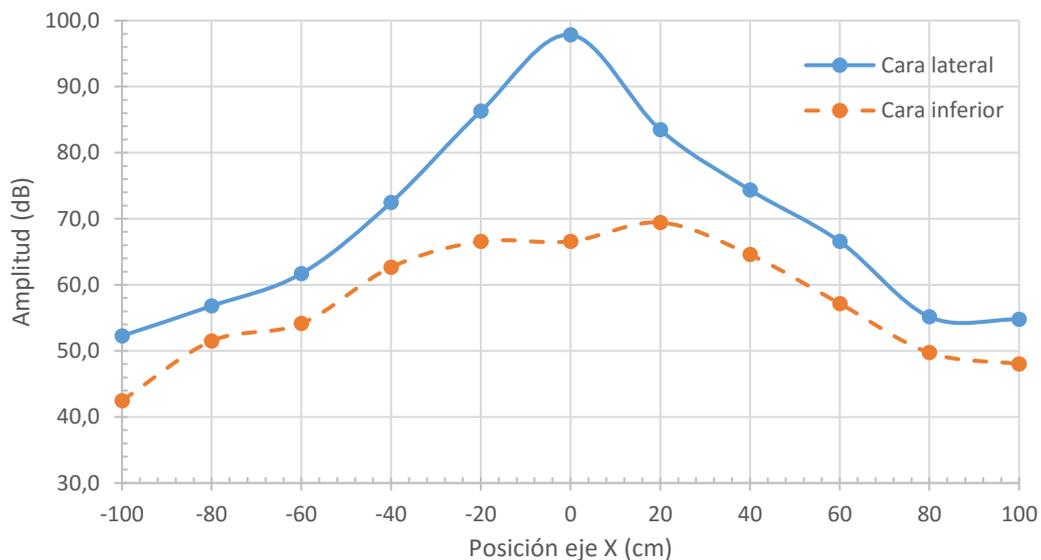


Figura 3.16. Curva de amplitudes con respecto a la distancia (curva de atenuación). Viga LRD2.

Color azul: rotura de mina realizada en la cara lateral C. Color naranja: rotura de mina en la cara inferior B.

En este caso, se observa en toda la cara lateral (C) de la viga uniformidad en el descenso de la atenuación de la onda (Figura 3.16). Si se observa esta cara (Figura 3.17) se puede apreciar una fenda que no afecta a la atenuación por situarse ésta por encima del sensor (S1) y las roturas de minas. Esto explica esta uniformidad en las pendientes de atenuación hasta los últimos puntos donde se generaron fuentes HN. Los nudos presentes, en este caso, no parecen tener el suficiente tamaño para afectar a la atenuación en la cara C.

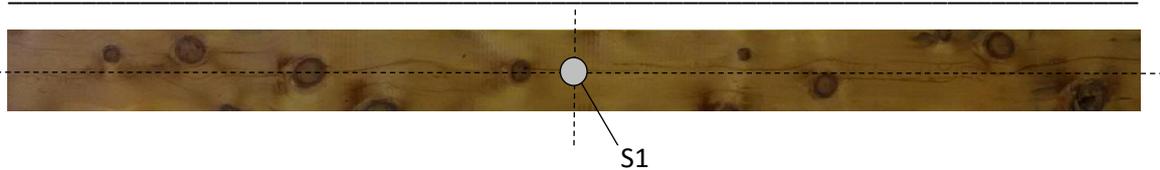


Figura 3.17. Fotografía cara lateral (C) de la viga LRD2.

Con los datos obtenidos en todos los ensayos de atenuación anteriores se realizó un cálculo aproximado de la atenuación que sufre una onda a lo largo del eje de la viga (eje X). Para el cálculo se usaron las amplitudes de las señales de EA cada 20 cm y se han dividido por esta distancia. La Tabla 3.12 muestra el promedio de este cálculo para las caras lateral e inferior de cada viga en  $dB_{AE}/m$ .

Se aprecian resultados similares en todas las vigas en su cara lateral, con diferencias máximas de  $7,5 dB_{AE}/m$ . No se aprecia lo mismo en las caras inferiores donde existe una gran diferencia de atenuación de una viga a otra. Es importante destacar que la atenuación en la cara inferior (B) de las vigas con refuerzo de CFRP es menor que la cara lateral (C). Se puede constatar que la atenuación en el CFRP y la resina es menor que en la madera.

	Roturas de mina realizadas en la cara lateral (C)	Roturas de mina realizadas en la cara inferior (B)
SR1	51,5	39,0
SR2	52,0	-
LRS1	48,5	23,5
LRS2	50,5	37,0
LRD1	51,5	42,5
LRD2	44,5	21,5

Tabla 3.12. Atenuación en  $dB_{AE}/m$  de todas las vigas.

## 4. ENSAYO DE LOCALIZACIÓN DE ROTURAS DE MINA: VELOCIDAD

### 4.1. ENSAYO: DESCRIPCIÓN

Los sensores de EA se distribuyeron de forma lineal a lo largo de la cara lateral de la viga, tal y como muestra la Figura 4.1. Debido a esta disposición la localización se realizó sólo en el eje X (localización lineal). La separación entre sensores se determinó a partir de los resultados de atenuación que se han presentado en el Capítulo 3.

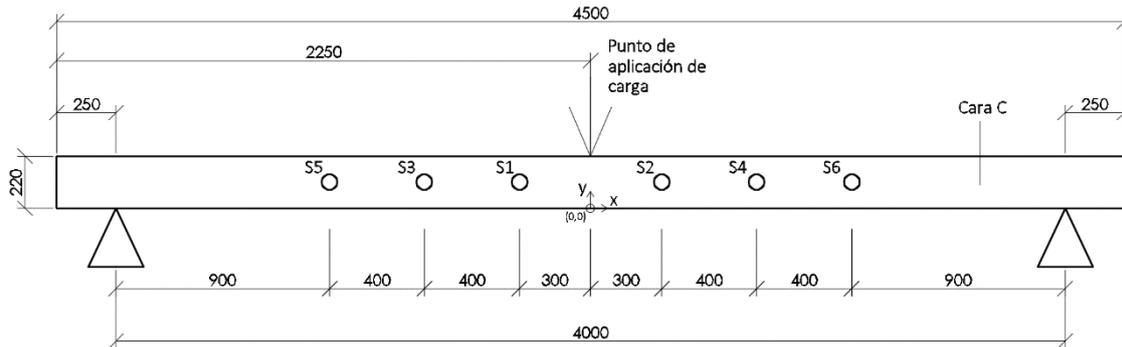


Figura 4.1. Esquema de posicionamiento de sensores de EA en la viga (S1 a S6). Cotas en mm.

Está comprobado que la madera es un material muy heterogéneo, lo cual dificulta enormemente el proceso de localización y obliga a realizar una aproximación, intentando ser lo más riguroso posible. Una vez conocidas las coordenadas de los sensores (Figura 4.1) y los tiempos de llegada de las señales de EA a cada sensor sólo queda conocer la velocidad de propagación de la onda. Para obtenerla de la manera más precisa posible (al ser un material heterogéneo no existe una única velocidad y además hay varios modos de ondas; P, S, Rayleigh), se ha tratado cada espécimen de forma individual y se ha realizado a un análisis específico descrito a continuación.

Una vez colocados los sensores en la viga se eligieron varios puntos de posición conocida, siempre dentro de la línea formada por los sensores, donde se realizaron roturas de minas mediante la fuente Hsu-Nielsen. Conocidas en este caso las coordenadas de las fuentes de EA, se procedió a determinar la velocidad de propagación de la onda más óptima que posicione con la mejor precisión posible dichas fuentes artificiales.

Con el objeto de simplificar el cálculo de la velocidad se eligió un constructor de eventos con un máximo de 2 *hits* por evento, según lo cual sólo dos sensores son necesarios para realizar una localización lineal. El uso de más de 2 *hits* por evento, debido a la alta atenuación de la onda, induciría errores adicionales. Por ello, el algoritmo usa únicamente los dos sensores entre los que está la fuente para realizar su ubicación.

Considerese, por ejemplo, la posición de los sensores S2 y S4 ubicados en el sistema de referencia de la Figura 4.2, en las posiciones conocidas  $x_2$  y  $x_4$ , respectivamente, así como la fuente,  $F$ , cuya posición  $x_F$  se trata de calcular. En este caso, se sabe que:

$$v \text{ (cm/ms)} = \frac{x \text{ (cm)}}{t \text{ (ms)}}$$

$$v t_2 = x_F - x_2,$$

$$v t_4 = x_4 - x_F, \tag{4.1}$$

siendo  $t_2$  y  $t_4$  los tiempos de llegada de la onda a los sensores S2 y S4, y  $v$  la velocidad de la onda. Teniendo en cuenta que  $\Delta t = t_2 - t_4$ , se obtiene fácilmente que

$$x_F = x_e = \frac{1}{2} v \Delta t + \frac{(x_2+x_4)}{2}. \quad (4.2)$$

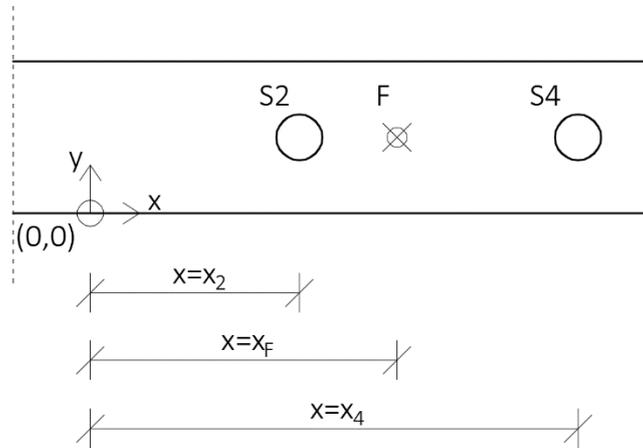


Figura 4.2. Localización lineal de una fuente de EA. La fuente F está situada entre dos sensores, S2 y S4.

La Ecuación 4.2 utilizada por el software comercial *Vallen Systeme* [7] permite obtener la posición de la fuente,  $x_F$  o  $x_e$  (posición experimental), respecto del sistema de coordenadas elegido, conociendo la velocidad de propagación de la onda en el medio y la diferencia de tiempos de llegada ( $\Delta t$ ) del evento de EA generado por la fuente en los sensores cuya posición es, obviamente conocida. No obstante, es importante resaltar que esta ecuación ha sido obtenida bajo la suposición representada en la Figura 4.2, es decir, que la fuente se encuentre entre los dos sensores.

En este caso la forma de proceder fue la inversa, puesto que se conoce la posición de la fuente pero no la velocidad de propagación. Para cada rotura de mina en una viga de madera (material heterogéneo) el software obtiene una diferencia de tiempos de llegada ( $\Delta t$ ) distinta. Se necesita, por tanto, una única solución de  $\Delta t$  por cada viga que determine la velocidad con el menor error entre todas las posibles.

Se planteó pues, un problema de optimización donde se utiliza la fórmula del error relativo ( $E_r$ ), dada por

$$E_r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{t_i} - x_{e_i})^2}{\sum_{i=1}^n x_{t_i}^2}, \quad (4.3)$$

$x_t$  y  $x_e$  son las posiciones teóricas y experimentales de las fuentes artificiales. Este error será mínimo cuando  $x_t$  y  $x_e$  sean lo más próximas posibles, es decir, cuando su diferencia se aproxime a cero. El problema se reduce a optimizar esta función teniendo como incógnita la velocidad de propagación, es decir:

$$\frac{dE_r}{dv} = 0. \quad (4.4)$$

De la Ecuación 4.4 se despeja la velocidad ( $v$ ) que será la que proporcione el menor error relativo y, por consiguiente, la óptima. A modo de ejemplo se explica a continuación el proceso para la obtención de la velocidad en la viga SR1 comentando los problemas que surgieron.

A parte de esto y como ya se ha mencionado, las ondas tienen varios modos (onda P, S, Rayleigh) que viajan a distintas velocidades por el medio y que pueden inducir errores en la localización.

En las ondas P o de compresión el movimiento de las partículas se produce en la dirección de propagación. Por su parte, en las ondas S o de corte el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación. Estos dos tipos de onda se les denomina ondas de volumen y existe una relación general aproximada entre sus velocidades,  $C_S = 0,6 C_P$  (la onda P siempre es más rápida que la onda S).

Además de las ondas de volumen existen las ondas de superficie o Rayleigh. Se conoce que su velocidad de propagación es ligeramente inferior que la velocidad de la onda S ( $C_R = 0,9 C_S$ ;  $C_R = 0,5 C_P$ ) por lo que llegan después que las ondas de volumen (P y S). A parte, este tipo de ondas se propaga en 2 direcciones por lo que sus amplitudes decaen más suavemente que las ondas de volumen P y S (que se propagan en tres dimensiones). Se muestra en la Figura 4.3 dos *hits* de un evento localizado (rotura de mina) en el punto -40 cm registrados por los sensores S1 y S3 en la viga LRS1.

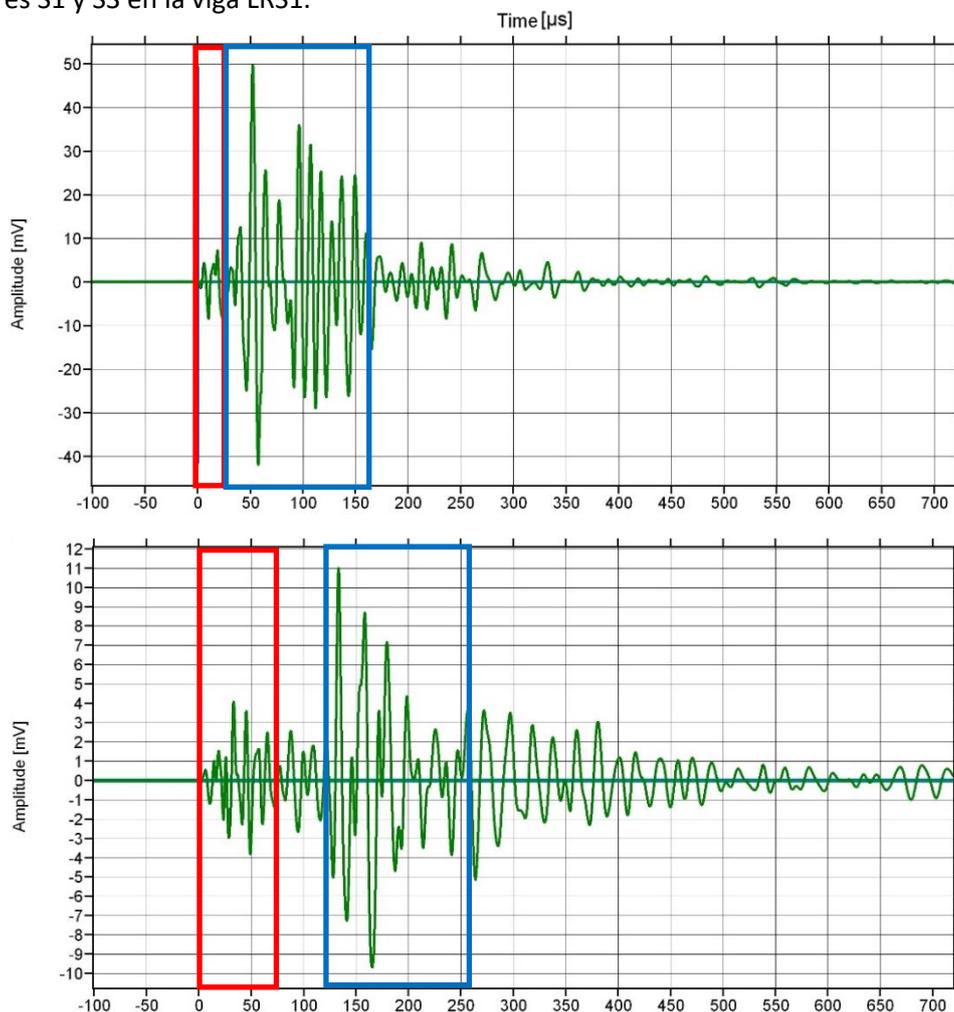


Figura 4.3. Arriba: Amplitud (mV) con respecto al tiempo ( $\mu\text{s}$ ) de un *hit* registrado por el S1. Abajo: Amplitud (mV) con respecto al tiempo ( $\mu\text{s}$ ) de un *hit* registrado por el S3. Viga LRS1.

Se observa en la Figura 4.3 dos modos de onda de forma clara. En primer lugar el sensor registra un modo de onda de menor amplitud (rojo) y en segundo lugar otro modo de onda con amplitud mayor (azul). Además se aprecia como el segundo modo de onda se retrasa del S1 (sensor cercano de la rotura de mina) al S3 (sensor más alejado de la rotura de mina). Se puede

constatar, pues, que el modo de onda que llega en primer lugar (rojo) es la onda P y en segundo lugar (azul) es la onda Rayleigh. Por lo tanto, el modo de onda que cruza el umbral de detección en los ensayos es el P y no se producen errores en la localización.

#### 4.2. RESULTADOS

##### SR1

Como se ha señalado anteriormente aunque la posición inicial de los sensores es la mostrada por la Figura 4.1, debido al estado de la madera y con objeto de colocar los sensores en la superficie más homogénea posible en cada viga, se colocaron en unas posiciones específicas. Para la viga SR1 se muestran en la Tabla 4.1.

Sensores	x (mm)
S1	-300
S2	300
S3	-700
S4	700
S5	-1100
S6	1100

Tabla 4.1. Posición real de los sensores en la viga SR1.

La fuente artificial de EA utilizada y la configuración fue la ya descrita anteriormente en el Apartado 3.1. Se realizaron roturas de mina en cada punto teórico ( $x_t$ ) como muestra la Tabla 4.2.

$x_t$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )
0	-2,20
200	57,50
400	-23,90
800	-56,40
1000	38,70
-200	-58,30
-400	17,90
-600	-78,20
-1000	-53,10

Tabla 4.2. Posición de las fuentes de EA ( $x_t$ ) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga SR1.

El software *Vallen Systeme* proporciona en tiempo real la diferencia de tiempos de llegada ( $\Delta t$ ) entre dos *hits* generados por una fuente a los dos sensores más próximos. Por tanto, conocida también la posición de los sensores y la posición de la fuente, sólo queda calcular la velocidad aplicando las Ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4, las cuales se resolvieron con la versión 5.0 del programa *Wolfram Mathematica* (Figura 4.4) [6].

```

1 T = {-2.20, 57.50, -23.90, -56.40, 38.70, -58.30, 17.90, -78.20, -53.10};
2 t = T / 1000;
3 X = (x1 + x2) / 2;
4 X = {0, 0, 50, 90, 90, 0, -50, -50, -90};
5 xe = (v * t / 2) + X;
6 xt = {0, 20, 40, 80, 100, -20, -40, -60, -100};
7 Y = sum_{i=1}^9 (xt[[i]] - xe[[i]]) ^ 2;
8 Z = sum_{i=1}^9 (xt[[i]]) ^ 2;
9 K = Y / Z;
10 W = partial_v K;
11 Solve[W = 0, v]
12 [{v -> 471.174}]

```

Figura 4.4. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga SR1.

En el algoritmo de la Figura 4.4,  $T = \Delta t$  en  $\mu s$  obtenido restando los tiempos de llegada del sensor derecho al del sensor izquierdo;  $x_1$  y  $x_2$  con las posiciones de los dos sensores entre los que se sitúa la fuente,  $x_e$  igual a la posición experimental que dependerá de la velocidad de propagación ( $v$ ) y  $x_t$  la posición teórica de la fuente artificial. En la línea 9 se aplica la ecuación del error relativo (Ecuación 4.4) que queda en función de  $v$  y que posteriormente se deriva e iguala a cero (Líneas 10 y 11) para resolver y averiguar la velocidad óptima ( $v_{opt}$ ) en la Línea 12.

Cabe recordar que se ha de tener especial cuidado en que el software *Vallen Systeme* escoja siempre los dos sensores que encierran a la fuente de EA a la hora de localizar, no siendo siempre así ya que en algunas ocasiones la onda llega antes a un tercer sensor consecutivo al segundo (Figura 4.5).

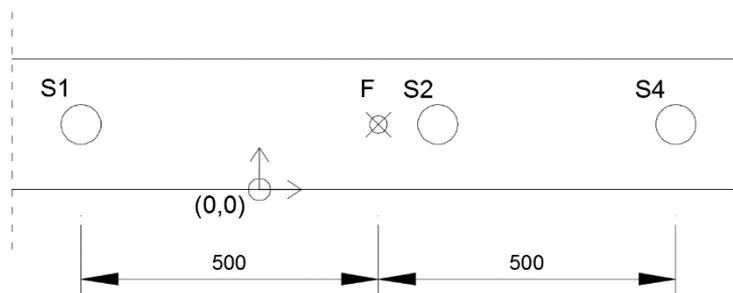


Figura 4.5. Localización lineal de una fuente de EA. La fuente F está situada fuera de los dos sensores S2 y S4. Cotas en mm.

Como se puede ver en la Figura 4.5 la fuente ( $F$ ) está situada a la misma distancia del sensor 1 que del sensor 4, por lo que, puede ocurrir debido a la heterogeneidad de la madera que el software realice la localización con los sensores 2 y 4, aplicando otra ecuación distinta a la Ecuación 4.2 y volviéndose erróneo el cálculo de la velocidad. En el caso que esto ocurra bastará con aplicar un filtro por canales seleccionando los dos que nos interesen en la localización, es decir, los situados a ambos lados de la fuente de EA, en este caso  $S1$  y  $S2$ .

Se muestra en la Figura 4.6 una comparación de los puntos teóricos (donde se rompieron minas) y los puntos experimentales (resultado de la localización con la velocidad optimizada).

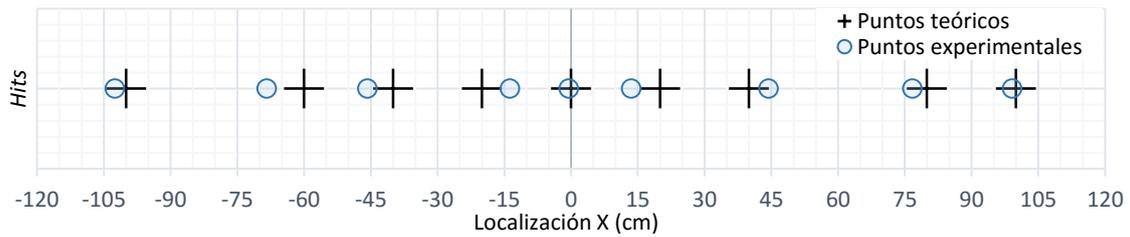


Figura 4.6. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga SR1.

## SR2

A continuación, siguiendo el proceso descrito para la viga SR1 se realizaron los mismos pasos para la viga SR2. Se muestra en la Tabla 4.3 la posición real de los sensores en el espécimen SR2. Al igual que en la viga SR1 se crearon fuentes de EA Hsu-Nielsen en la línea formada por los seis sensores. La posición exacta de estos puntos en el eje X es la mostrada por la Tabla 4.4. En la Figura 4.7 se muestran los cálculos realizados con el programa *Wolfram Mathematica* para obtener la velocidad óptima ( $v_{opt}$ ) de propagación de la onda.

Sensores	x (mm)
S1	-350
S2	300
S3	-700
S4	700
S5	-1100
S6	1100

Tabla 4.3. Posición real de los sensores en la viga SR2.

$x_t$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )
-350	68,06
300	-64,47
-700	-60,90
700	-66,50
-1100	-76,20
1100	65,20

Tabla 4.4. Posición de las fuentes de EA ( $x_t$ ) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga SR2.

```

T = {68.06, -64.47, -60.90, -66.50, -76.20, 65.20};
t = T / 1000;
X = (x1 + x2) / 2;
X = {-52.5, 50, -52.5, 90, -90, 90};
xe = (v * t / 2) + X;
xt = {-35, 30, -70, 70, -110, 110};

Y =  $\sum_{i=1}^6 (xt_{[i]} - xe_{[i]})^2$ ;
Z =  $\sum_{i=1}^6 (xt_{[i]})^2$ ;
K = Y / Z;
W =  $\partial_v K$ ;
Solve[W == 0, v]
{{v -> 571.16}}

```

Figura 4.7. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga SR2.

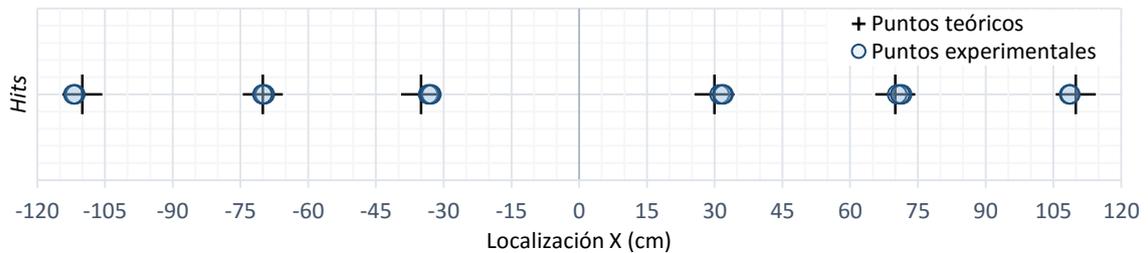


Figura 4.8 Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga SR2.

LRS1

Sensores	x (mm)
S1	-300
S2	300
S3	-700
S4	700
S5	-1100
S6	1100

Tabla 4.5. Posición real de los sensores en la viga LRS1.

$x_t$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )
-400	38,45
-800	52,20
400	-46,63
800	-40,40

Tabla 4.6. Posición de las fuentes de EA ( $x_t$ ) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRS1.

```

T = {38.45, 52.20, -46.63, -40.40};
t = T / 1000;
X = (x1 + x2) / 2;
X = {-50, -90, 50, 90};
xe = (v * t / 2) + X;
xt = {-40, -80, 40, 80};

Y = sum_{i=1}^4 (xt[[i]] - xe[[i]]) ^ 2;
Z = sum_{i=1}^4 (xt[[i]]) ^ 2;
K = Y / Z;
W = partial_v K;
Solve[W == 0, v]

{{v -> 443.65}}
    
```

Figura 4.9. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRS1.

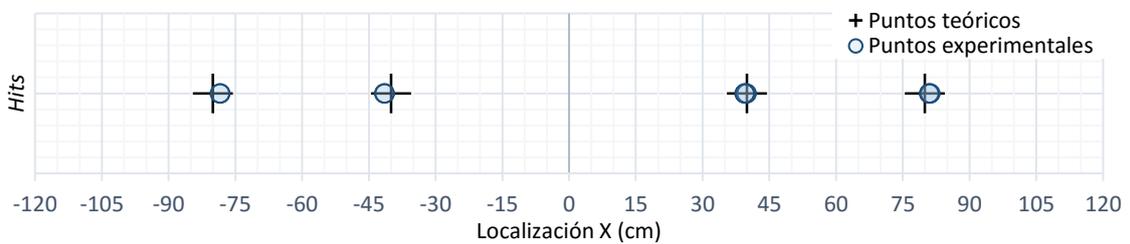


Figura 4.10. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRS1.

LRS2

Sensores	x (mm)
S1	-300
S2	300
S3	-700
S4	700
S5	-1100
S6	1100

Tabla 4.7. Posición real de los sensores en la viga LRS2.

$x_t$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )
-200	129,83
-400	-50,70
-600	48,03
-800	-54,27
-1000	61,70
200	-99,73
400	67,60
600	-62,63
800	57,50
1000	-55,13

Tabla 4.8. Posición de las fuentes de EA ( $x_t$ ) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRS2.

```

T = {129.83, -50.7, 48.03, -54.27, 61.70, -99.73, 67.60, -62.63, 57.50, -55.13};
t = T / 1000;
X = (x1 + x2) / 2;
X = {0, 50, 50, 90, 90, 0, -50, -50, -90, -90};
xe = (v * t / 2) + X;
xt = {20, 40, 60, 80, 100, -20, -40, -60, -80, -100};
Y = sum_{i=1}^{10} (xt_{[i]} - xe_{[i]}) ^ 2;
Z = sum_{i=1}^{10} (xt_{[i]}) ^ 2;
K = Y / Z;
W = partial_v K;
Solve[W = 0, v]
{{v -> 344.161}}
    
```

Figura 4.11. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRS2.

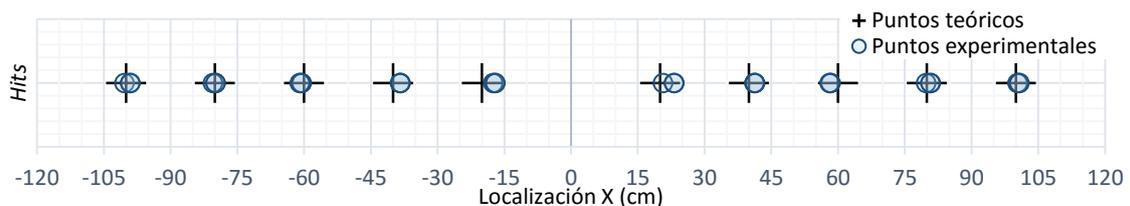


Figura 4.12. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRS2.

LRD1

Sensores	x (mm)
S1	-297
S2	288
S3	-700
S4	700
S5	-1100
S6	1100

Tabla 4.9. Posición real de los sensores en viga LRD1.

$x_t$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )
200	126,07
400	-36,03
600	40,87
-200	-95,07
-400	36,13
-600	-44,30

Tabla 4.10. Posición de las fuentes de EA ( $x_t$ ) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRD1.

```

T = {126.07, -36.03, 40.87, -95.07, 36.13, -44.30};
t = T / 1000;
X = (x1 + x2) / 2;
X = {-0.45, 49.4, 49.4, -0.45, -49.85, -49.85};
xe = (v * t / 2) + X;
xt = {20, 40, 60, -20, -40, -60};
Y =  $\sum_{i=1}^6 (xt_{[i]} - xe_{[i]})^2$ ;
Z =  $\sum_{i=1}^6 (xt_{[i]})^2$ ;
K = Y / Z;
W =  $\partial_v$  K;
Solve[W = 0, v]
{{v → 385.925}}
    
```

Figura 4.13. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRD1.

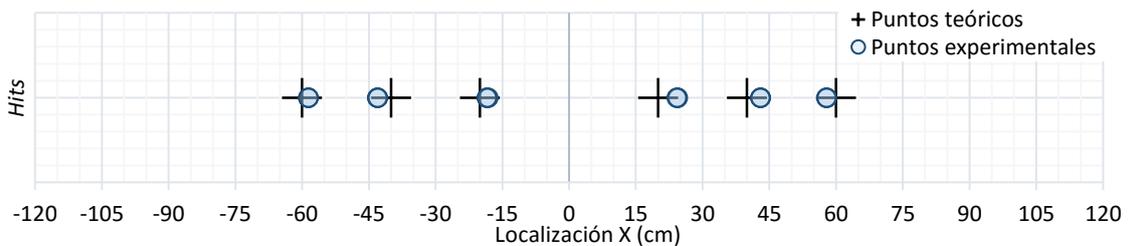


Figura 4.14. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRD1.

LRD2

Sensores	x (mm)
S1	-300
S2	300
S3	-700
S4	700
S5	-1100
S6	1100

Tabla 4.11. Posición real de los sensores en la viga LRD2.

$x_t$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )
200	88,57
400	-50,13
600	44,67
800	-46,10
1000	49,37
-200	-84,63
-400	43,20
-600	-43,70
-800	41,83
-1000	-43,03

Tabla 4.12. Posición de las fuentes de EA ( $x_t$ ) y diferencia de tiempo de llegada ( $\Delta t$ ) en la viga LRD2.

```

T = {88.57, -50.13, 44.67, -46.10, 49.37, -84.63, 43.20, -43.70, 41.83, -43.03};
t = T / 1000;
X = (x1 + x2) / 2;
X = {0, 50, 50, 90, 90, 0, -50, -50, -90, -90};
xe = (v * t / 2) + X;
xt = {20, 40, 60, 80, 100, -20, -40, -60, -80, -100};
Y =  $\sum_{i=1}^{10} (\mathbf{xt}_{[i]} - \mathbf{xe}_{[i]})^2$ ;
Z =  $\sum_{i=1}^{10} (\mathbf{xt}_{[i]})^2$ ;
K = Y / Z;
W =  $\partial_v$  K;
Solve[W = 0, v]
{{v → 450.436}}
    
```

Figura 4.15. Algoritmo de resolución de ecuaciones para calcular la velocidad de propagación de la onda en la viga LRD2.

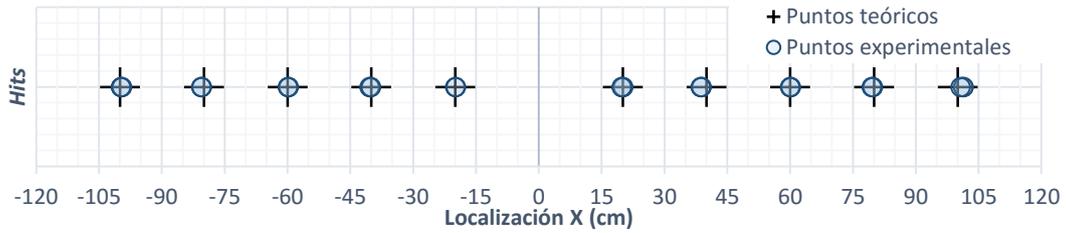


Figura 4.16. Localización en el eje X de los puntos teóricos y experimentales en la viga LRD2.

A modo de resumen se muestran en la Tabla 4.13 los resultados para la velocidad optima ( $v_{opt}$ ) y el error realtivo ( $E_r$ ) finalmente obtenido para localizar las fuentes artificiales, que como puede verse es extraordinariamente bajo (6,5 % como máximo). Por otro lado se observa la enorme disparidad de la velocidad de propagación de una viga a otra, debido a la heterogeneidad, lo que implica cambio de densidad y rigidez de una viga a otra.

	$E_r$ (%)	$v_{opt}$ (cm/ms)	Densidad (kg/m3)
SR1	6,55	471,17	522,52
SR2	0,34	571,16	571,12
LRS1	0,37	443,65	571,89
LRS2	0,51	344,16	578,83
LRD1	3,63	385,93	561,53
LRD2	0,1	450,44	520,86

Tabla 4.13. Resultados del error relativo y de la velocidad de propagación optimizada para cada viga y su densidad.

## 5. ENSAYO A FLEXIÓN CON EMISIÓN ACÚSTICA

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo del proyecto REVMAC se realizó un proceso de selección de las mejores disposiciones y combinación de refuerzos de madera con CFRP.

Básicamente dicho proceso consistió en la realización de ensayos a flexión de vigas de madera de 1,30 m de longitud (Figura 5.1) reforzadas con diversas disposiciones de CFRP y las resinas elegidas según los ensayos de adherencia.

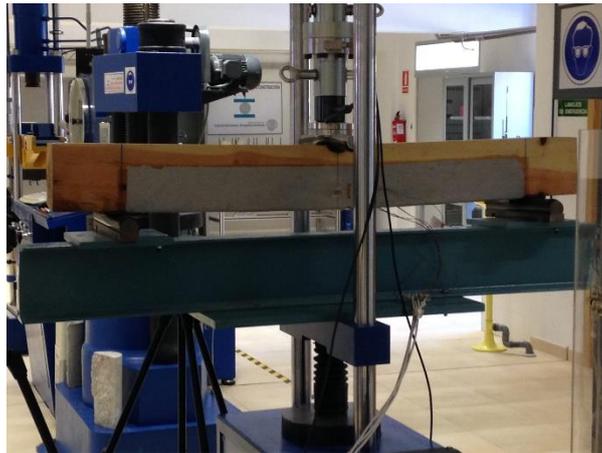


Figura 5.1. Ensayo a flexión de viga de madera de 1,3 m de longitud.

Tras este proceso de selección, se realizaron 6 ensayos a flexión de vigas de madera de 4,5 m de longitud, dos sobre vigas sin refuerzo y cuatro sobre vigas con refuerzo laminado de CFRP. Al ser la madera un material heterogéneo, se ensayaron 2 vigas con el mismo. Los ensayos de esta última parte de la investigación son los que forman parte de este Proyecto Fin de Grado. Todos ellos se monitorizaron con sensores de EA.

A modo de resumen se muestra en la Figura 5.2 un diagrama con los pasos seguidos para la selección de las mejores disposiciones.

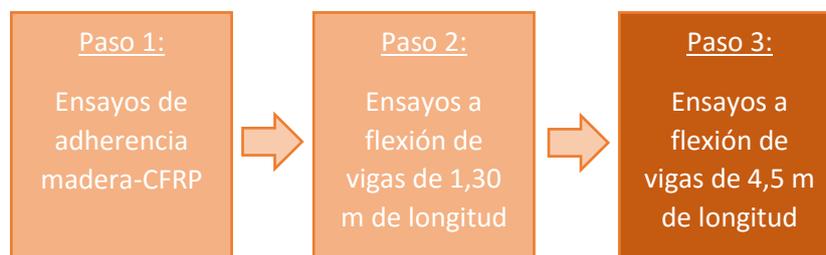


Figura 5.2. Pasos seguidos en el proceso de selección de las distintas disposiciones de refuerzos de CFRP.

Se describen a continuación los especímenes elegidos para los ensayos a flexión en las vigas de madera de 4,5 m de longitud.

**SR**

En primer lugar y con el objetivo de comprobar la efectividad del refuerzo, se han ensayado dos vigas (SR1 y SR2) sin refuerzo alguno.

**LRS**

Dos vigas (LRS1 y LRS2) con refuerzo laminado de CFRP *Sika Carbodur E-512* de 10 cm de ancho y 1,2 mm de espesor con resina Tipo 1.

**LRD**

Dos vigas (LRD1 y LRD2) con refuerzo laminado de CFRP *Drizoro Composite 1405* de 10 cm de ancho y 1,4 mm de espesor con resina Tipo 4.

A modo de resumen se muestran en la Tabla 5.1 las disposiciones utilizadas en este Proyecto.

Viga	Refuerzo	Resina
SR1	Sin refuerzo	Sin resina
SR2		
LRS1	Sika Carbodur E-812 (10 cm)	Tipo 1
LRS2		
LRD1	Drizoro Composite 1405 (10 cm)	Tipo 4
LRD2		

Tabla 5.1. Disposiciones de los refuerzos de CFRP sobre las vigas sometidas a ensayos a flexión en este Proyecto Fin de Grado.

5.2. ENSAYO: DESCRIPCIÓN

Las 6 vigas se ensayaron a flexión a 3 puntos. Los ensayos se llevaron a cabo con el pórtico de la marca SERVOSIS S.L., modelo CH4-ST-100, con una carga máxima de 100 toneladas, situado en el Laboratorio de Mecánica de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Sobre las vigas se colocaron 6 sensores de emisión acústica del tipo VS45-H. Dicho número de sensores y disposición se definió teniendo en cuenta el estudio de atenuación ya descrito en el Capítulo 3. La disposición de la viga con los sensores se describe en la Figura 5.3.

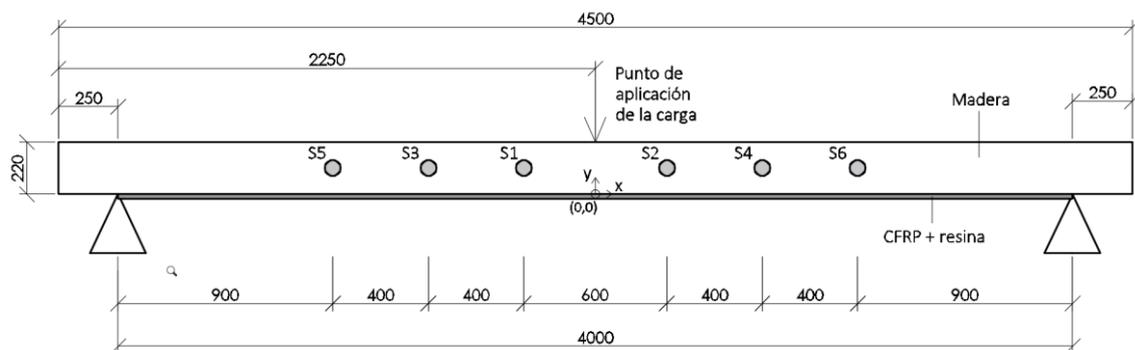


Figura 5.3. Esquema del ensayo a flexión y posición de los sensores de EA en la viga. Cotas en mm.

Como se puede observar en la Figura 5.2 la máxima distancia entre un sensor y una zona de interés (centro de la viga) es de 30 cm, lo que equivaldría a una pérdida en torno a  $15 \text{ dB}_{AE}$ . Por seguridad, se consideró adecuado aumentar la distancia de los sensores S1 y S2 al centro de la cara por ser probable la rotura súbita de la viga en esa zona. Para no recoger el posible ruido de fricción en los apoyos laterales, la distancia entre los apoyos y los sensores fue de 90 cm como mínimo. A parte de estas distancias de seguridad se separó la viga de los puntos de apoyo y el punto de carga con bandas de teflón aislantes del ruido.

Cabe recordar que el esquema de la Figura 5.3 no fue exactamente aplicable a todas las vigas pues pueden contener nudos o fendas que suponen un riesgo para el sensor o que aumenten la atenuación de la onda, por lo que la posición exacta de los sensores puede variar ligeramente como ya se comentó en el Apartado 3.1. Se muestra en la Figura 5.4 una fotografía del ensayo realizado sobre una de las vigas con refuerzo.



Figura 5.4. Ensayo a flexión de la viga LRS1.

Los ensayos se realizaron monótonamente hasta rotura de la viga. La velocidad de desplazamiento del actuador fue constante y con valor de  $1,5 \text{ mm/min}$ . Los parámetros de adquisición de la emisión acústica fueron los descritos en el Apartado 3.1 de este Proyecto Fin de Grado.

### 5.3. INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación utilizada en los ensayos se puede dividir en tres bloques, según lo que se pretende medir:

- Emisión acústica.
- Carga y desplazamiento.
- Deformación.

#### EMISIÓN ACÚSTICA

- Sensores: Como ya se ha comentado en el Apartado 3.1 los sensores utilizados fueron los del tipo VS45-H (multiresonante). Cabe destacar que a cada sensor de EA utilizado en el ensayo se le realizó una comprobación para verificar que mantenía un correcto

estado de funcionamiento. Se aporta en la Tabla 5.2 el número de serie de cada sensor de EA usado. Su disposición se ha mantenido en todos los ensayos de las vigas.

Sensor	Número de serie
S1	4015
S2	4016
S3	4045
S4	3493
S5	4014
S6	4017

Tabla 5.2. Número de serie de los sensores utilizados en el ensayo a flexión.

- **Acoplante:** El objetivo general del acoplo del sensor es proporcionar una consistente, estable y, habitualmente, alta sensibilidad a la hora de captar la onda de EA. En particular, el propósito del acoplante es proporcionar una buena transmisión acústica desde el material de ensayo al transductor. Si no existe acoplante se genera una capa de aire en la interfase, que conlleva un salto grande en la impedancia acústica (resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre éste). El acoplante actúa adaptando la impedancia acústica entre el sensor y la superficie de material de ensayo. El acoplante utilizado en los ensayos fue grasa de silicona *Loctite 8104* (Figura 5.6).



Figura 5.6. Grasa de silicona utilizada como acoplante acústico.

- **Montaje:** El montaje, al igual que el acoplante, tiene una gran influencia sobre el funcionamiento del sensor, es decir, su sensibilidad y respuesta en frecuencia. Hay básicamente dos métodos genéricos para ello; mediante compresión o mediante un adhesivo. En los ensayos se realizó aplicando una fuerza de varios newtons (compresión). Para la aplicación de esta fuerza se usaron arandelas metálicas de 18 mm de diámetro, elementos magnéticos de fijación y barras de nylon del mismo diámetro que el sensor. Se muestra en la Figura 5.7 el sistema de montaje con identificación de sus partes en una de las vigas.

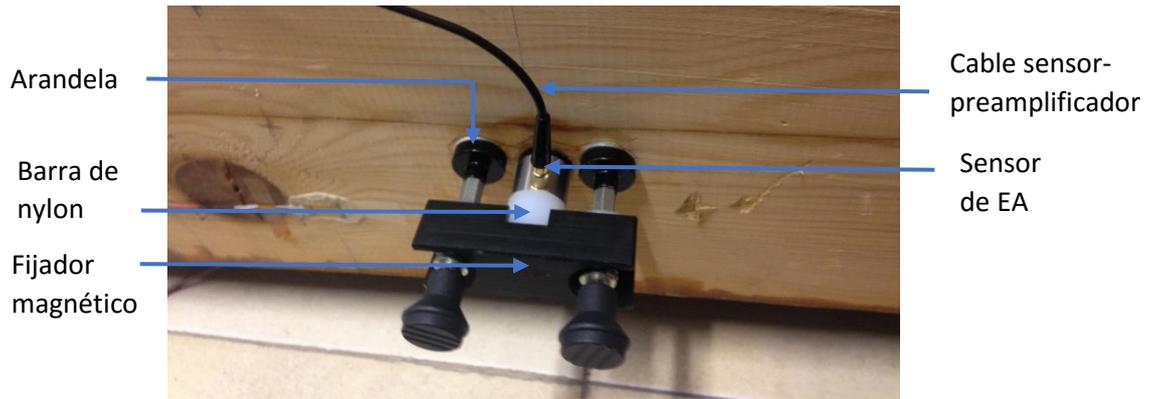


Figura 5.7. Montaje de un sensor mediante un fijador magnético.

- Conectores y cable sensor-preamplificador: Todos los sensores llevan un elemento de conexión en su carcasa por el que sale la señal eléctrica generada en el elemento activo. En los sensores utilizados la señal eléctrica de EA que sale a través del conector es tremendamente débil y debe ser transmitida a través de un cable especial que conecta el sensor con el preamplificador llamado cable sensor-preamplificador de una longitud de 1,2 m en este caso. (Figura 5.8).



Figura 5.8. Cable sensor-preamplificador.

- Preamplificadores: Como ya se ha comentado anteriormente las señales de salida de los sensores de EA tienen poca amplitud y alta impedancia. Los preamplificadores transforman las señales de alta impedancia a señales de baja impedancia, las cuales solo experimentan mínimas pérdidas al transmitirse por cables largos (coaxiales). Los preamplificadores (Figura 5.9) también amplifican la señal de EA a un rango de voltajes que sea adecuado para su registro y procesado por el equipo de EA, siendo además menos vulnerable al ruido.



Figura 5.9. Preamplificador de EA.

Los preamplificadores usados en los ensayos fueron del tipo externos (no integrados en el sensor) del modelo AEP4 de *Vallen Systeme* con una ganancia de 34 dB. Se muestra en la Tabla 5.3 el número de serie de los preamplificadores utilizados así como el canal al que están conectados.

Canal	Número de serie del preamplificador
1	4015
2	4016
3	4045
4	3493
5	4014
6	4017

Tabla 5.3. Número de serie de los preamplificadores utilizados en los ensayos a flexión.

- Cable coaxial: Los cables coaxiales (Figura 5.10) actúan como línea de transmisión de la señal de EA ya amplificada por el preamplificador, la cual llega al equipo de adquisición. Estos cables suelen tener una impedancia de 50  $\Omega$  y pueden tener varios metros de longitud sin que se produzcan altas pérdidas en la señal.



Figura 5.10. Cable coaxial.

- Equipo de adquisición: Los ensayos se realizaron con el equipo de adquisición AMSY-5 de *Vallen Systeme*. La función del equipo (Figura 5.11) es la de registrar y acondicionar las señales para su posterior visualización en la pantalla de un ordenador. Los elementos más importantes para este registro son los módulos ASIPP a los que se conectan los cables coaxiales (dos canales por módulo). En los ensayos se utilizan sólo los 3 módulos ASIPP (6 canales en total).

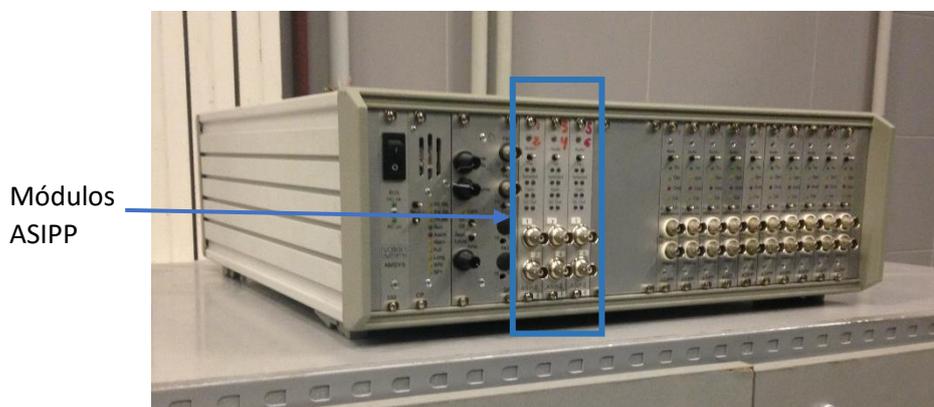


Figura 5.11. Equipo de adquisición de Emisión Acústica.

- Ordenador con el software *Vallen System*: Las señales de EA se deben poder mostrar en una pantalla para su análisis y extracción de parámetros característicos. Básicamente cualquier portátil es válido siempre que tenga instalado el software *Vallen Systeme*. El ordenador utilizado en los ensayos fue el portátil *Toshiba Harman Kardon* que se muestra en la Figura 5.12.

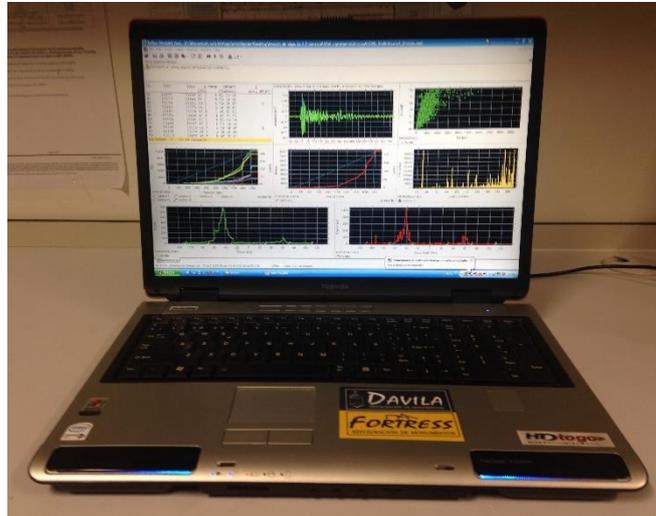


Figura 5.12. Portátil utilizado en los ensayos de EA.

#### CARGA Y DESPLAZAMIENTO

- Máquina de ensayos: La máquina en la que se realizaron los ensayos fue de la marca SERVOSIS S.L., modelo CH4-ST-100, la cual se muestra en la Figura 5.13. Se trata de un pórtico con un pistón central con movimiento vertical y dos apoyos que pueden moverse horizontalmente. El software asociado a la máquina fue *Catmaneasy 4.1* de la marca HBM.



Figura 5.13. Máquina de ensayos modelo CH4-ST-100.

- Galgas extensiométricas: Además de registrar los datos de carga y desplazamiento mediante la prensa citada anteriormente, se instalaron 12 galgas extensiométricas, tal y como se observa en la Figura 5.14, con una dimensión de 8 mm de ancho, 18 mm de largo y con una dimensión de la rejilla de 5 mm de ancho y 10 mm de largo [8].

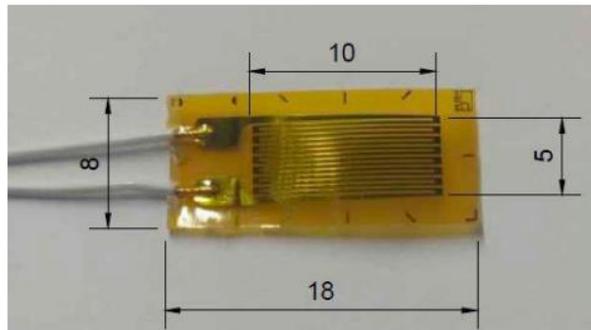


Figura 5.14. Galga extensiométrica. Cotas en mm.

- LVDT: El transformador diferencial variable lineal o LVDT es un dispositivo para medir la posición que provee un voltaje de salida de corriente alterna proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos [9]. En los ensayos se utilizaron 3 LVDTs para medir el desplazamiento vertical de la viga, el desplazamiento se midió en milímetros. Uno de los LVDTs mide una longitud máxima de 200 mm (colocado en el centro de la viga) y los otros dos una longitud máxima de 100 mm. Ambos tipos son de la marca HBM. El equipo de registro de los LVDTs fue un MX 840 B de la marca HBM (Figura 5.15).

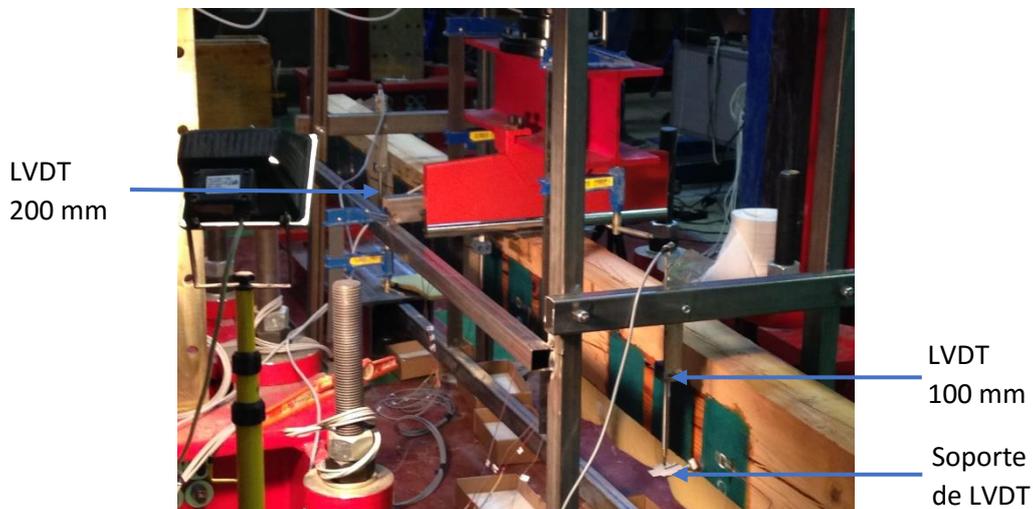


Figura 5.15. Disposición de los LVDTs.

---

## 5.4. RESULTADOS

### SR1

La viga sin refuerzo SR1 llegó a una carga de rotura de 2,11 t. Se muestra en la Figura 5.16 una comparación del número acumulado de eventos localizados de EA registrados por el equipo de EA junto con la carga aplicada a la viga referida en tanto por ciento a la carga de rotura. Se puede observar que la carga (línea azul) aumentó linealmente, pues su pendiente permaneció prácticamente constante hasta la rotura. En cuanto al número de eventos de EA localizados (línea roja) se aprecia como la pendiente de la curva fue aumentando progresivamente. Según este resultado se decidió analizar los datos en tramos de carga aplicada, eligiendo éstos en función de los puntos de inflexión de la curva de eventos de EA (línea roja). En la Figura 5.17 se muestran los *hits* en cada canal de EA. En el caso de esta viga, los tramos considerados fueron:

- **Tramo 1:** 0 - 8,9%.
- **Tramo 2:** 8,9 - 58%.
- **Tramo 3:** 58 - 89%.
- **Tramo 4:** 89 - 95%.
- **Tramo 5:** 95 - 100%.

El **Tramo 1** corresponde al periodo de silencio acústico, es decir, desde el inicio de la carga hasta que se registra la primera señal de EA, en este caso a los 200 kg de carga. El efecto Kaiser por el cual ciertos materiales como la madera, sometidos a un esfuerzo, no presentan emisión acústica hasta que no se supera la carga máxima a los que fueron sometidos anteriormente, indicaría que la viga SR1 soportó una carga de 200 kg aproximadamente durante su vida útil. Aunque no se conoce con exactitud la carga de trabajo que soportó, la empresa *Dávila Restauración de Monumentos S.L.* corroboró que esa pudo ser la carga a la que estuvo sometida la viga aproximadamente.

Si se observan las Figuras 5.16 y 5.17 se puede apreciar un claro aumento de los eventos y *hits* de EA a partir del 58% de la carga de rotura, lo que equivale a 1200 kg (comienzo del **Tramo 3**). Cabe destacar que justo en ese instante se aprecia un pequeño escalón en el que la carga se mantuvo constante, es decir, se debió producir una deformación alta.

Cuando la carga alcanzó los 1100 kg (89% de la carga de rotura) se produjo un aumento en la pendiente de eventos y *hits* registrados por los canales 1 y 3. Este cambio de pendiente se mantuvo constante hasta una carga de 2070 kg (95% de la carga de rotura) donde el canal 1 empezó a registrar mayor número de *hits* que el resto de canales. De 89 - 95% se definió el **Tramo 4**.

Por último, se definió el **Tramo 5**, desde 2017 kg hasta la carga de rotura final de la viga (2110 kg), no apreciándose cambios en la EA entre estos dos valores de carga.

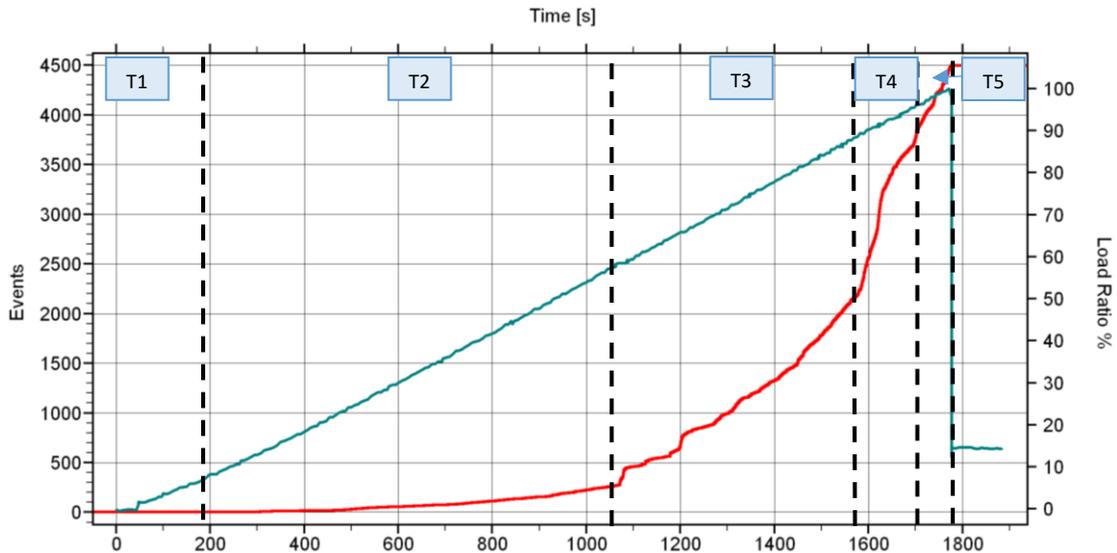


Figura 5.16. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga SR1.

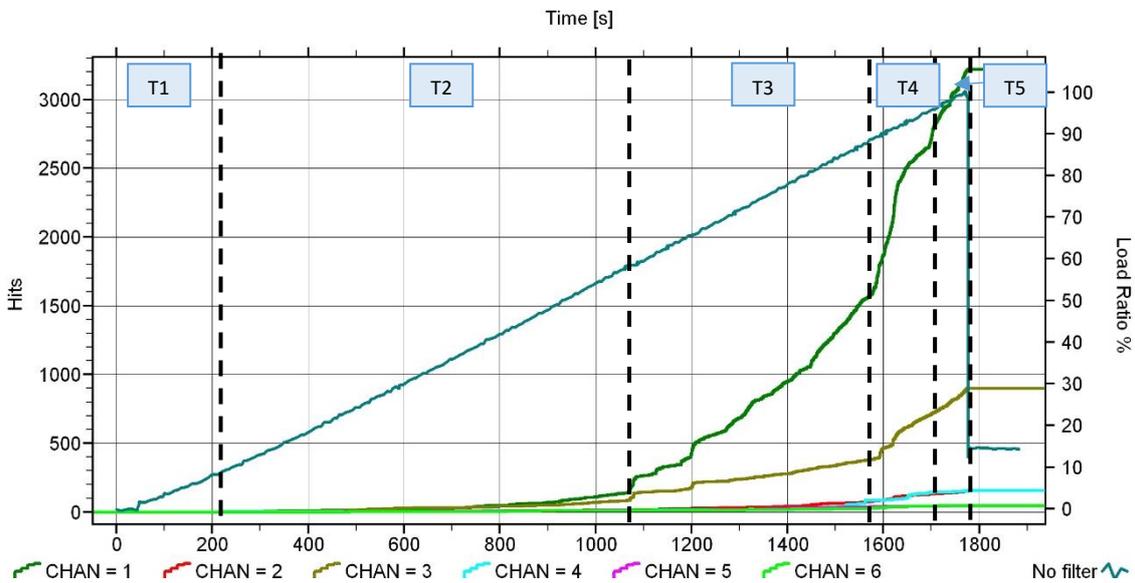


Figura 5.17. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: Hits por canal de EA frente al tiempo. Viga SR1.

Mediante el software de localización del programa *VisualAE* de *Vallen Systeme* y usando la velocidad obtenida en el Apartado 4.2, se realizó una localización de las fuentes de EA generadas durante el ensayo. Las Figuras 5.18 y 5.19 muestran la localización de eventos y energía de EA. Los resultados de las dos gráficas no tienen necesariamente que coincidir, puesto que se pueden producir un gran número de eventos de baja energía en una zona o pocos eventos de gran energía en otra. No obstante lo más habitual es que se asemejen en cierta medida, tal y como ocurre en este caso.

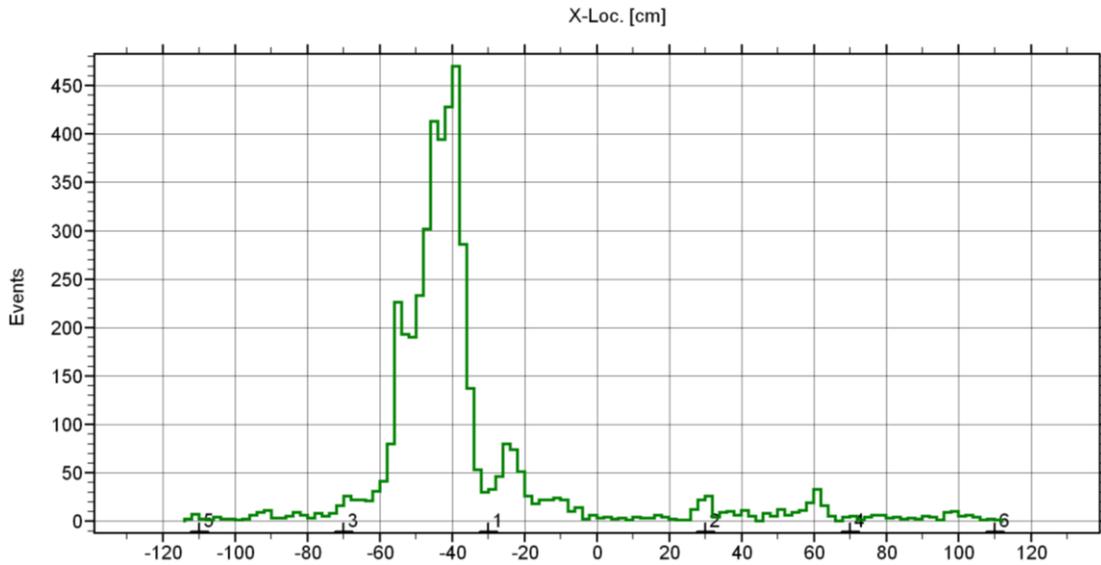


Figura 5.18. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga SR1.

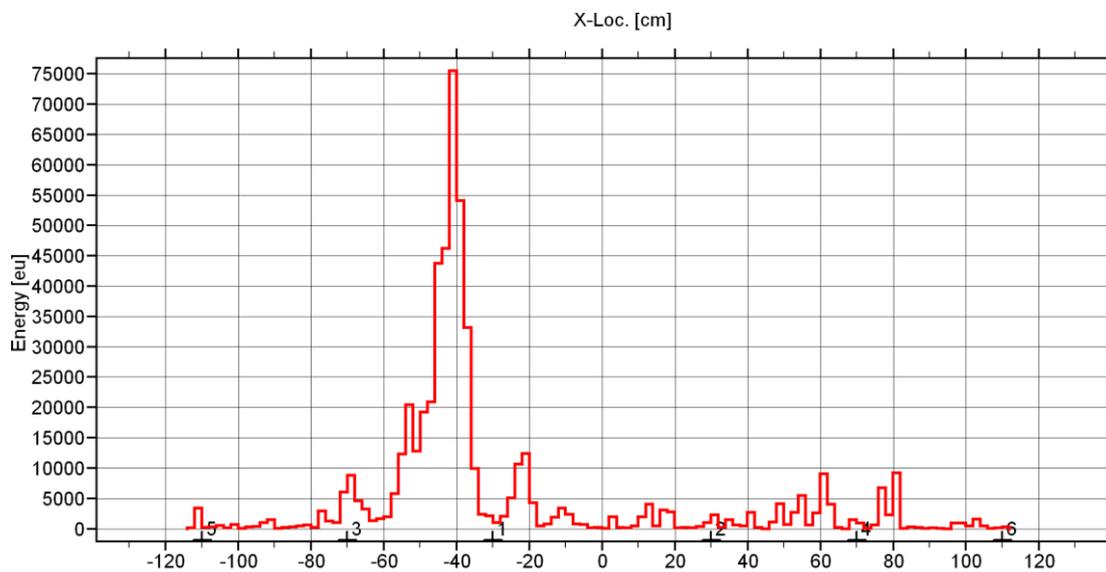


Figura 5.19. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga SR1.

Las gráficas de la Figuras 5.18 y 5.19 muestran una clara concentración de eventos y energía en la zona [-60, -30] cm teniendo un pico máximo alrededor de -40 cm. Se pueden apreciar otras zonas de concentraciones entre los puntos -30 y -20 cm de menor relevancia. En la parte derecha de la viga las concentraciones se encontraron muy distribuidas aunque se pueden destacar los puntos 60 y 80 cm. Se aporta en la Figura 5.20 un esquema de los daños observados en la cara C de la viga SR1 tras acabar el ensayo. No se muestran el resto de caras por no contener daños significativos. La viga rompió debido a una grieta que comenzó en el punto 63 cm y acabó en -60 cm, siendo este último el punto por el cual finalmente se produjo la rotura final. Este resultado coincide en gran medida con la localización de eventos y energía de EA (de -60 a -40 cm y en el punto 60 cm).

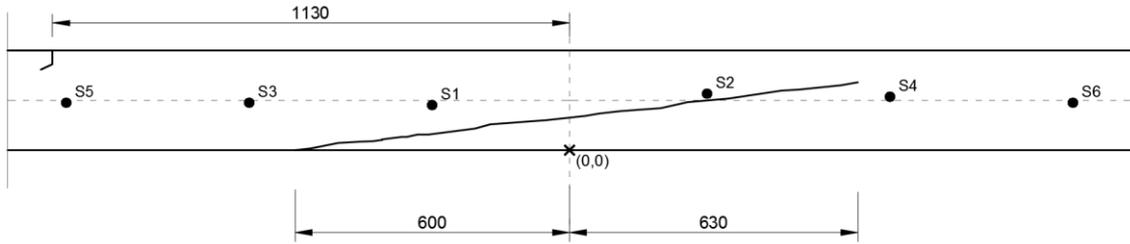
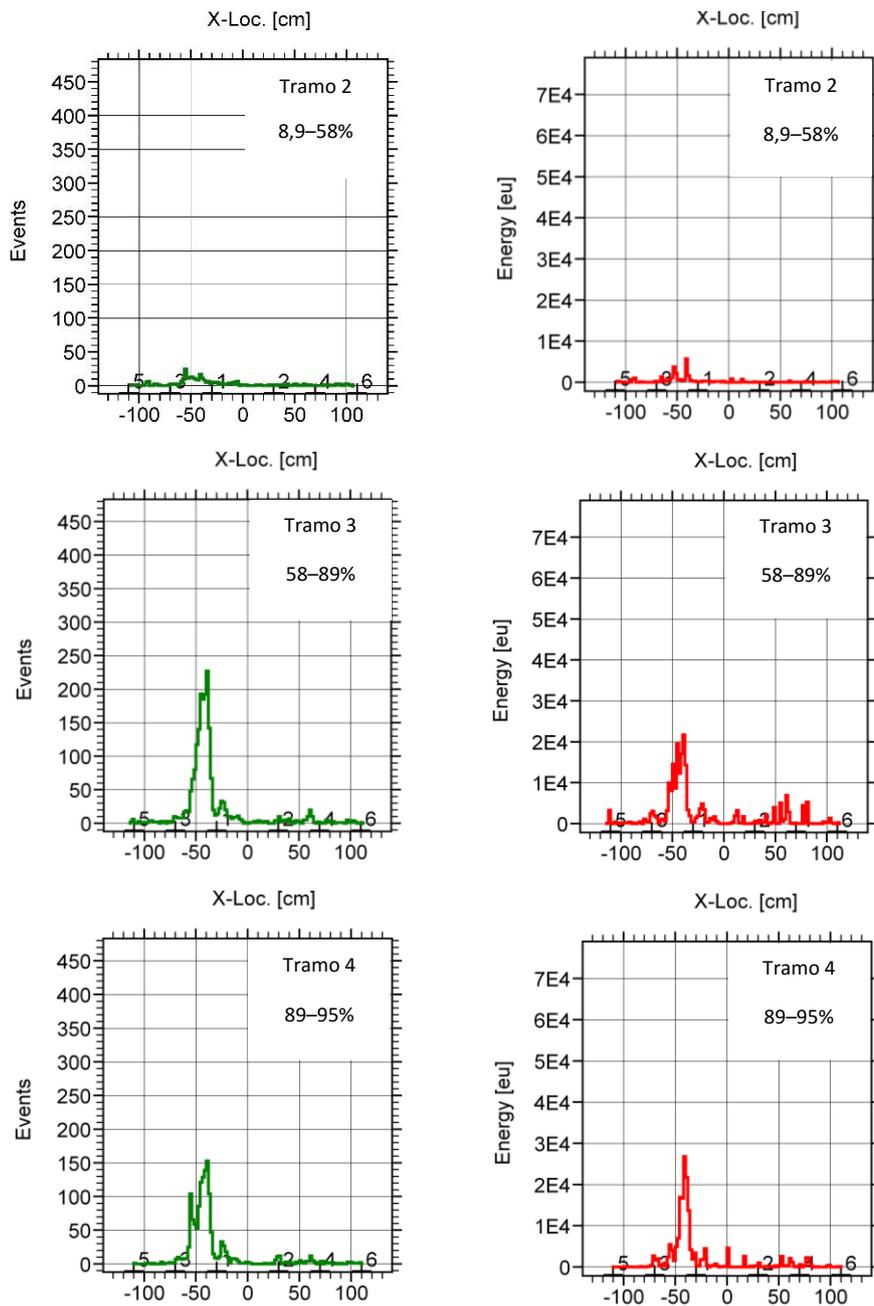


Figura 5.20. Esquema de daños en la cara C de la viga SR1. Cotas en mm.

Las Figuras 5.18 y 5.19 sólo muestran la localización acumulada hasta el final del ensayo. De mayor utilidad son las gráficas contenidas en la Figura 5.21, en la cual se muestra la misma localización dividida en los tramos de carga antes citados. El primer tramo es siempre el periodo de carga sin emisión acústica y, por tanto, no tiene interés.



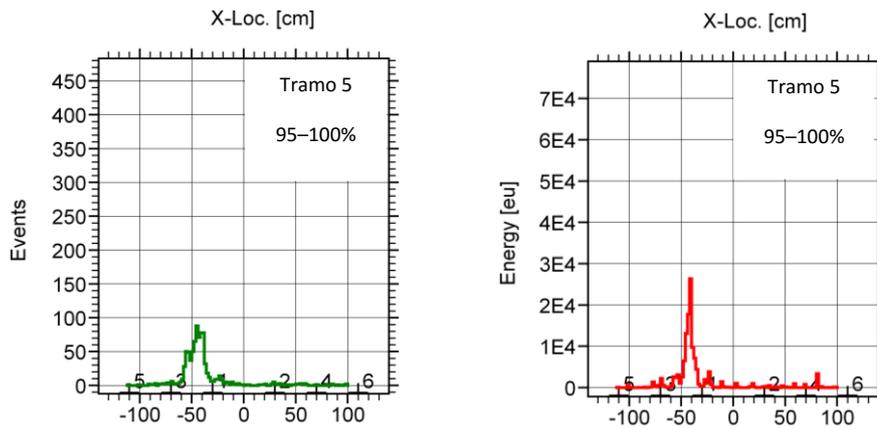
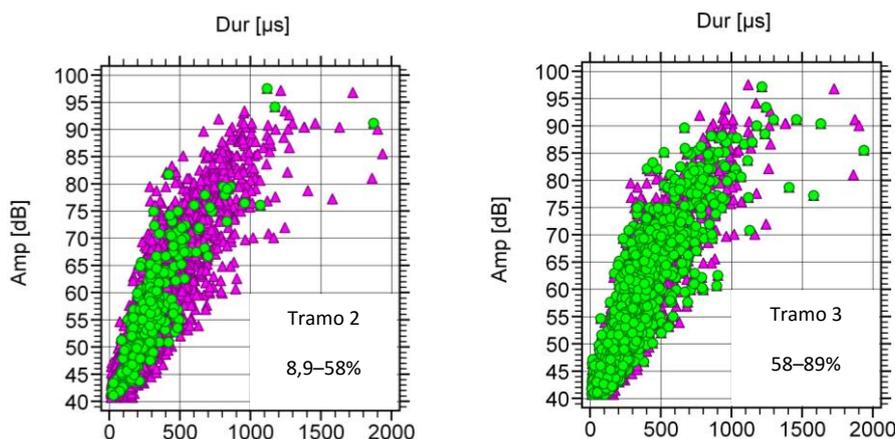


Figura 5.21. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga SR1. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.

Se puede apreciar como la zona de máxima localización [-40, -60] cm (donde se generó la grieta en la viga) y el punto 60 cm (donde se inició la grieta) apareció desde el inicio de la carga [8,9 - 58%] aunque se muestra con más claridad a partir del 58% de la carga aplicada. Es decir, la EA predijo la zona de rotura con bastante antelación.

Como se comentó en el Apartado 2.3, la duración resulta, junto con la amplitud, un parámetro de clasificación de mecanismos muy importante y un excelente identificador de señales no deseadas. Se representa en la Figura 5.22 la amplitud frente a la duración de los *hits* registrados en cada tramo de carga (verde) comparados con los obtenidos durante todo el ensayo (violeta). Se aprecia, en consonancia con la Figura 5.21, que el mayor número de *hits* se registró en el **Tramo 3**. Se observa también en el **Tramo 2** (8,9 – 58%) que la concentración de *hits* fue de menor amplitud y duración que en el resto de tramos. No se identificaron, además, *hits* provocados por ruido indeseado (larga duración), por lo que el filtrado utilizado en este aspecto se consideró correcto y no fue necesario aplicar otro filtro de ruido.



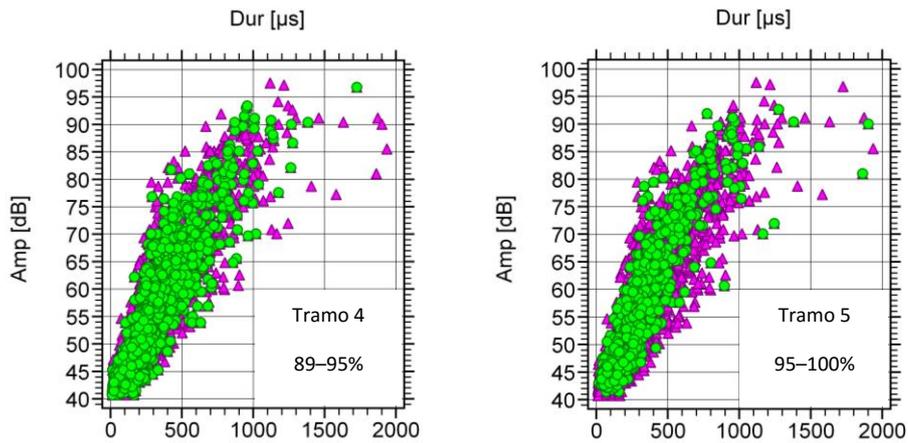


Figura 5.22. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: *Hits* en cada tramo de carga. Violeta: *Hits* de todo el ensayo. Viga SR1.

## SR2

La viga sin refuerzo SR2 resistió menos que la anterior viga sin refuerzo, ya que en este caso rompió a una carga de 1,77 toneladas. Se muestra en la Figura 5.23 una comparación del número acumulado de eventos localizados de EA registrados por el equipo, así como la carga aplicada a la viga (*Load Ratio*). En el caso de esta viga, los tramos definidos fueron:

- Tramo 1: 0 – 5%.
- Tramo 2: 5 – 50%.
- Tramos 3: 50 – 89%.
- Tramo 4: 89 – 98%.
- Tramo 5: 98 – 100%.

Cabe destacar la similitud entre los tramos definidos en esta viga y los de la viga anterior (0 – 8,9 – 58 – 89 – 95 - 100%) siendo, prácticamente, iguales.

Como ya se comentó en la viga anterior, el **Tramo 1** corresponde al periodo de carga sin registro de EA; en este caso hasta el 5% de la carga de rotura (100 kg).

El **Tramo 2** está comprendido entre el 5% y el 50% (885 kg) de la carga de rotura. Se aprecia como la línea de eventos de EA creció de manera constante hasta ese punto en el cual el canal 2 empezó a registrar un mayor número de *hits* que el resto de canales (Figura 5.23 y 5.24).

El **Tramo 3** [50 - 89%] transcurrió sin un gran aumento en el número de eventos y *hits* de EA registrados hasta la carga de 1600 kg, en la cual se produjo un aumento significativo en todos los canales, aunque se aprecia con mayor claridad en los canales 1, 2 y 3 (Figura 5.24).

El **Tramo 4** se definió hasta la carga 1700 kg (98% de la carga de rotura) por un aumento significativo de señales de EA hasta la carga de rotura registradas por el canal 2, anunciando con toda probabilidad el fallo definitivo próximo a ese canal (Figura 5.23). Conviene resaltar como el canal 2 registró mayor número de *hits* desde el comienzo del **Tramo 3**, anunciando desde el 50% de la carga el fallo final cercano a esa zona.

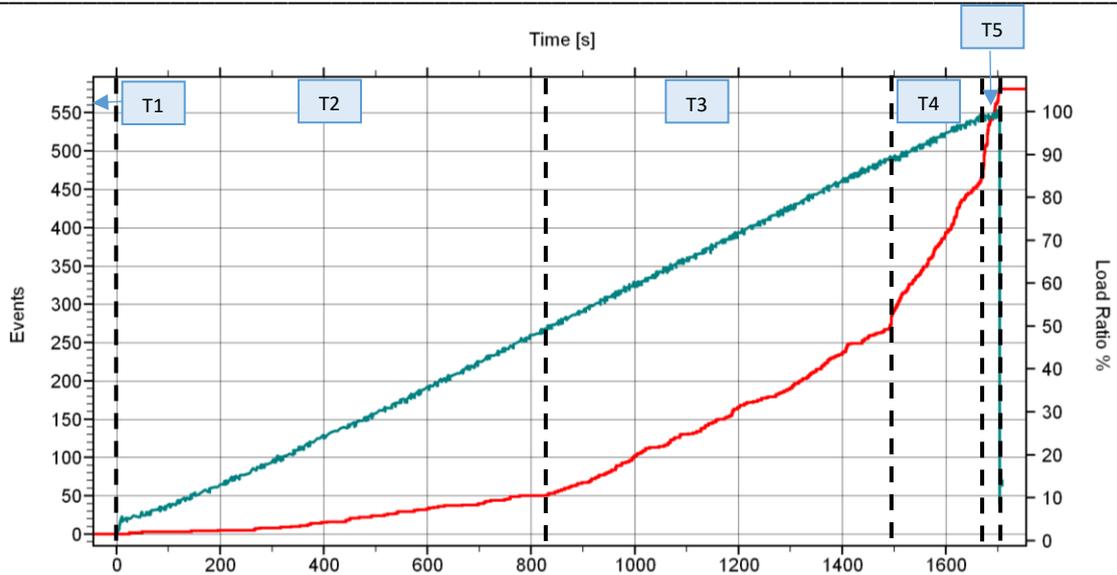


Figura 5.23. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga SR1.

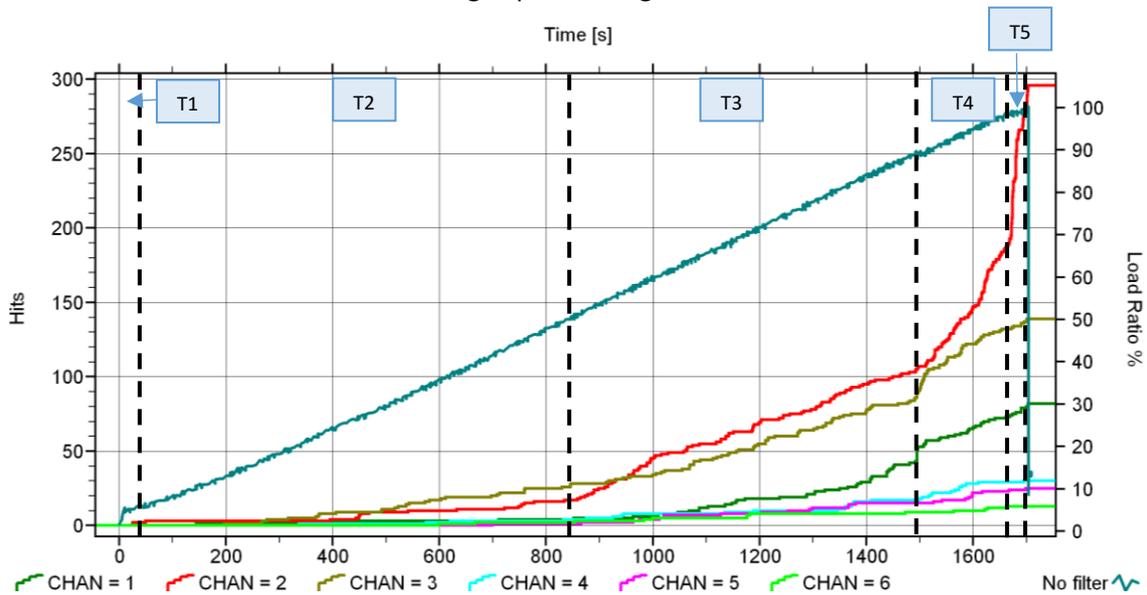


Figura 5.24. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: Hits por canal de EA frente al tiempo. Viga SR2.

Las Figuras 5.25 y 5.26 muestran los resultados de localización de fuentes de EA.

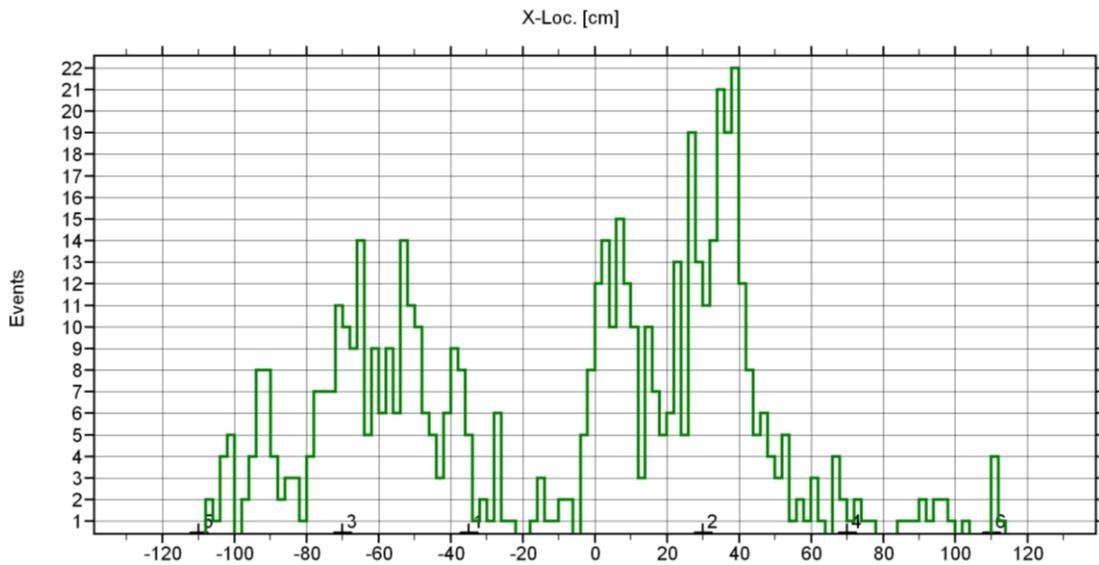


Figura 5.25. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga SR2.

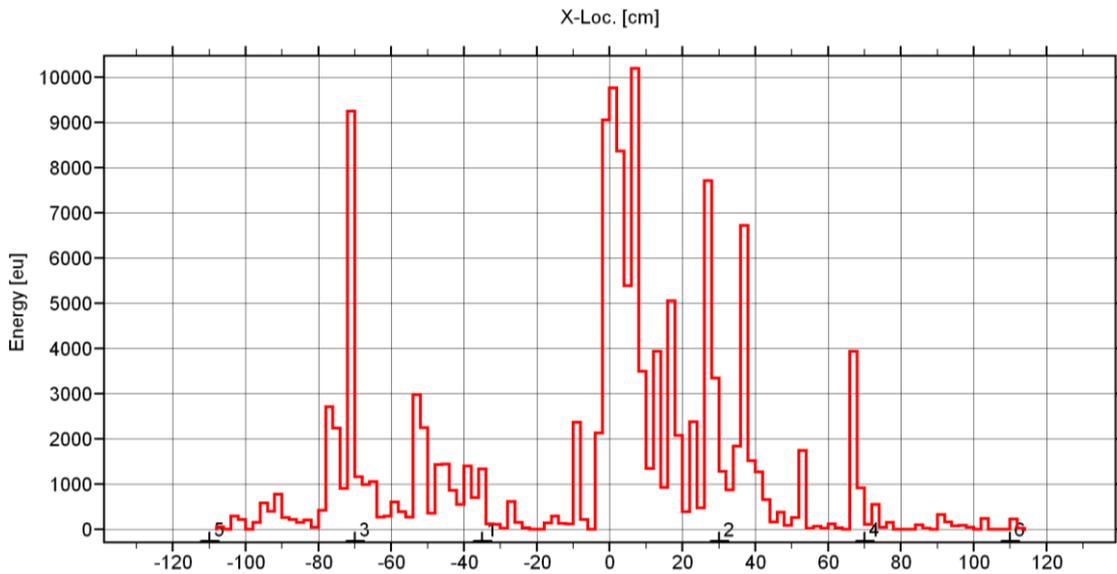


Figura 5.26. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga SR2.

Aunque se observa en las Figuras 5.25 que los eventos de EA se encontraron muy distribuidos a lo largo de la viga, la Figura 5.26 sí muestra una zona de mayor energía en el punto -70 cm. Se aprecia en la parte derecha de la viga un gran número de eventos en la zona [0, 20] y [20, 40] cm coincidiendo, aproximadamente, con la concentración de energía alrededor de los puntos 4 y 30 cm. Se observa, además, concentración de energía en el punto 70 cm.

Se aporta en la Figura 5.27 el esquema de daños de la viga SR2 al finalizar el ensayo. Se puede apreciar que la zona principal de rotura fue una grieta cuya longitud está comprendida en el tramo [-29, 10] cm en la cara C de la viga. Se observa en la otra cara lateral de la viga (D) una grieta similar de [-32, 24] cm. Ambas grietas tuvieron su origen en dos nudos situados alrededor de -5 cm.

Estas dos grietas se unieron en la cara inferior (B) de la viga en una mayor grieta longitudinal que recorrió la cara de [-97, 31] cm aproximadamente.

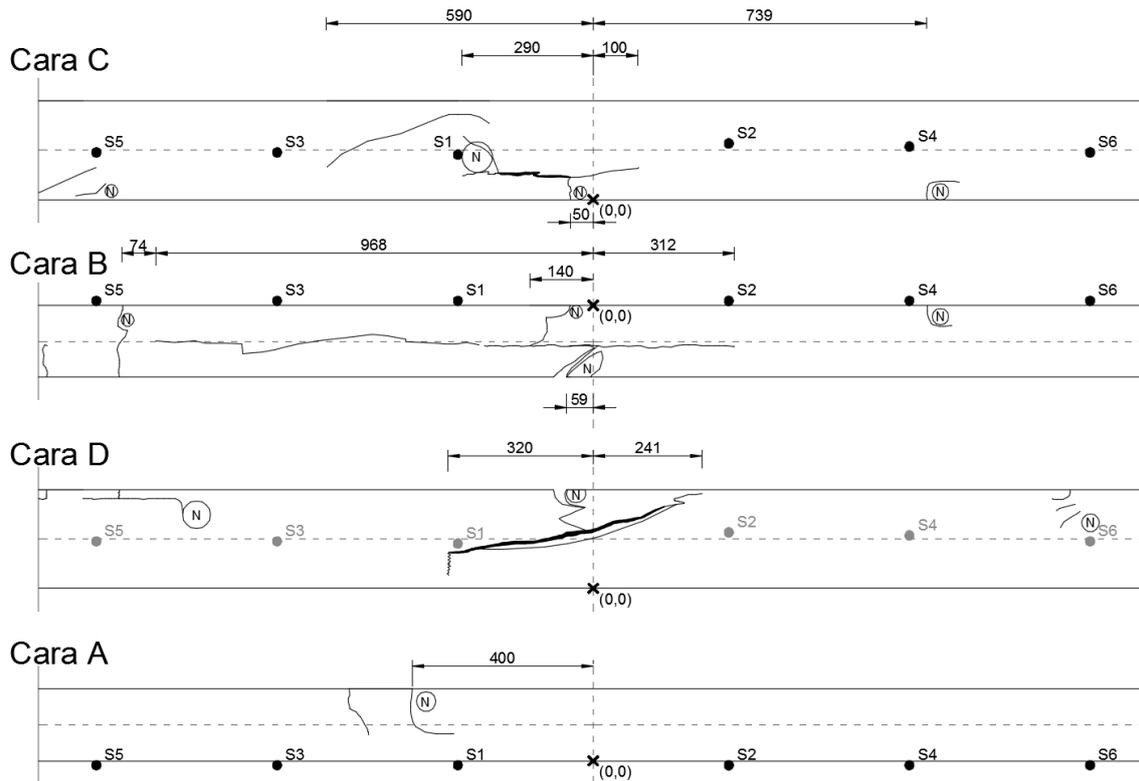


Figura 5.27. Esquema de daños de la viga SR2. Cotas en mm.

A priori, aunque la localización no parece muy precisa, es válida. La mayor concentración de energía y eventos en la parte derecha de la viga se situó de [0, 40] cm coincidiendo, aproximadamente, con el final de la grieta que provocó la rotura. Además, la mayor concentración de energía tuvo lugar en el centro de la viga, zona en la cual se originaron las grietas provenientes de los nudos.

Por otro lado se aprecia la apertura de una grieta en un nudo situado a 74 cm del centro, lo cual explica la concentración de energía alrededor del punto 70 cm.

Parece ilógico, en principio, que la zona de [-30, 0] cm estuviese exenta de concentraciones de eventos y energía, pues las grietas principales de rotura comenzaron alrededor de -30 cm y avanzaron hacia zona derecha de viga. Esto tiene fácil explicación si se observa la gráfica de la atenuación de la viga SR2 en la Figura 3.7 del Apartado 3.2. Como ya se comentó el nudo situado a -30 cm influye enormemente en la atenuación de la viga en esta zona ( $24 dB_{AE}$  en 20 cm). Este nudo ha provocado la disminución en el registro de *hits* con amplitudes bajas pues la atenuación provoca que la señal no cruce el umbral de detección del sensor 1. En resumen, parece lógica la poca concentración de eventos y energía en la zona de [-30, 0] cm.

En relación a esto, cabe destacar que si el software *Vallen Systeme* tiene la posibilidad, no realiza la localización solo con dos sensores sino que utiliza más y ofrece el resultado más óptimo de todos ellos. Por tanto, siempre que el software haya utilizado más de dos sensores para la localización lineal de un evento puede determinar la incertidumbre de éste, es decir, establece un parámetro con el que conocer si algunos eventos han sido localizados de una manera más o

menos precisa. La incertidumbre o LUCY se calcula mediante la Ecuación 5.1 que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 dt_i &= t_i - t_1, \\
 D_i &= dt_i * v, \\
 P_i &= R_i - R_1 = (\text{dist}(S_i - \text{fuente}) - (\text{dist}(S_1 - \text{fuente}))), \\
 LUCY &= \sqrt{\frac{\sum(D_i - P_i)^2}{n-1}}, \tag{5.1}
 \end{aligned}$$

siendo  $t_i$  el tiempo de llegada del *hit* al  $S_i$  (sensor  $i$ ) y  $t_1$  el tiempo de llegada del primer *hit* al  $S_1$  (sensor 1 o de primera llegada);  $v$  es la velocidad de propagación de la onda y  $n$  el número de sensores utilizados para la localización. El resultado del LUCY se da en cm.

En la Figura 5.28 y 5.29 se representan los eventos y la energía de EA con LUCY mayor que 20 cm, considerándose muy imprecisos. Como cabía de esperar, los eventos localizados de manera más imprecisa fueron los situados de  $[-20, 0]$  cm, lo que confirma la inexactitud de los eventos y energía de EA cercanos al nudo del punto -30 cm.

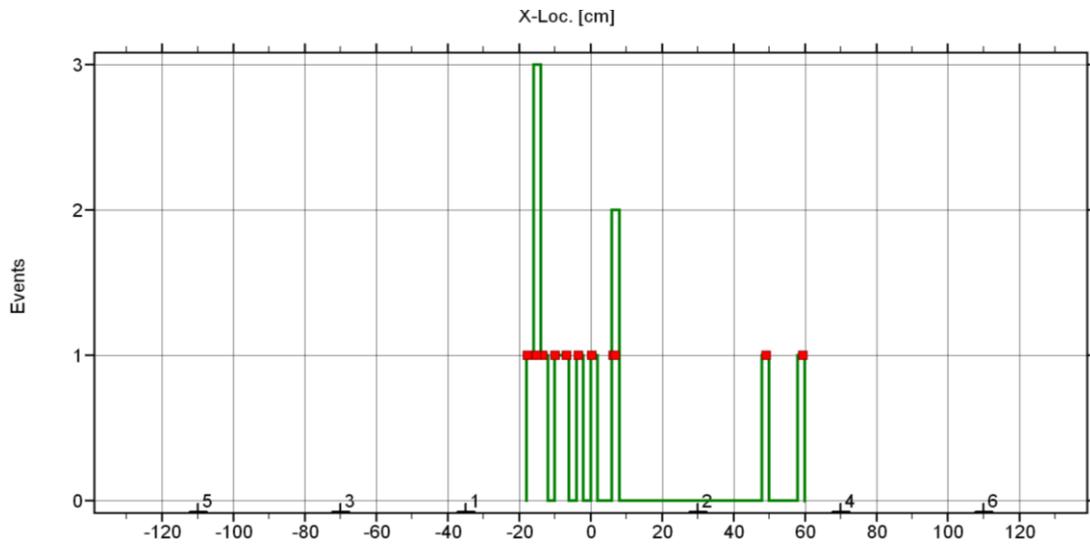


Figura 5.28. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Rojo: Eventos localizados de EA en correlación. Verde: Eventos localizados de EA en distribución. Sólo eventos con LUCY mayor que 20 cm. Viga SR2.

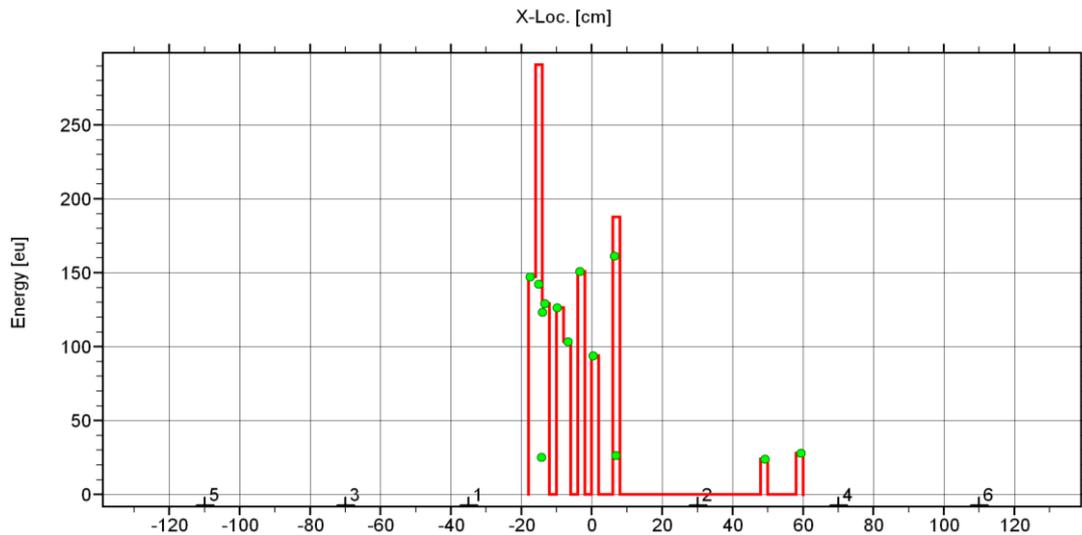


Figura 5.29. Energía respecto al eje de la viga. Verde: Eventos localizados de EA en correlación. Rojo: Energía localizada y de EA en distribución. Sólo eventos con LUCY mayor que 20 cm. Viga SR2.

Además de lo ya comentado, cabe destacar que la grieta de la cara C existía antes de realizar el ensayo, produciéndose un crecimiento en su ancho pero muy poco en su longitud, por lo cual la poca EA registrada en la zona  $[-30, 0]$  cm (longitud de la grieta) tiene explicación, sabiendo que la EA generada por una grieta existente es menor que la producida por la abertura de una nueva grieta.

Se muestra en la Figura 5.30 la evolución de los eventos y energía de EA por los tramos de carga ya comentados anteriormente.

En el **Tramo 2** (cuando comienza la EA) sólo se observa un ligero crecimiento de los eventos alrededor del punto  $-60$  cm que correspondió con toda probabilidad a la apertura de la grieta situada entre el sensor 3 y 1 en la cara C.

En el **Tramo 3** (de 50-89% de la carga de rotura) creció la energía y los eventos de EA alrededor del punto  $30$  cm (final de la grieta en la cara inferior B). Se vuelve a observar crecimiento de eventos y energía entre los sensores 3 y 1 (grieta de la cara C) y entre los sensores 5 y 3 donde se situaron fisuras y nudos generadores de ruido pero sin relevancia en la rotura de la viga.

En el **Tramo 4** (de 89-98% de la carga de rotura) se pueden destacar los eventos producidos en el mismo punto anterior ( $30$  cm) y el crecimiento de energía entre  $[-5, 20]$  cm (grietas y nudos en las caras C y A que provocaron la rotura final de la viga). Esto anunció su rotura final a  $885$  kg antes de la carga máxima ( $1770$  kg). Además de un gran crecimiento de energía en el punto  $-75$  cm provocado probablemente por una apertura súbita de la fisura o nudo próximos a esa distancia en la cara B ya comentados.

En el **Tramo 5** (de 98-100% de la carga de rotura) se constata la concentración de eventos y energía entre  $[-5, 30]$  cm.

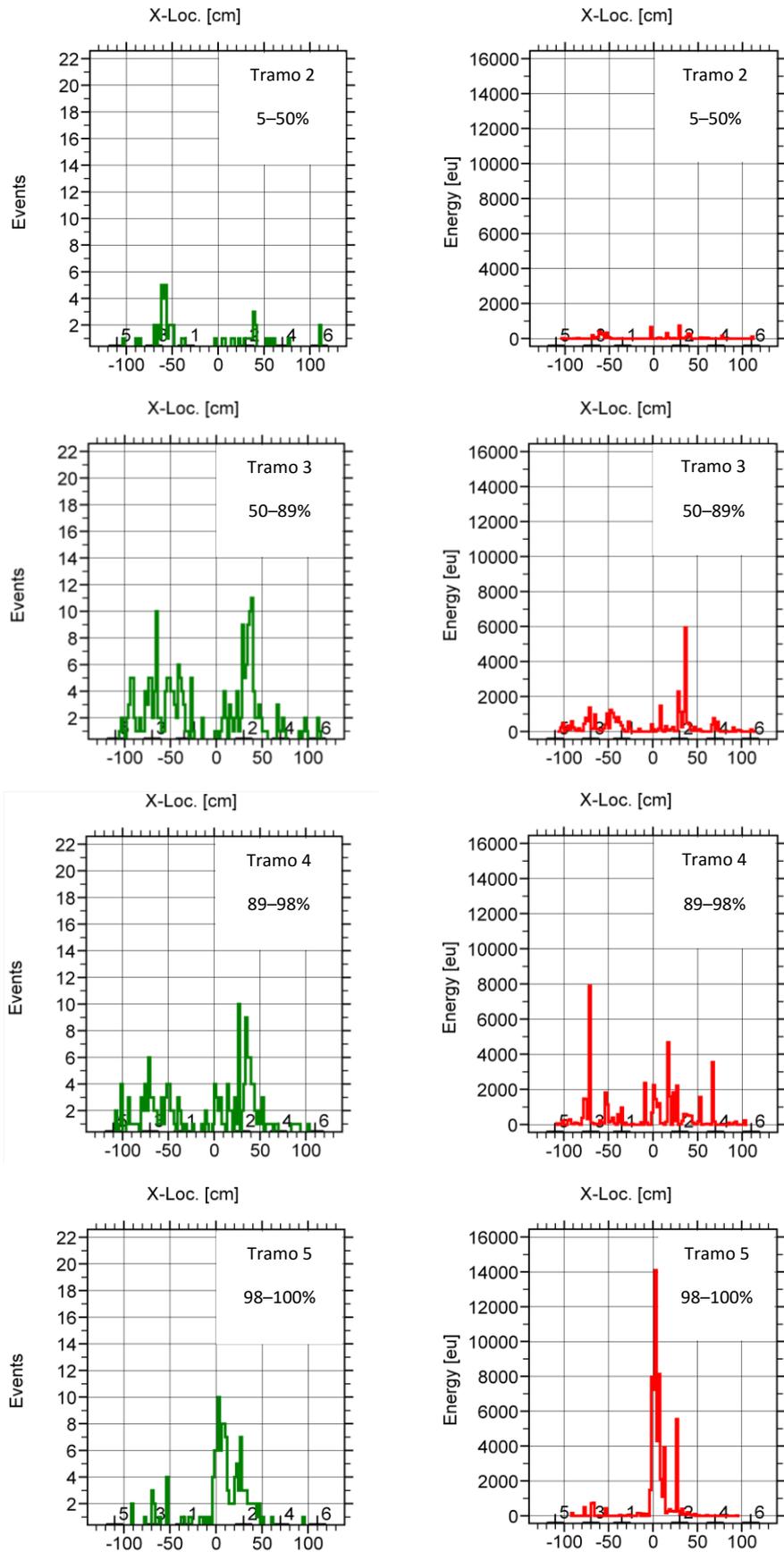


Figura 5.30. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga SR2. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.

Se representa en la Figura 5.31 la amplitud frente a la duración de los *hits* registrados en cada tramo de carga (verde) comparados con los obtenidos durante todo el ensayo (violeta). Se observa, al igual que ocurría en la viga SR1, que el mayor número de *hits* se registraron en el **Tramo 3**. Se aprecia también que en el **Tramo 2** (5 – 50%) la concentración de *hits* fue de menor amplitud y duración que en el resto de tramos. No se identifican, además, *hits* provocados por ruido indeseado (larga duración), por lo que el filtrado utilizado en este aspecto se consideró correcto y no fue necesario aplicar otro filtro de ruido.

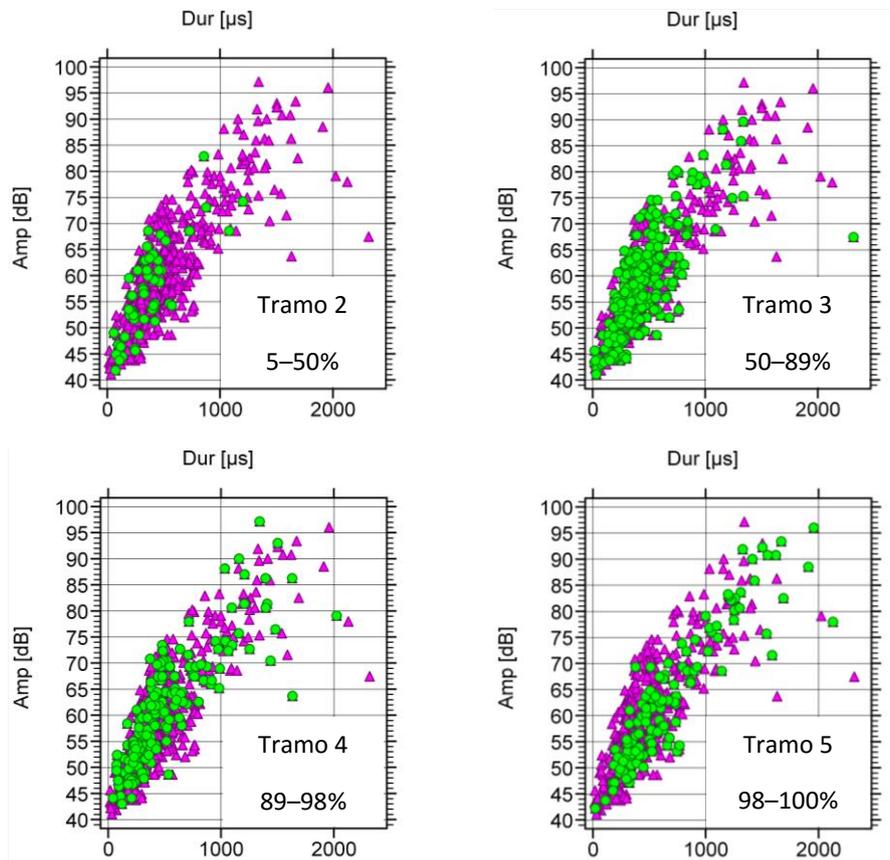


Figura 5.31. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: *Hits* en cada tramo de carga. Violeta: *Hits* de todo el ensayo. Viga SR2.

### LRS1

La viga con refuerzo laminado LRS1 resistió una carga mucho mayor que las vigas sin refuerzo; en este caso, llegó a una carga de 6,21 toneladas. Se muestra en la Figura 5.32 una comparación del número acumulado de eventos localizados de EA registrados por el equipo y la carga aplicada a la viga (*Load Ratio*). En este caso, a diferencia de las vigas anteriores, se puede observar como la pendiente de la curva de carga disminuyó en los últimos tramos de carga, evidenciando una mayor deformación a altas cargas. El número de eventos de EA acumulados (línea roja) fue en aumento conforme se aproximó a la carga de rotura de la viga. En el caso de esta viga, los tramos definidos fueron:

- **Tramo 1:** 0 – 3%.
- **Tramo 2:** 3 – 70,5%.
- **Tramo 3:** 70,5 – 90%.

- **Tramo 4:** 90 – 94,5%.
- **Tramo 5:** 94,5 – 98,7%.
- **Tramo 6:** 98,7 – 100%.
- **Tramo 7:** 100 – 99,4 %.

Como ya se comentó en la viga anterior, el **Tramo 1** corresponde al periodo de carga sin registro de EA, en este caso hasta el 3% de la carga máxima (186 kg).

El **Tramo 2** está comprendido entre el 3% y el 70,5% (4378 kg) de la carga máxima. Se aprecia como la línea de eventos de EA creció de manera constante hasta ese punto en el cual el canal 2, 4 y, en menor medida, 1 comenzaron a registrar un mayor crecimiento en el número de *hits* que el resto de canales (Figura 5.32 y 5.33).

En el **Tramo 3** (de 70,5 - 90% de la carga máxima), la línea de eventos y *hits* de EA registrados se mantuvo constante hasta la carga de 5868 kg, en la cual se produjo un aumento significativo en los canales 2 y 4 (Figura 5.33).

El **Tramo 4** se definió hasta la carga 5862 kg (94,4% de la carga máxima) por un aumento significativo de señales de EA en el canal 1 (Figura 5.33). Conviene resaltar que, aunque en el canal 3 no se observa un aumento significativo en el número de eventos, si se aprecia un gran aumento en la energía (Figura 5.34), por tanto, registró pocas señales pero muy energéticas.

Igualmente al **Tramo 4**, en el **Tramo 5** (de 94,4 – 98% de la carga máxima) fueron el canal 1 con un aumento significativo en los eventos y el canal 3 con un gran crecimiento de energía los que definieron el siguiente tramo a partir de 6087 kg de carga (98%).

El **Tramo 6** se definió desde el 98% hasta el 100 % de la carga máxima. Por definición este debería ser el último tramo. No obstante, la viga sufrió un escalón de deformación y la carga disminuyó, aunque en poca medida. En vista de que este escalón fue constante en los ensayos sobre las vigas con refuerzo y por considerarse relevante para la EA se decidió establecerlo como tramo independiente.

Por tanto, el **Tramo 7** está comprendido entre la bajada de carga y la rotura definitiva de la viga.

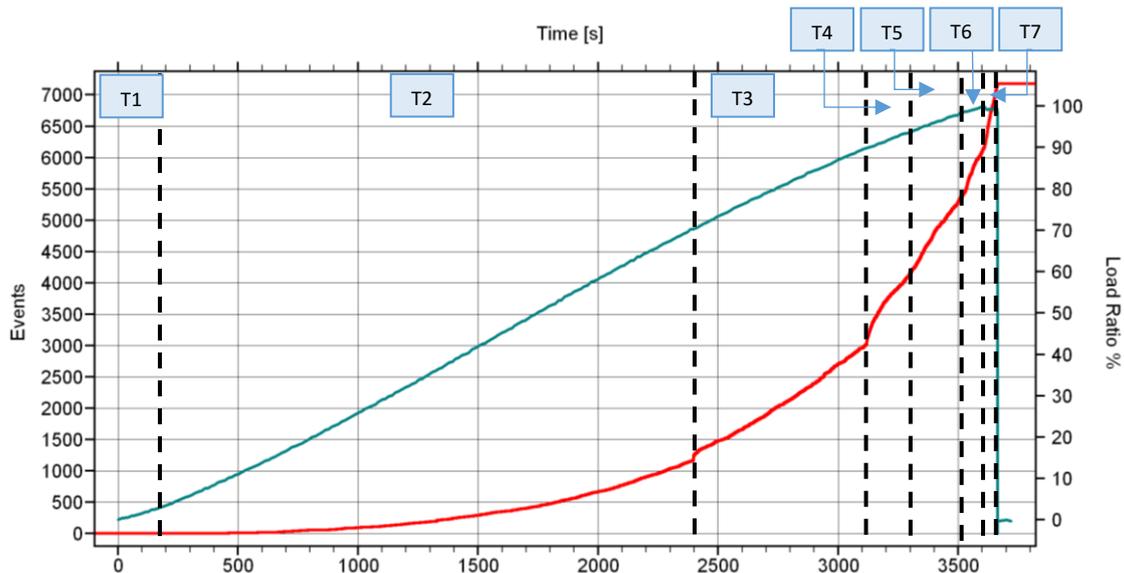


Figura 5.32 Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRS1.

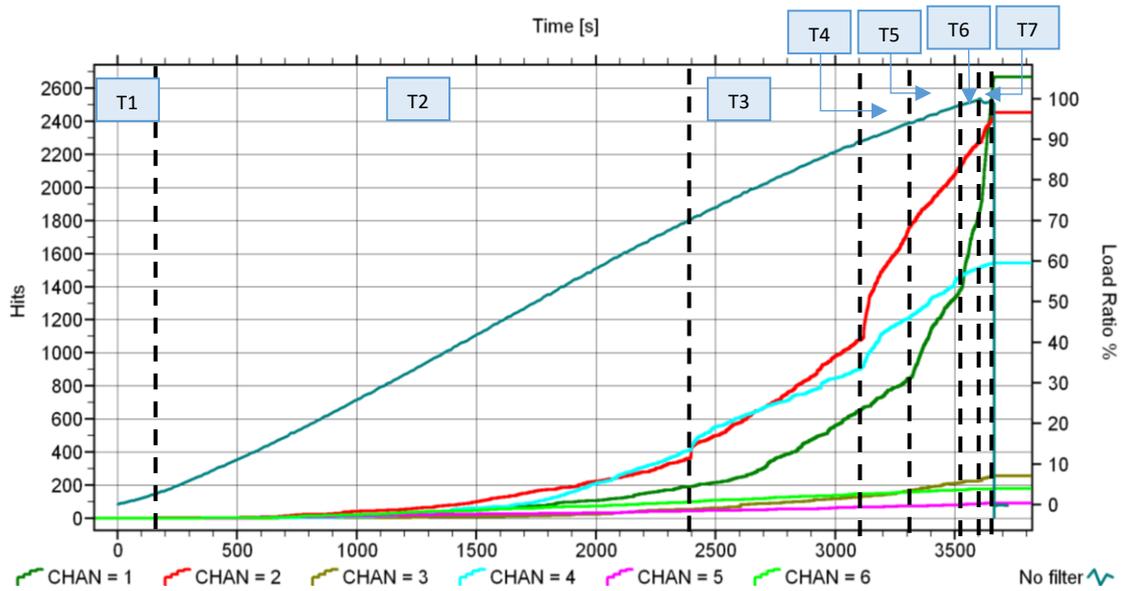


Figura 5.33. Azul: Carga aplicada referida en tanto por ciento frente al tiempo. Resto de colores: Hits por canal de EA frente al tiempo. Viga LRS1.

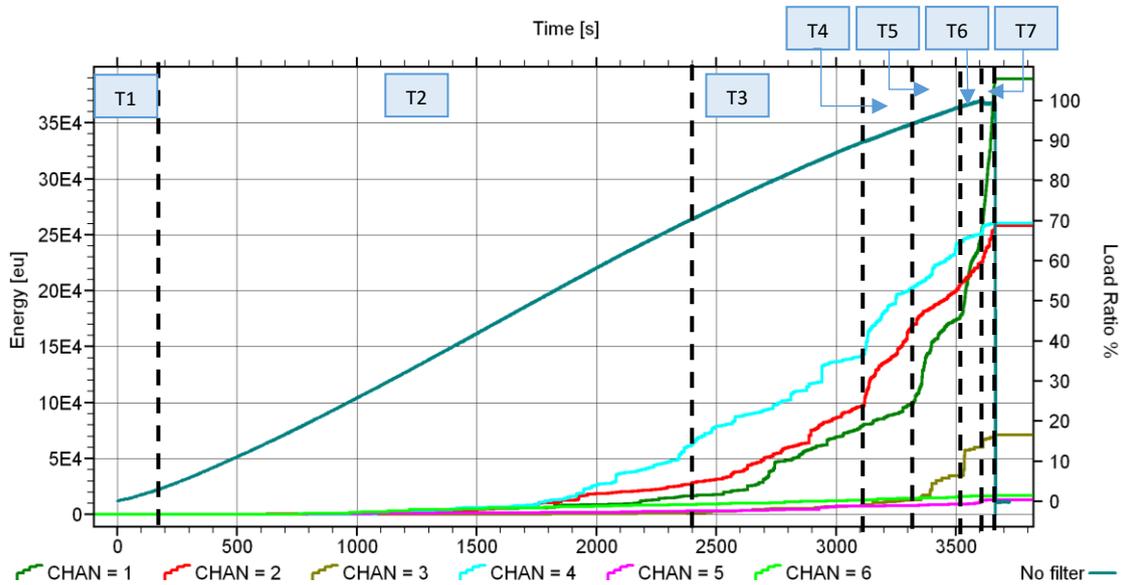


Figura 5.34. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: Hits por canal de EA frente al tiempo. Viga LRS1.

Se muestran en las Figuras 5.35 y 5.36 los resultados de localización de fuente de EA.

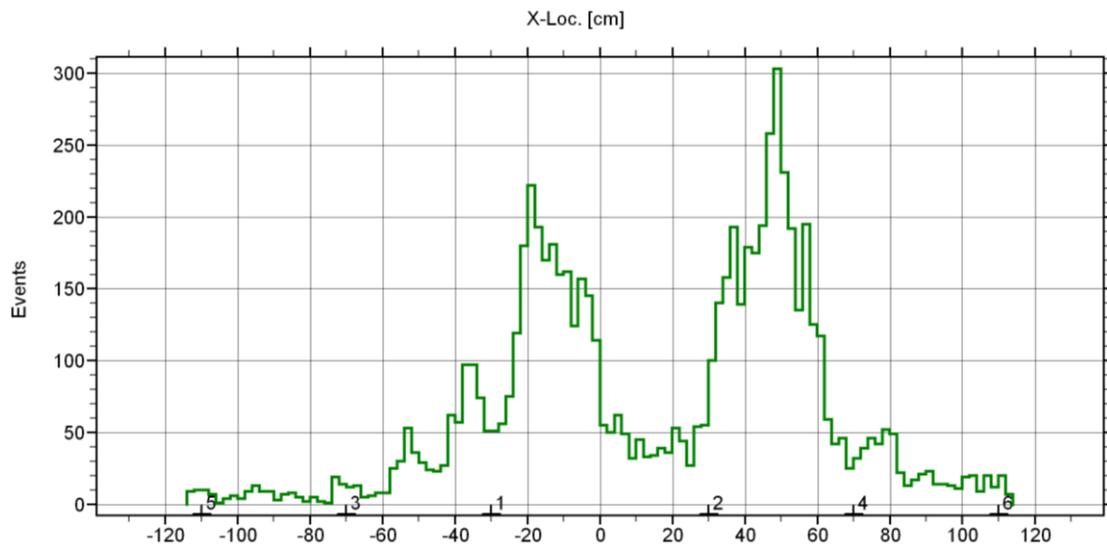


Figura 5.35. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRS1.

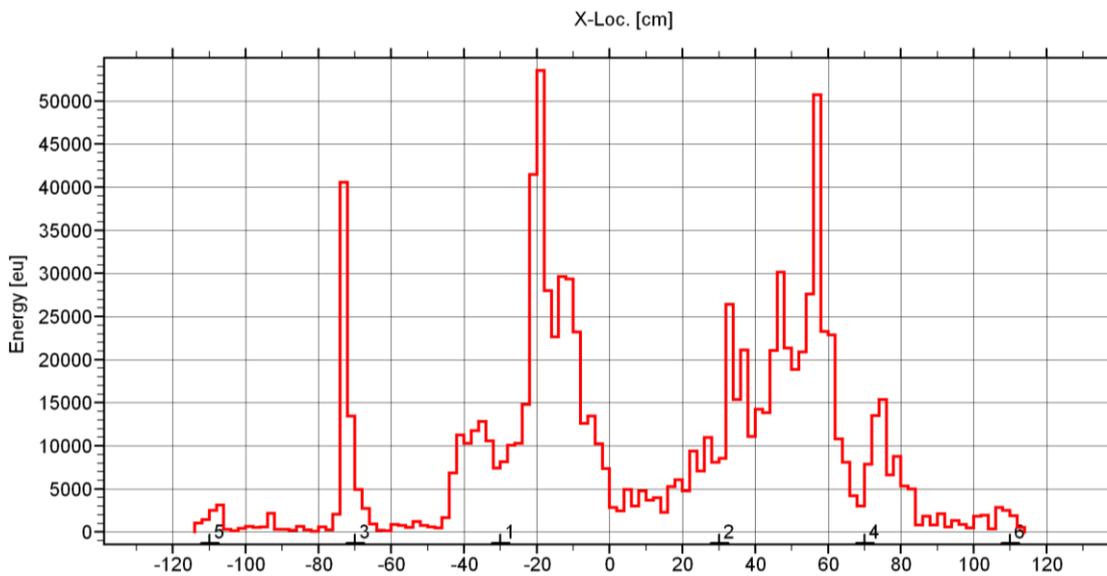


Figura 5.36. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRS1.

Se observa en las Figuras 5.35 y 5.36 dos zonas claramente identificables, en las cuales se aprecia un alto número de eventos con mucha energía en  $[-45, 0]$  cm y en  $[30, 60]$  cm, con pico entre 50 y 60 cm. Además, otra zona similar pero de menor escala se observa alrededor del punto 75 cm. Por último, como ya se comentó en la Figura 5.34, existe una zona de pocos eventos pero muy energéticos en el punto -70 cm.

Se aporta en la Figura 5.37 el esquema de daños de la viga LRS1 al finalizar el ensayo. Antes de analizar los daños, cabe destacar que, al romper, la viga quedó dividida en dos mitades.

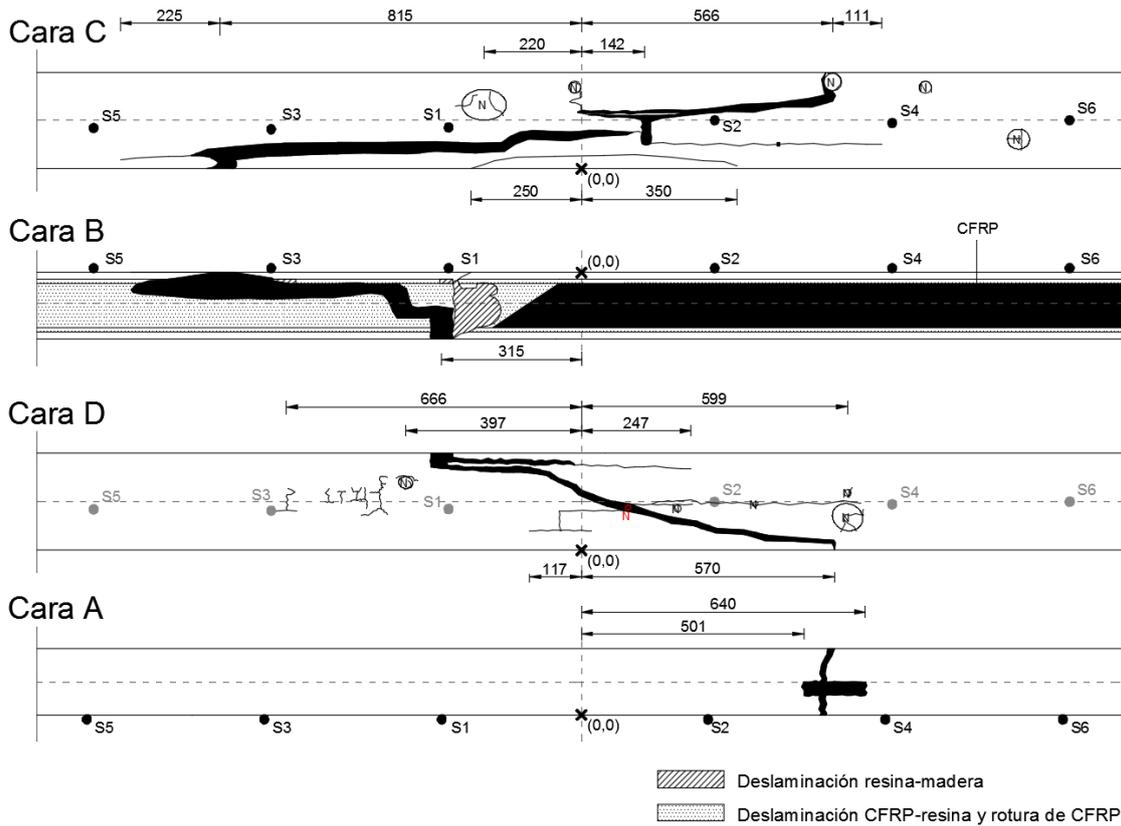


Figura 5.37. Esquema de daños de la viga LRS1. Cotas en mm.

En primer lugar, el pico de energía y eventos situado entre 50 y 60 cm corresponde con toda probabilidad al nudo situado a 57 cm del centro en la cara C, en el cual finalmente se abrió la grieta que provocó la rotura de la viga. Cabe destacar que en la misma posición pero en las caras A y D, había otros nudos que también generaron fuentes de EA.

El pico de energía y eventos situado en -20 cm corresponde al nudo situado a esa misma distancia en la cara lateral C. Además de existir otra grieta abierta al final del ensayo en ese mismo punto, había otro nudo, en este caso interno. Analizando la grabación del ensayo, se estima que este nudo fue, en gran parte, culpable de la separación de la viga en dos, quedando este como se muestra en la Figura 5.38.



Figura 5.38. Nudo interno separado en 2 mitades. Viga LRS1.

Por último, los pocos eventos muy energéticos situados en el punto -70 cm correspondieron al origen de la grieta que provocó la rotura final. Observando la grabación se aprecia como la grieta apareció al final del ensayo de manera repentina, teniendo su origen en -70 cm y avanzando hasta el nudo situado a 57 cm (Figura 5.38). Esta aparición repentina junto al hecho de que la

grieta no se generó hasta los tramos finales de la carga, explican los pocos eventos muy energéticos en el punto -70 cm.

Se muestra en la Figura 5.39 la evolución de los eventos y energía de EA en cada tramo.

Se observa en el **Tramo 2** (3 - 70,5%) la aparición de eventos y energía en [55, 60] cm correspondiente a la generación de fuentes por la apertura y separación de los nudos ya comentados, situados en esa zona.

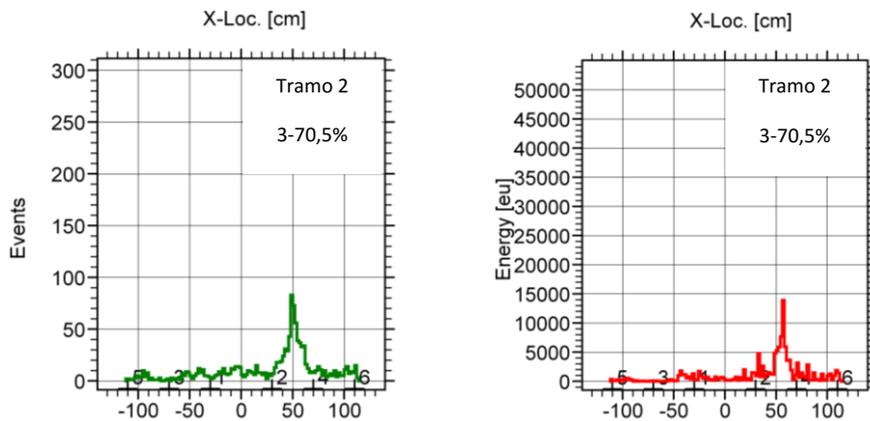
Se aprecia, como en el **Tramo 3** (70,5 - 90%), la actividad de EA comenzó a avanzar hacia la parte izquierda de la viga (origen de la grieta final). Aunque las fuentes de EA siguieron latentes en la zona [55, 60] cm, aparecieron otras zonas con actividad en el punto 0 y -20 cm donde se situaban dos nudos con fisuras en la cara C. Comenzó también a despuntar energía y eventos en el punto 75 cm (pequeño nudo en la cara C).

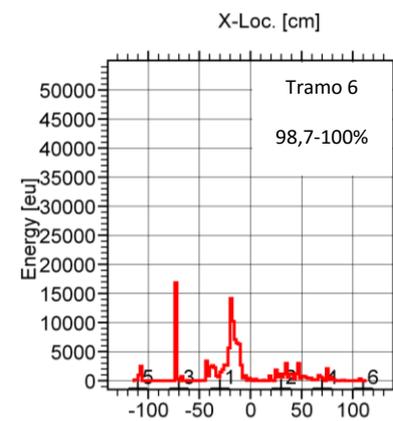
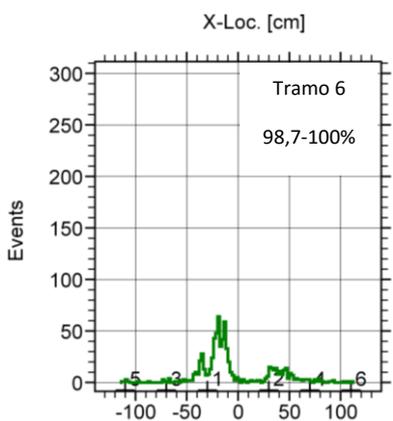
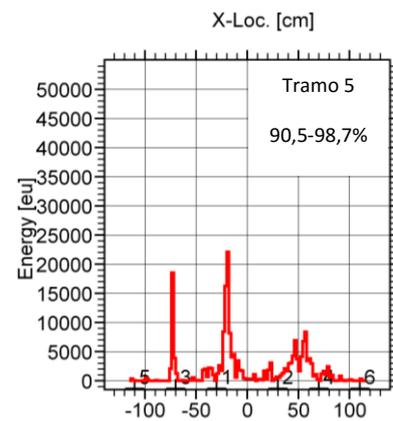
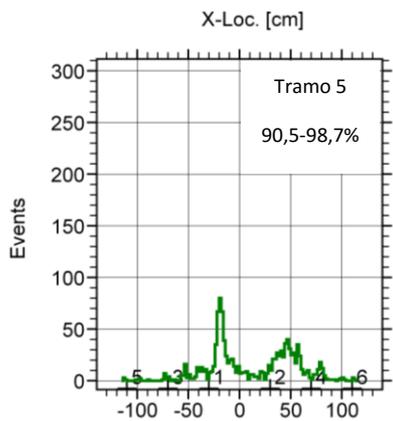
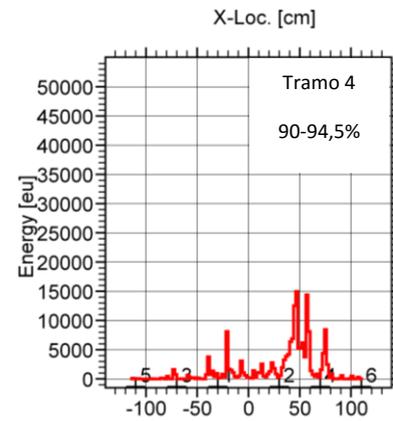
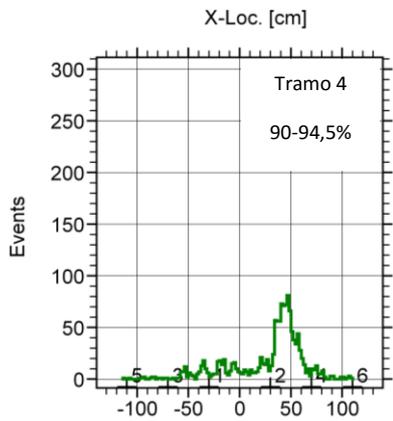
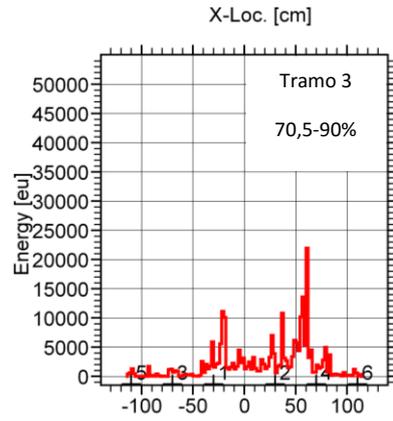
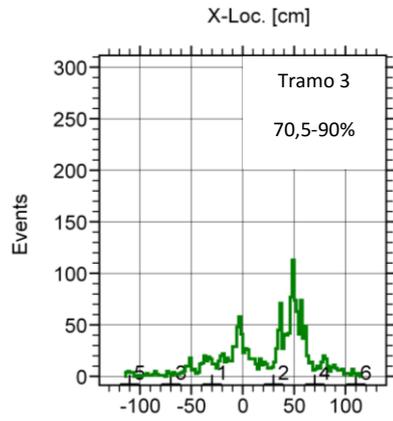
En el **Tramo 4** (90 – 94,5%) la actividad de EA continuó en la zona [55, 60] cm y en -20 cm, desapareciendo en el punto 0 cm.

A partir del **Tramo 5** (94,5 – 98,7%) fue cuando el punto situado en -20 cm (grieta final) aumentó considerablemente el número de eventos y energía. Además comenzaron, como se reseñó anteriormente, los eventos muy energéticos en el punto -70 cm (origen de la grieta final). El nudo en 57 cm siguió generando EA.

En el **Tramo 6** (98,7 – 100%) la actividad de EA continuó igual, excepto en el nudo a 57 cm, en el cual se redujo la emisión acústica.

En el **Tramo 7** (100 – 99,4%) se aprecian eventos y energía en todos las zonas y puntos del resto de tramos, aunque con mayor intensidad en -20 cm (nudo externo e interno de la cara C) y en 30 cm, probablemente por la apertura última de la grieta que recorrió toda la viga, la cual experimentó una separación de fibras en ese punto.





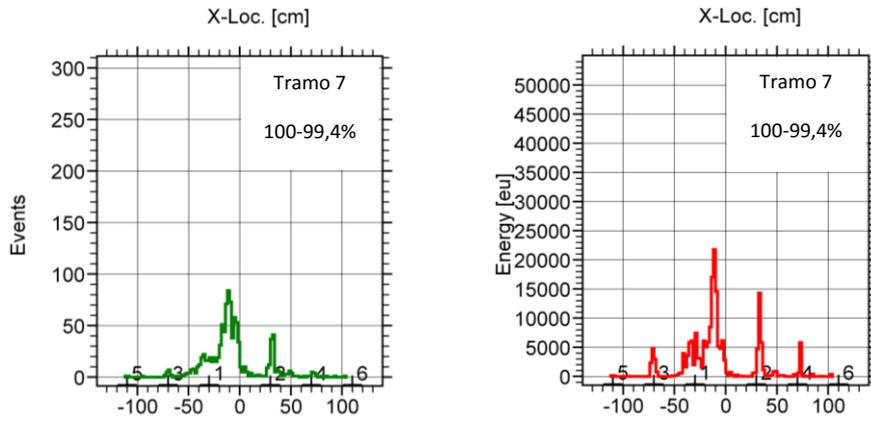
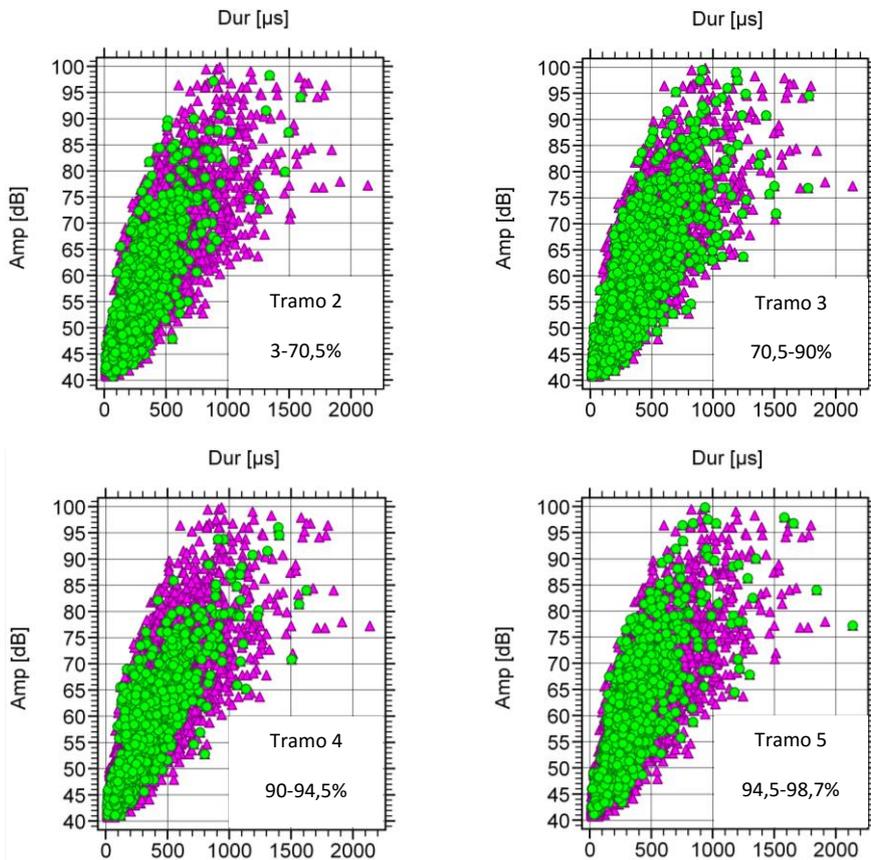


Figura 5.39. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRS1. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.

Se representa en la Figura 5.40 la amplitud frente a la duración de los *hits* registrados en cada tramo de carga (verde) comparados con los obtenidos durante todo el ensayo (violeta). Se observa, al igual que ocurría en las anteriores vigas, que el mayor número de *hits* se registraron en el **Tramo 3** (mayor duración). Se aprecia, una vez más, que en el **Tramo 2** (3 – 70,5%) la concentración de *hits* fue de menor amplitud y duración que en el resto de tramos. Cabe destacar también, la gran cantidad de *hits* registrados en el último tramo (100 - 99,5%), siendo éstos de corta duración.



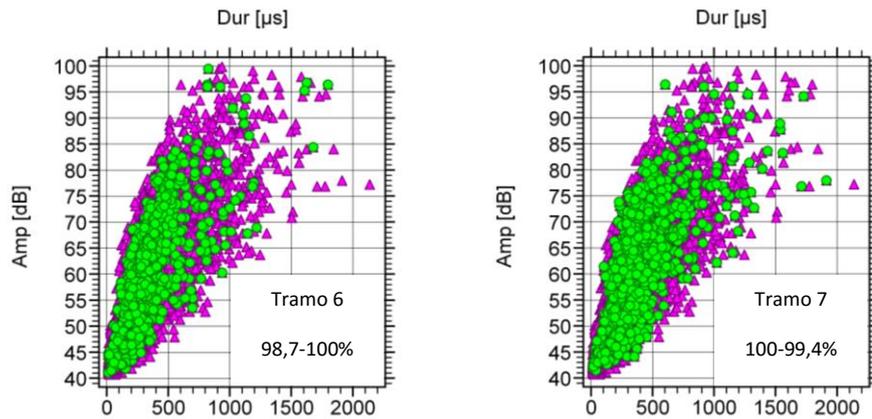


Figura 5.40. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: *Hits* en cada tramo de carga. Violeta: *Hits* de todo el ensayo. Viga LRS1.

## LRS2

La viga con refuerzo laminado LRS2 resistió menos carga que la viga anterior con el mismo refuerzo; en este caso, llegó a una carga de 4,17 toneladas. Se muestra en la Figura 5.41 una comparación del número acumulado de eventos localizados de EA registrados por el equipo con la carga aplicada a la viga. En este caso, al igual que en la viga anterior, se puede observar como la pendiente de la curva de carga disminuyó ligeramente a partir del tramo 3, evidenciando una mayor deformación a altas cargas. El número de eventos de EA acumulados (línea roja) fue en aumento conforme se aproximó a la carga de rotura de la viga. En el caso de esta viga, los tramos definidos fueron:

- **Tramo 1:** 0 – 4,5%.
- **Tramo 2:** 4,5 – 68,5%.
- **Tramo 3:** 68,5 – 78,5%.
- **Tramo 4:** 78,5 – 83%.
- **Tramo 5:** 83 – 91,3%.
- **Tramo 6:** 91,3 – 96,7%.
- **Tramo 7:** 96,7 – 100 %.

El **Tramo 1**, al igual que en las anteriores vigas, comienza desde el instante cero de aplicación de carga y acaba cuando la viga empezó a emitir ondas de emisión acústica. En este caso, al 4,5% de la carga, es decir a 186 kg.

La carga se mantuvo constante hasta que alcanzó 2856 kg (68,5% de la carga máxima). A partir de este punto el número de eventos localizados experimentó un aumento mayor. En concreto, fue el canal 1 el que registró el mayor número de *hits* como se puede observar en la Figura 5.42. Por tanto, desde 4,5% a 68,5% de la carga máxima se definió el **Tramo 2**.

El **Tramo 3** transcurrió desde el 68,5% hasta el 78,5% de la carga máxima (3273 kg), a partir del cual los canales 1 y 2 experimentaron un crecimiento en sus pendientes de *hits* registrados.

En el **Tramo 4** (de 78,5% al 83% de la carga máxima) se puede observar como fue el canal 1, el que sufrió un nuevo crecimiento destacando sobre el resto de los canales.

El **Tramo 5** comenzó a partir de 3461 kg y se puede apreciar en la Figura 5.42 como el canal 1, en esta ocasión, sufrió una disminución en la pendiente de *hits* registrados.

El siguiente tramo se definió a partir del 91,3% al 96,7% de la carga máxima, momento en el cual la viga, al igual que la anterior, sufrió una disminución repentina de carga situándose al 94,5%.

Desde el tramo anterior hasta el final del ensayo (94,5% al 100% de la carga máxima) se definió el **Tramo 7**.

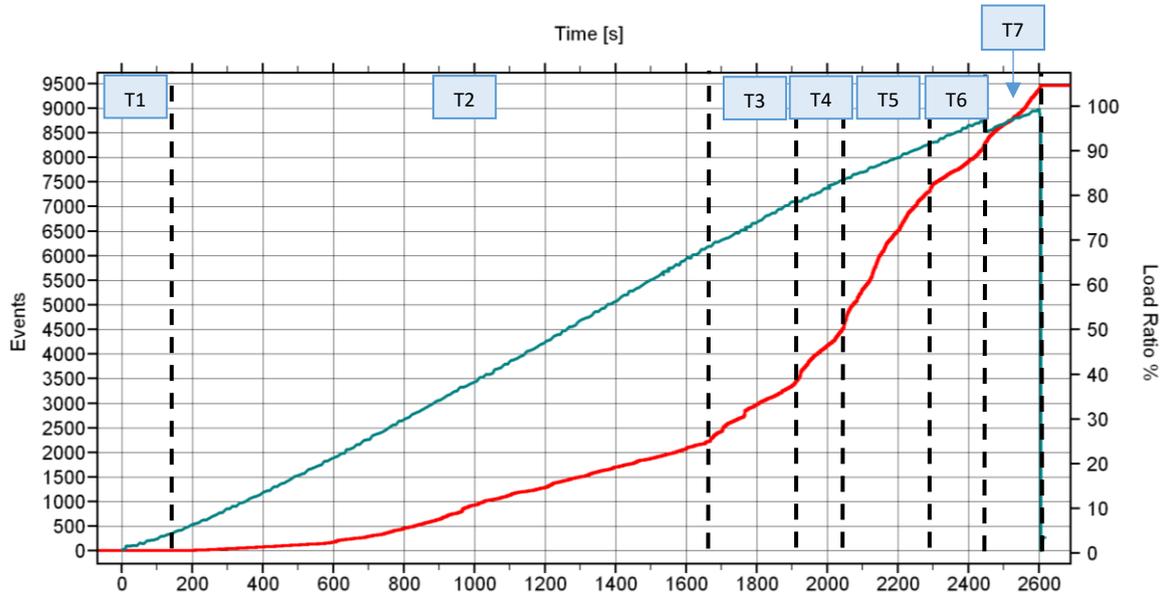


Figura 5.41. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRS2.

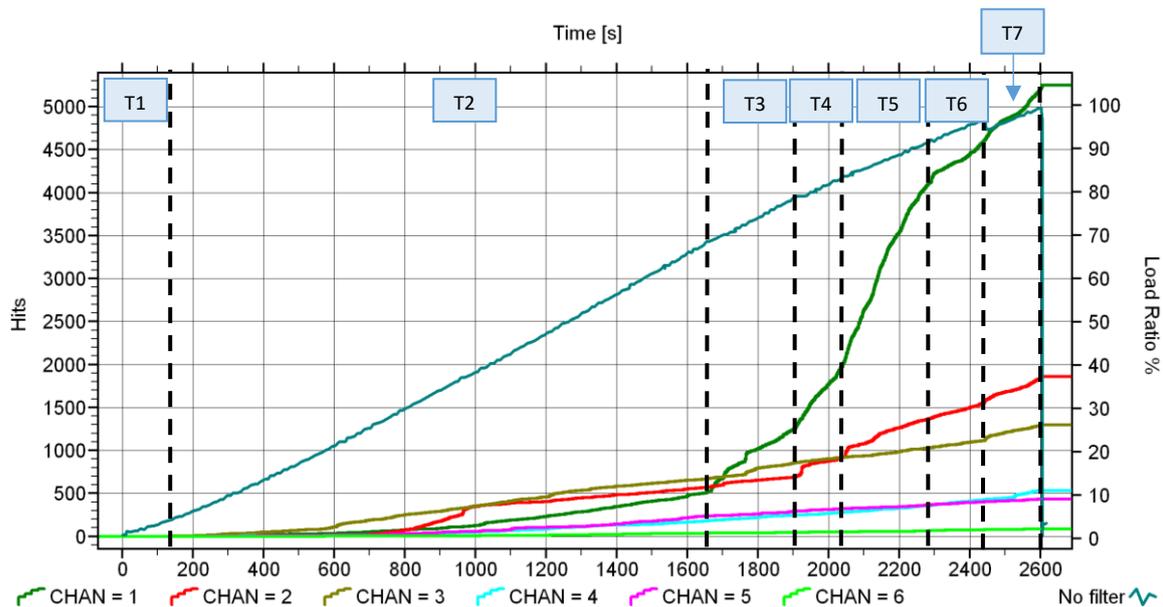


Figura 5.42. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: *Hits* por canal de EA frente al tiempo. Viga LRS2.

Las Figuras 5.43 y 5.44 muestran los resultados de localización de fuentes de EA.

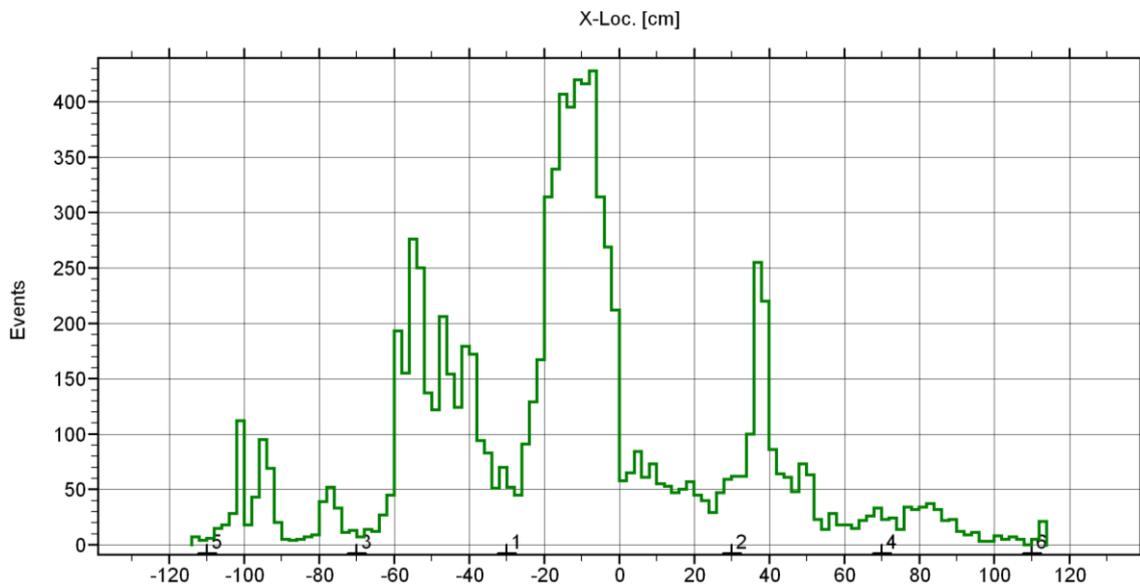


Figura 5.43. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRS2.

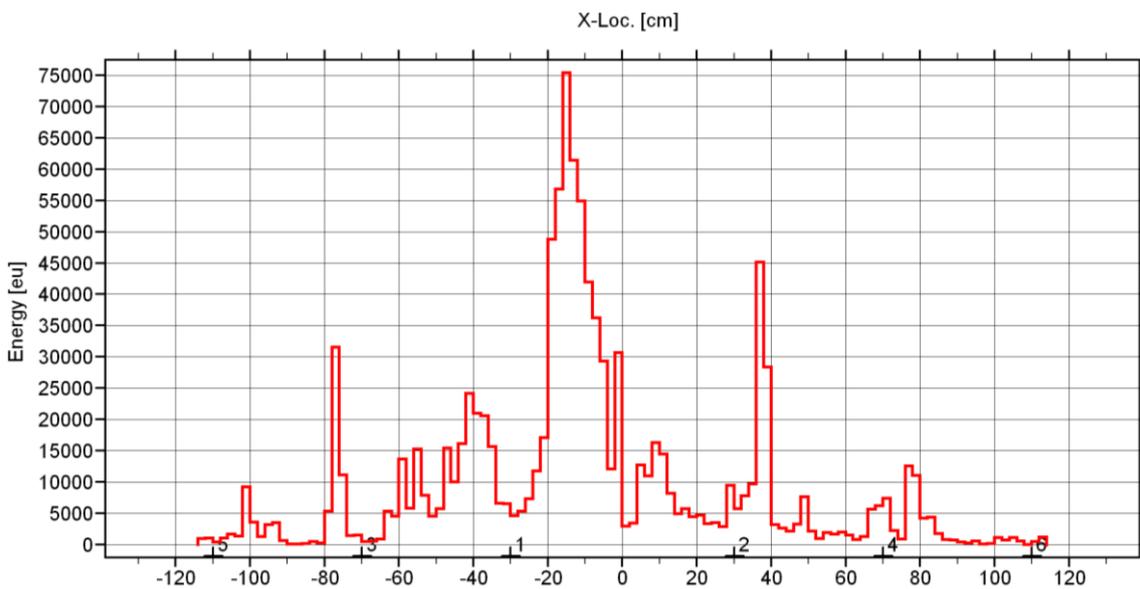


Figura 5.44. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRS2.

Se observa en las Figuras 5.43 y 5.44 una zona de alta concentración de eventos localizados y energía en [-30, 0] cm y una de menor entidad alrededor del punto 35 cm. También se observan dos zonas con actividad en la parte izquierda de la viga, una en -75 cm con pocos eventos pero altamente energéticos y otras dos en [-60, -50] cm y [-50, -30] cm de muchos eventos pero de poca energía. Además, se aprecia actividad de menor relevancia en -100 cm, en [0, 20] cm y en [70, 90] cm.

Se aporta en la Figura 5.45 el esquema de daños de la viga LRS2 al finalizar el ensayo. Se observa que la grieta de mayor espesor comenzó en -6 cm y siguió hasta 15 cm en la cara C. Desde ese punto recorrió la cara B hasta -32 cm y continuó en un nudo situado en ese mismo punto en la cara D. Desde ese nudo se une a otra grieta comprendida entre -25 cm y 15 cm en la cara D. Una

grieta de gran recorrido se formó con una longitud comprendida entre -25 cm y 45 cm en la cara C. Cabe destacar los nudos fisurados a 87 cm del centro en la cara C y a -82 cm en la cara D.

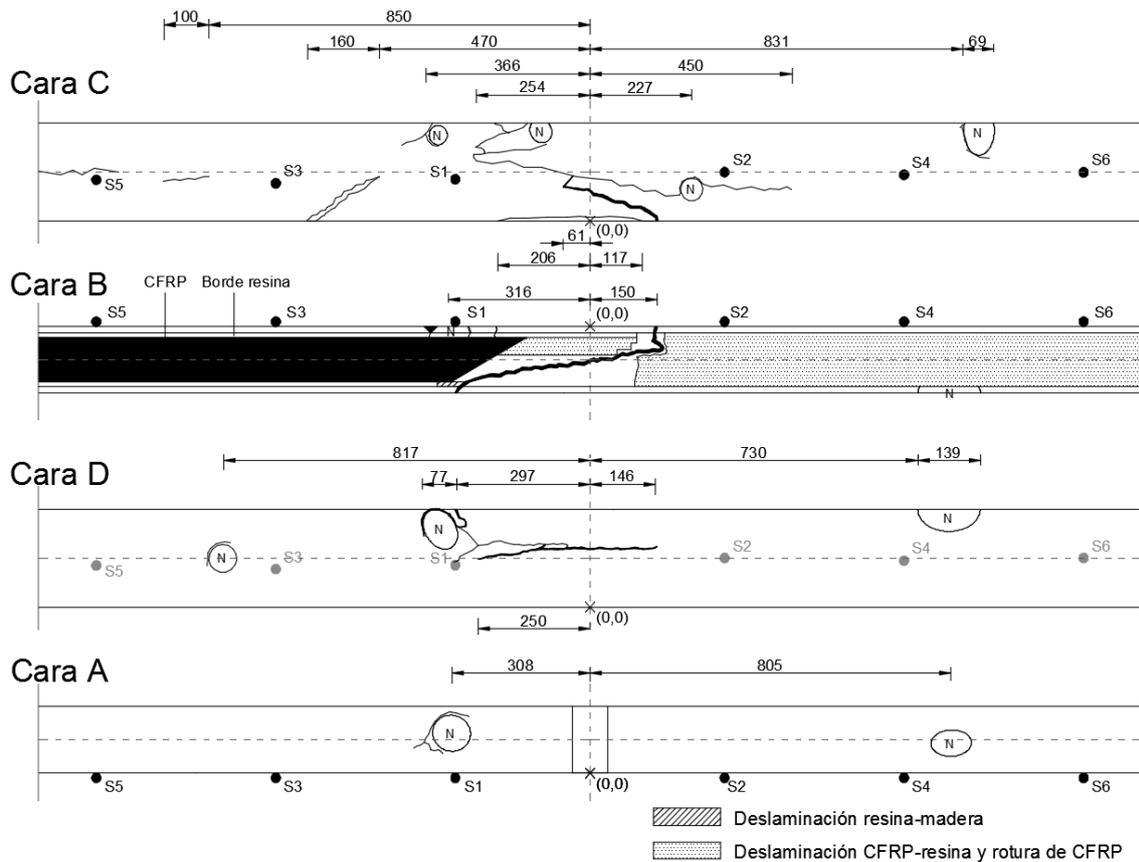


Figura 5.45. Esquema de daños de la viga LRS2. Cotas en mm.

Como se puede observar la localización, en este caso, fue muy buena pues la grieta de mayor espesor se concentró de -33 cm a 15 cm, además de las fisuras en las caras C y D situadas en esa misma zona. Esto coincide con la localización realizada por el software en la que se destaca en mayor medida la zona situada a la izquierda del centro provocado con toda probabilidad por las fisuras y nudos situados en esa zona en las caras C y D.

Si se observa la parte izquierda de la viga, se aprecia una fisura en la cara C cercana al punto -100 cm comentado anteriormente. Más a la derecha una fisura bordeó el nudo situado en el punto -82 cm de la cara D, lo que provocó la actividad de EA que se aprecia en las Figuras 5.43 y 5.44 en -75 cm. En este último caso hubo un pequeño error de precisión probablemente debido por situarse los sensores en una cara distinta a la de la fuente de EA, lo que provocó mayores reflexiones y modos de ondas al cruzar por las esquinas que volvieron la localización menos precisa.

El hueco en la madera situado de [-63, -47] cm en la cara C y los nudos fisurados entre [-36, -30] cm en las cuatro caras son los posibles generadores de las zonas de muchos eventos poco energéticos en [-60, -50] cm y [-50, -30] cm.

En la parte derecha de la viga, una fisura situada entre 0 y 45 cm en la cara C provocó con toda probabilidad la actividad acústica en el punto 35 cm. Por último, la pequeña actividad producida en [70, 90] cm pudo ser causada por los nudos situados en esa misma zona en las cuatro caras de la viga.

Se muestra en la Figura 5.46 la evolución de los eventos y energía de EA en cada tramo.

Se observa en el **Tramo 2** (cuando comienza la emisión acústica) la aparición de eventos con poca energía en -55 cm correspondiente a la generación de fuentes por el hueco en la madera situado en [-63, -47] cm. Esta emisión se redujo en los demás tramos hasta volverse insignificante con respecto al resto de daños.

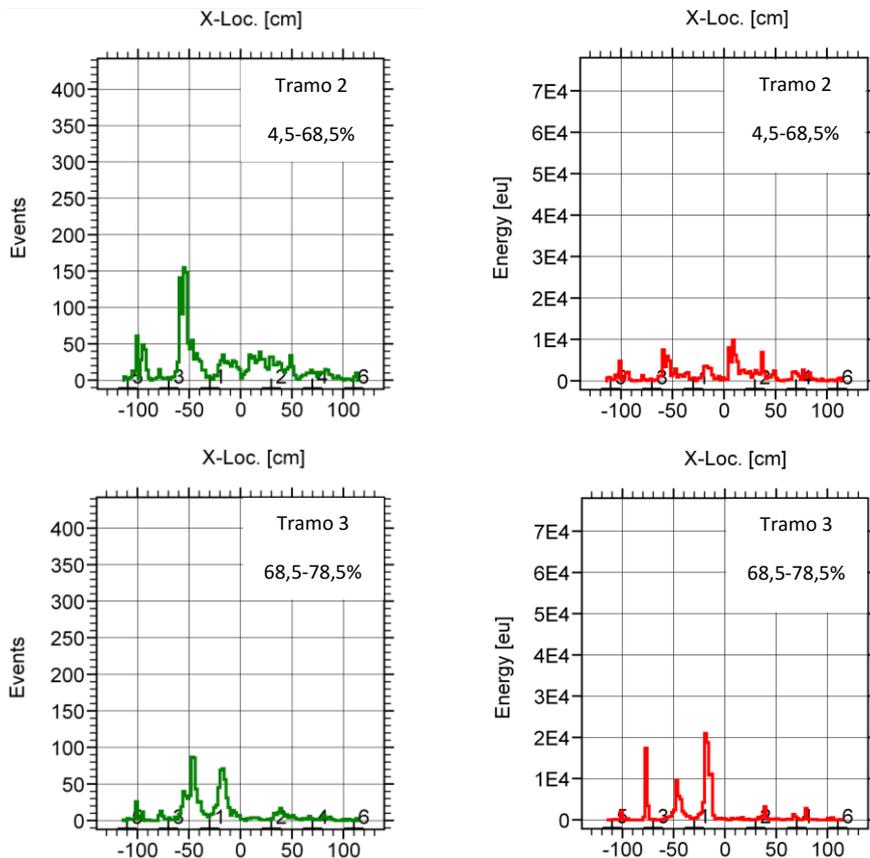
Se aprecia como en el **Tramo 3** (68,5 – 78,5%) la actividad de EA comenzó a destacar de [-30, 0] cm por las fisuras y nudos en esa zona de la viga, en la cual apareció la grieta por la que acabó partiéndose la viga en las caras C y D. Esta actividad no paró de crecer a cada tramo de carga, excepto en el **Tramo 6** (91,3 – 96,7%). También aparecieron eventos muy energéticos en el punto -75 cm. Esto solo se apreció en este tramo, lo que indica que claramente fue debido a una deformación repentina por la tensión; en este caso pudo ser la separación del nudo de la madera situado en la cara D o la fisuración del mismo.

En el **Tramo 4** (78,5 – 83%) comenzó la actividad en el punto 35 cm, la cual tuvo un crecimiento en el siguiente tramo (apertura de una fisura).

En el **Tramo 5** (83 - 91,3%) continúa el crecimiento en la zona [-30, 0] cm y en el punto 35 cm ya comentado, alcanzando su máxima actividad.

El **Tramo 6** (91,3 – 96,7%) se produjo un descenso drástico en la emisión acústica.

En el **Tramo 7** (96,7 – 100%) la actividad de emisión acústica se concentró en el centro de la viga, lugar donde se abrió la grieta que finalmente provocó el fallo de la viga.



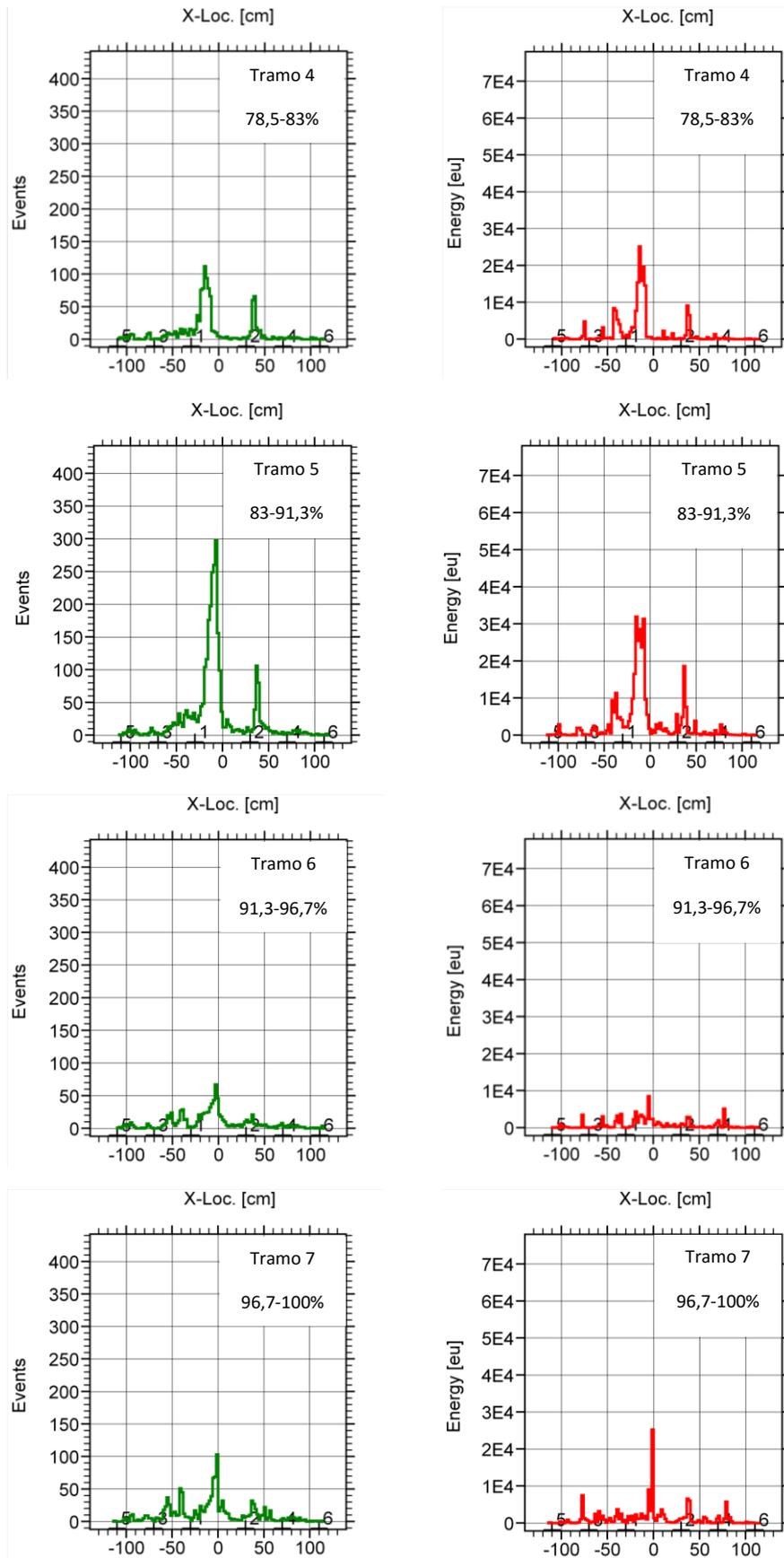


Figura 5.46. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRS2. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.

Se representa en la Figura 5.47 la amplitud frente a la duración de los *hits* registrados en cada tramo de carga (verde) comparados con los obtenidos durante todo el ensayo (violeta). Se observa, en el **Tramo 2**, una zona de *hits* con altas amplitudes y corta duración, siendo estos *hits* correspondientes a la zona de 70 cm. Se aprecia, en esta viga, que el **Tramo 5** (83 – 91,3%) es el tramo que más *hits* registra y el **Tramo 6** (91,3 - 96,7%) el que menos.

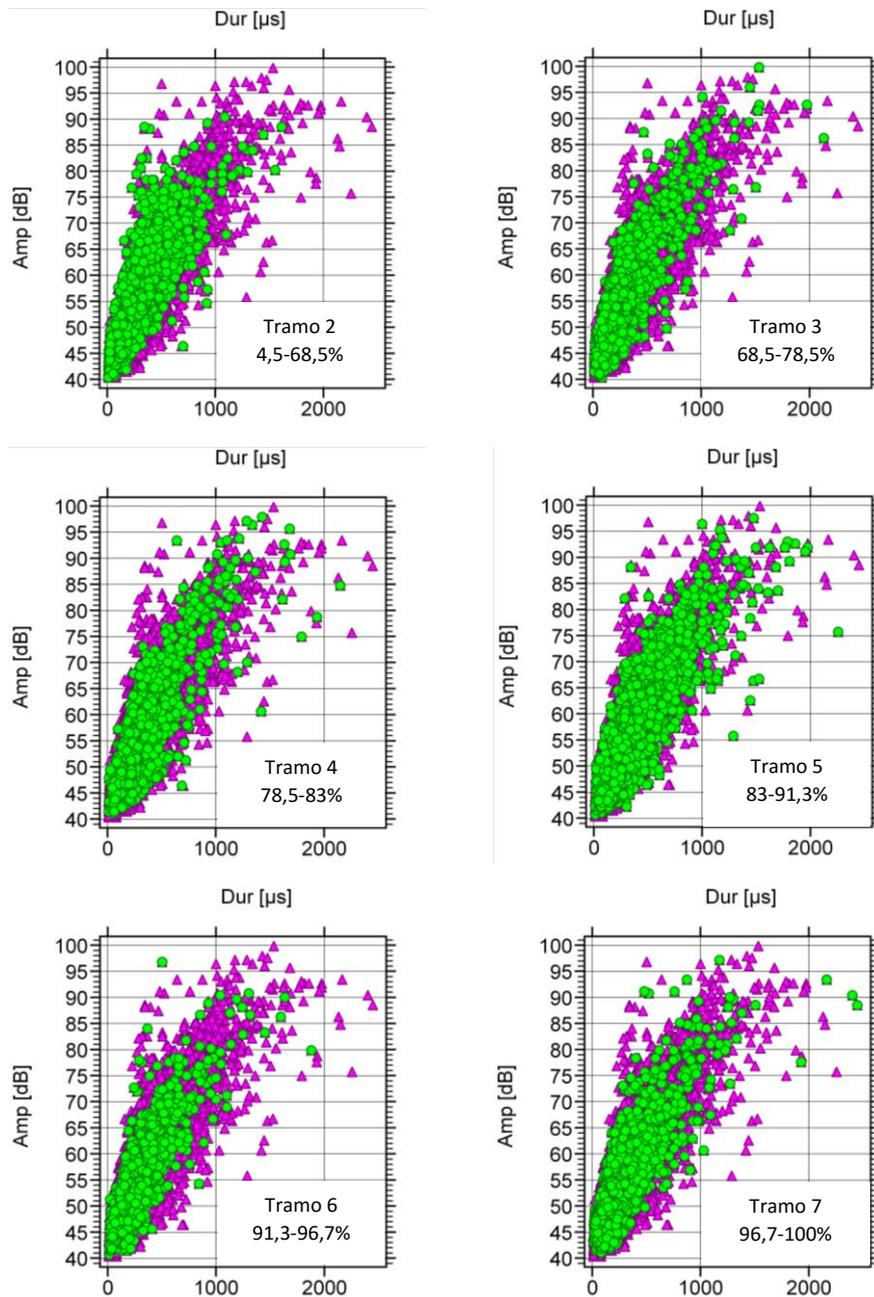


Figura 5.47. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: *Hits* en cada tramo de carga. Violeta: *Hits* de todo el ensayo. Viga LRS2.

LRD1

La viga con refuerzo laminado LRD1 resistió una carga de 3,69 toneladas. Se muestra en la Figura 5.48 una comparación del número acumulado de eventos localizados de EA registrados por el equipo con la carga aplicada a la viga. Se observa en, este caso, que la pendiente de carga se mantiene constante durante todo el ensayo, pudiendo deberse a que al resistir menos la viga que en los casos anteriores, no entró en fase de tipo plástica. El número de eventos de EA acumulados (línea roja) fue en aumento conforme se aproximó a la carga de rotura de la viga. En el caso de esta viga, los tramos definidos fueron:

- **Tramo 1:** 0 – 4%.
- **Tramo 2:** 4 – 90%.
- **Tramo 3:** 90 – 98%.
- **Tramo 4:** 98 – 100%.

El **Tramo 1**, como en las vigas anteriores, se definió desde el inicio del ensayo hasta que aparecieron los primeros eventos de emisión acústica, en este caso, hasta 148 kg o el 4% de la carga máxima.

En el **Tramo 2**, la EA se mantuvo constante hasta el 90% de la carga máxima 3321 kg, siendo el periodo más largo, hasta el momento, en tanto por ciento de carga de todas las vigas estudiadas.

El **Tramo 3** comenzó en 90% y terminó en el 98% de carga máxima aplicada (3616 kg). Se definió a partir de este tramo, puesto que, como en el resto de vigas, se produjo un descenso brusco de la carga aplicada debida a una deformación repentina de la viga, como ya ocurrió en las vigas anteriores con refuerzo.

El último tramo se definió desde el 90% hasta el 100% de la carga máxima o final del ensayo. En este tramo fue el canal 2 el que experimentó un claro aumento de la EA registrada, siendo el canal 3 el que registró un claro descenso en su pendiente.

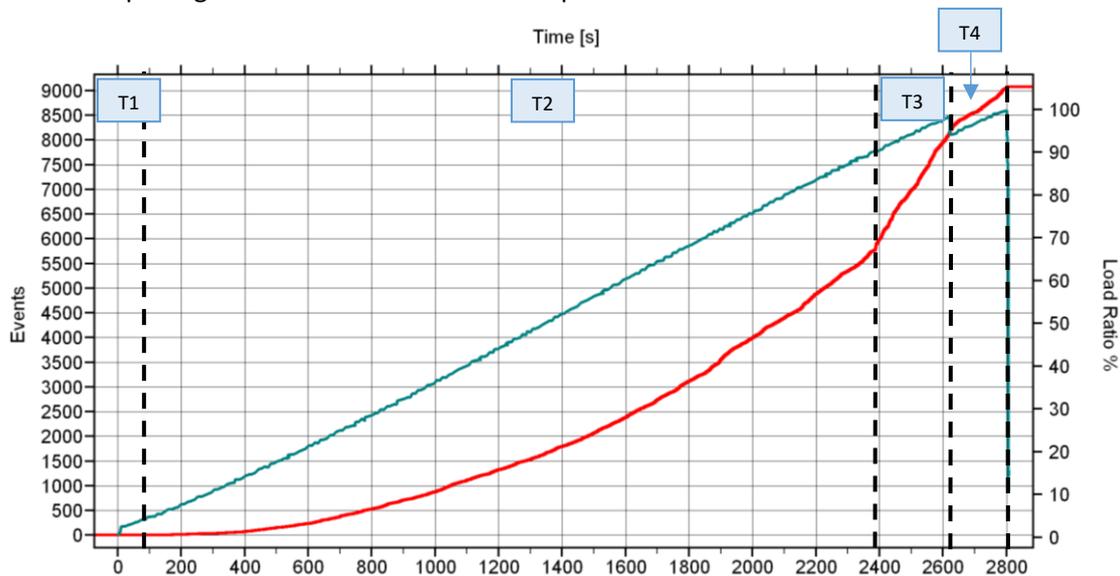


Figura 5.48. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRD1.

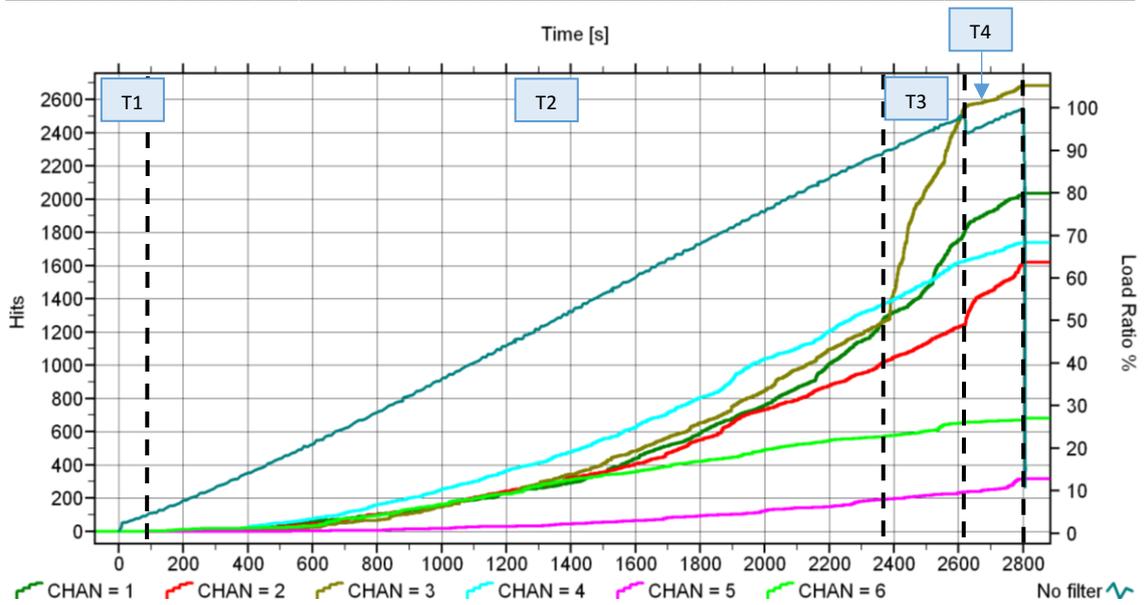


Figura 5.49. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: Hits por canal de EA frente al tiempo. Viga LRD1.

Las Figuras 5.50 y 5.51 muestran los resultados de localización de fuentes de EA.

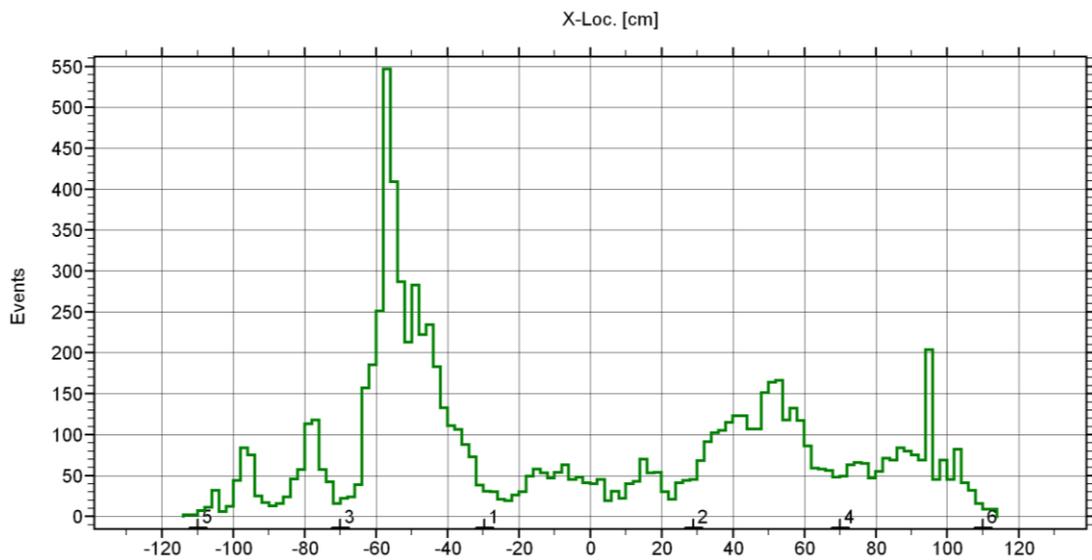


Figura 5.50. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRD1.

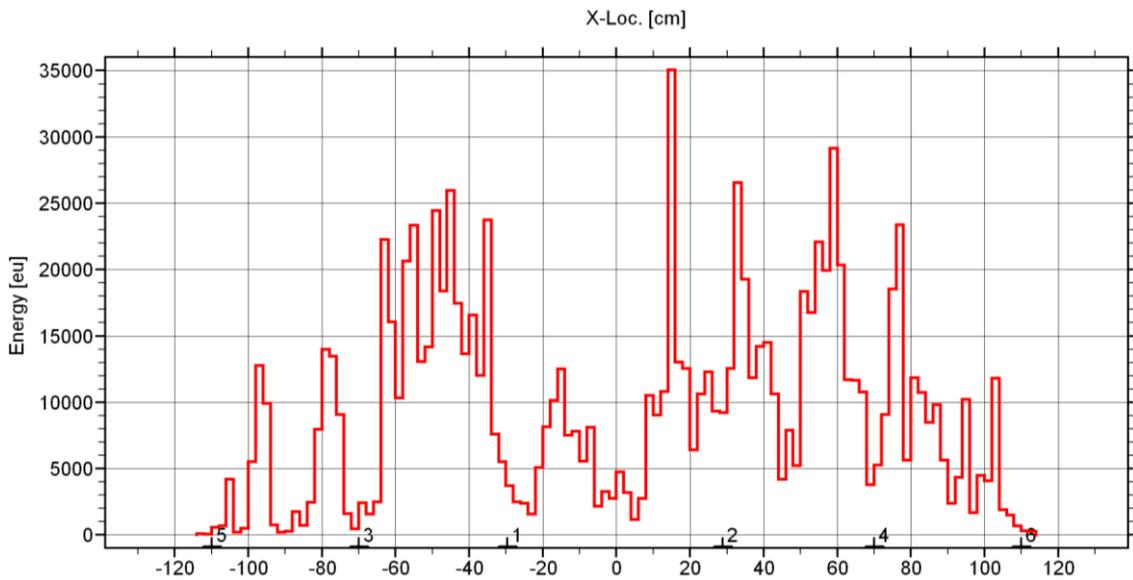


Figura 5.51. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRD1.

En cuanto a los eventos localizados se muestra un claro ascenso en la zona de [-70, -30] cm coincidente con una zona de gran entidad en la gráfica de energía. En menor medida se aprecian zonas de [-100, -90] cm y de [-90, -70] cm, de pocos eventos muy energéticos. Igual ocurrió en el tramo de [-25, 10] cm aunque el número de eventos y energía es bastante inferior. Por último, en la parte derecha de la viga se aprecian eventos muy energéticos durante toda la zona, pudiéndose destacar los puntos 15, 33, 60, 75 y 105 cm.

Se aporta en la Figura 5.52 el esquema de daños de la viga LRD1 al finalizar el ensayo. Se aprecia, a priori, que la grieta causante de la rotura de la viga se localizó en la zona comprendida entre [-30, 25] cm en las caras B y D. Existe una zona con un gran número de nudos y fisuras en [-30, -15] cm en la cara C, en [30, 70] cm en las caras A y C, y en [70, 110] cm en las caras A, B y C. Cabe destacar también la zona de [-70, -30] cm por la presencia de fisuras y un nudo y por producirse una gran zona de deslaminación entre la resina y la madera en la cara B.

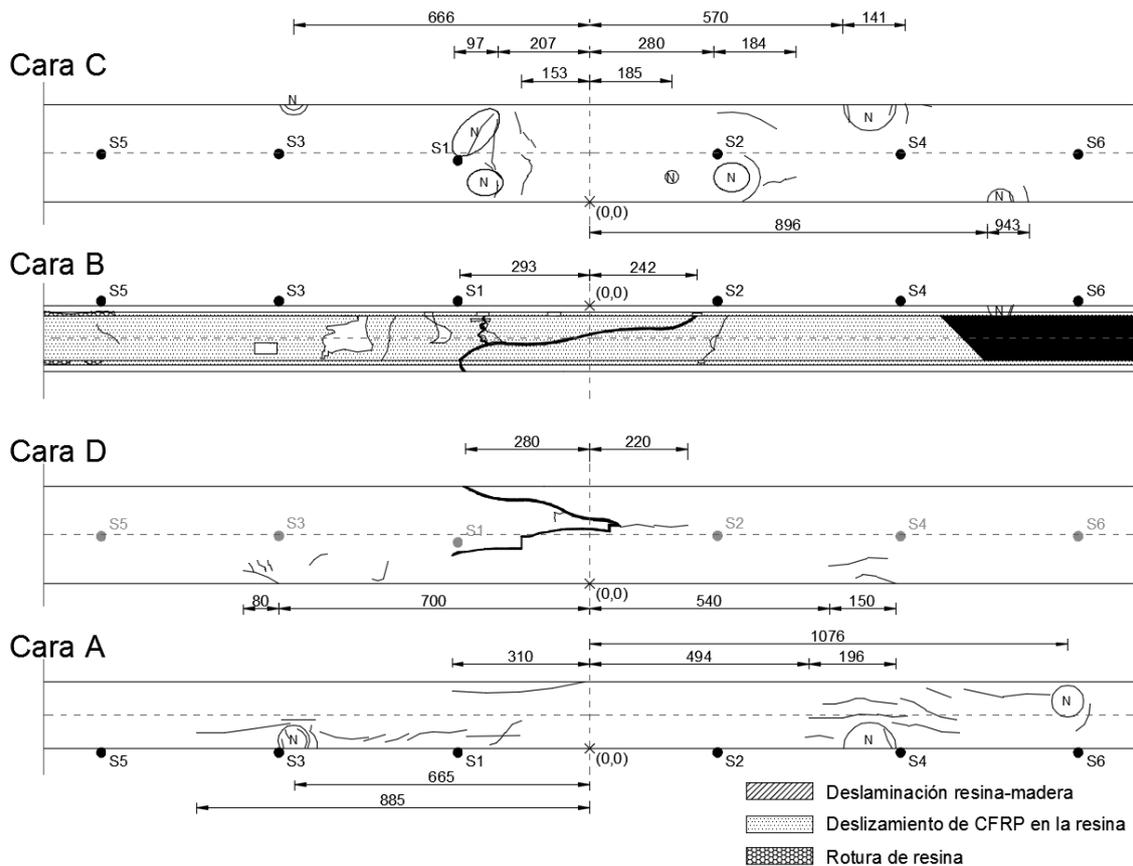


Figura 5.52. Esquema de daños de la viga LRD1. Cotas en mm.

La localización realizada parece lógica, aunque resulta extraño la poca actividad de EA registrada en la zona de [-30, 0] cm siendo la que contiene más daño en la madera. Esto tiene su explicación, ya que, exactamente igual a lo que ocurrió en la viga SR2, el grupo de nudos (de -30 a -20 cm) cercano al sensor 1 provocó un aumento de la atenuación como puede observarse en la Figura 3.13 del Apartado 3.1. Esta atenuación provocó un menor registro de eventos en el ensayo por no superar el umbral y una mala localización por cambiar el modo de la señal y producirse más reflexiones. En efecto, representando las gráficas de los eventos y la energía localizada con LUCY mayor de 20 cm (localización muy imprecisa) en las Figuras 5.53 y 5.54, se aprecia que el mayor número de eventos se localizan entre los sensor 1 y 2.

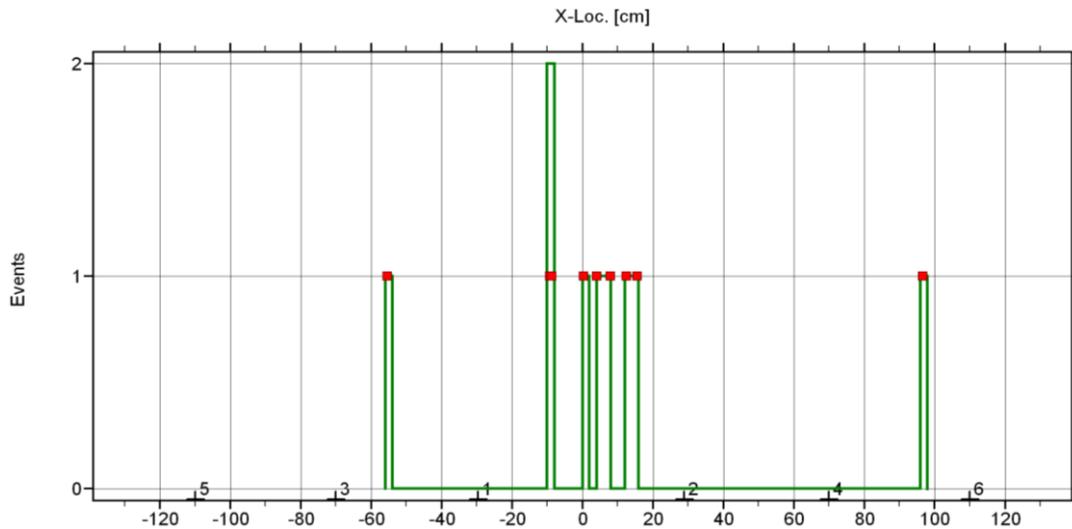


Figura 5.53. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Rojo: Eventos localizados de EA en correlación. Verde: Eventos localizados de EA en distribución. Viga LRD1.

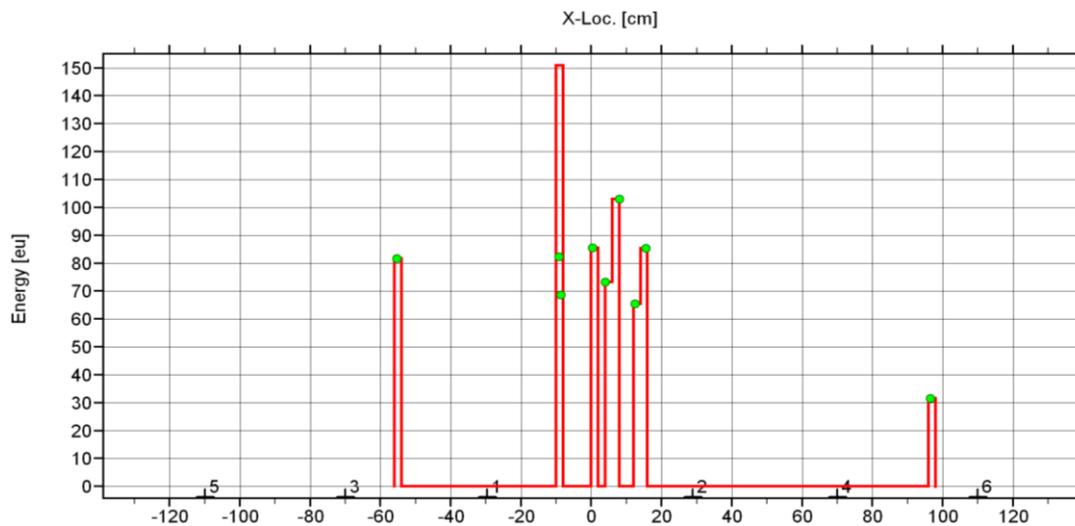


Figura 5.54. Energía respecto al eje de la viga. Verde: Eventos localizados de EA en correlación. Rojo: Energía localizada y de EA en distribución. Viga LRD1.

En el resto de zonas de la viga, la localización realizada por el software es altamente precisa. En [-100, -90] cm se aprecia una zona de rotura de resina en la cara B y en [-90, -70] cm fisuras y nudos en todas las caras, además de una zona de deslaminación entre la resina y la madera. En cuanto a la zona de mayor número de eventos [-70, -30] cm fue, probablemente, la suma de la EA generada por las fisuras y nudos de las caras A, C y D, la deslaminación entre la resina y la madera, y la rotura de la resina de la cara B, además de la grieta que provocó el fallo de la viga situada entre [-30, 25] cm en las caras B y D mal localizada debido al grupo de nudos ya comentado. Lo mismo ocurre en la zona de [0, 25] cm, lugar donde acabó la grieta, y en el cual apareció actividad de EA. En relación a la parte derecha de la viga, se considera normal la EA registrada a través de toda la zona, pues contiene daños en toda ella. Cabe destacar que los puntos comentados anteriormente de 15, 33, 60, 95 y 105 cm coincidieron siempre con la presencia de un nudo y el 75 cm con la presencia de una zona de fisuras en la cara A.

Se muestra en la Figura 5.55 la evolución de los eventos y energía de EA por tramos de carga ya comentados anteriormente.

En el **Tramo 2** ya apareció la localización de todos los fallos comentados, sin destacar ninguna zona en concreto.

En el **Tramo 3** se observa con mayor claridad la zona de [-70, -30] cm provocada, como ya se ha comentado, por la rotura de la resina y su deslaminación con la madera, además de las fisuras de la cara A y, con toda probabilidad la grieta mal localizada situada en [-30, 20] cm.

En el último tramo se aprecian fácilmente muy pocos eventos pero de alta energía que anunciaron la rotura inminente de la viga. Cabe destacar que estos eventos muy energéticos se localizaron en -35 y 20 cm coincidiendo con los extremos de la grieta que provocó el fallo de la viga.

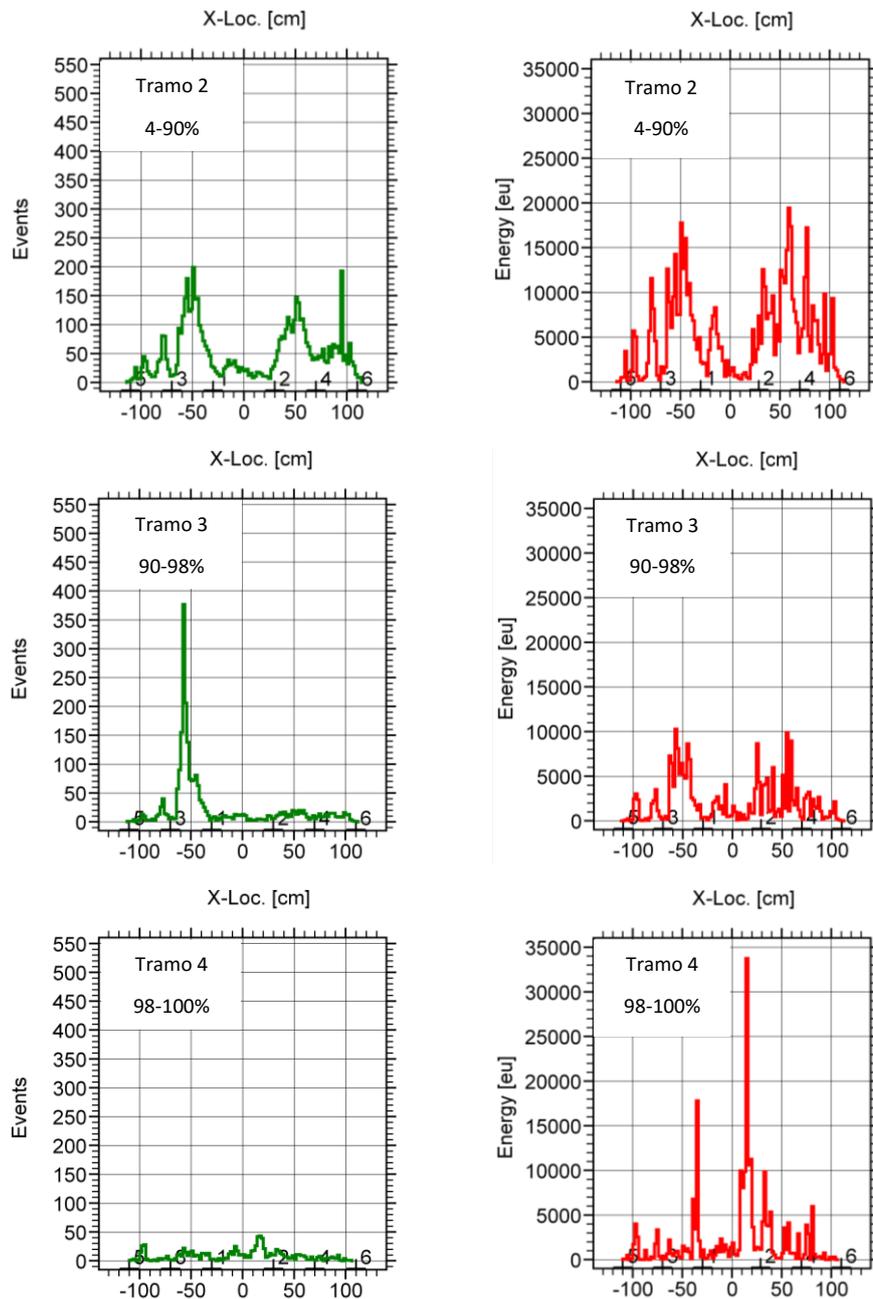


Figura 5.55. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRD1. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.

Se representa en la Figura 5.56 la amplitud frente a la duración de los *hits* registrados en cada tramo de carga (verde) comparados con los obtenidos durante todo el ensayo (violeta). Se observa que fue el tramo 2 el que más *hits* registró, lo cual es lógico por ser bastante más largo en duración que el resto.

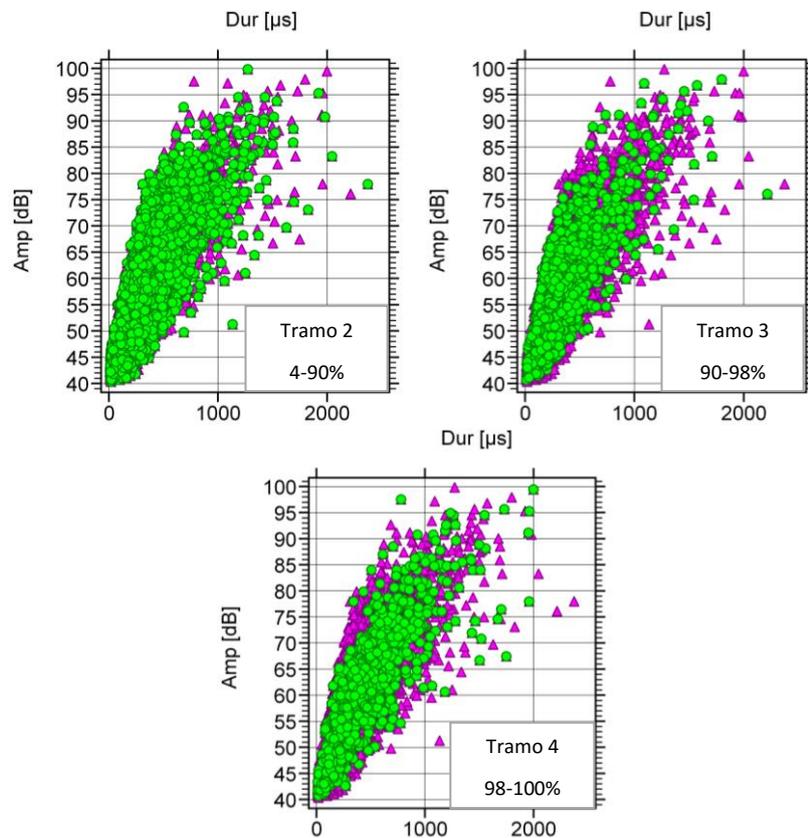


Figura 5.56. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: *Hits* en cada tramo de carga. Violeta: *Hits* de todo el ensayo. Viga LRD1.

#### LRD2

La viga con refuerzo laminado LRD2 resistió una carga superior a la anterior de 4,5 toneladas. Se muestra en la Figura 5.57 una comparación del número acumulado de eventos localizados de EA registrados por el equipo con la carga aplicada a la viga y referida en tanto por ciento (*Load Ratio*). Se observa, en este caso, que la pendiente de carga disminuyó al comienzo del tramo 3 aumentando la deformación más rápidamente que en los tramos anteriores. El número de eventos de EA acumulados (línea roja) fue en aumento conforme se aproximó a la carga de rotura de la viga. En el caso de esta viga, los tramos definidos fueron:

- **Tramo 1:** 0 – 3%.
- **Tramo 2:** 3 – 53%.
- **Tramo 3:** 53 – 88%.
- **Tramo 4:** 88 – 97,5%.
- **Tramo 5:** 97,5 – 100%.

El **Tramo 1** (de 0 – 3% de la carga máxima) se definió, al igual que en el resto de vigas, desde el comienzo del ensayo hasta que aparecieron los primeros eventos localizados de emisión acústica. En este caso a 135 kg de carga.

En el **Tramo 2** se mantuvo la pendiente de eventos localizados constante hasta una carga de 2385 kg (53% de la carga máxima), momento en el que se aprecia un crecimiento más rápido de eventos y *hits* registrados por los canales 1 y 2 (Figura 5.56), zona correspondiente al centro de la viga.

A partir del **Tramo 3** (de 88 – 97,8% de la carga máxima) la pendiente se mantuvo constante desde que comenzó el tramo en 3960 kg hasta que se produjo el descenso repentino de la carga, lo cual provocó un mayor crecimiento, a partir de este instante, de los *hits* registrados por el canal 2.

Este crecimiento se mantuvo constante hasta la carga de rotura de la viga en 4500 kg. Cabe destacar que la carga no descendió totalmente, ya que, se situó al 50% y continuó cargando. El ensayo finalmente se detuvo puesto que no era de utilidad para el análisis.

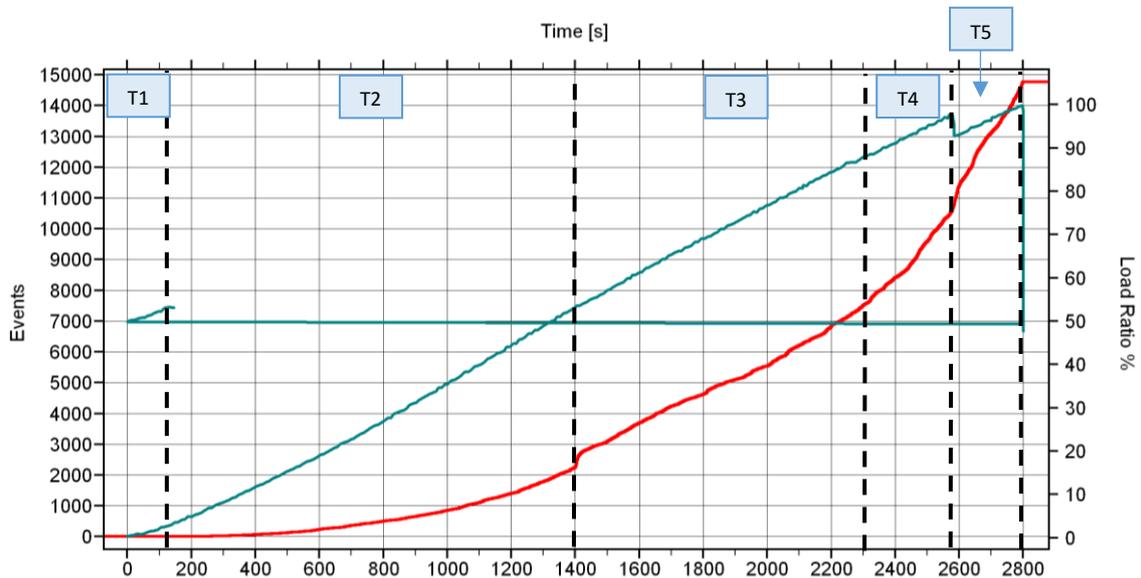


Figura 5.57. Rojo: Eventos localizados de EA acumulados frente al tiempo. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Viga LRD2.

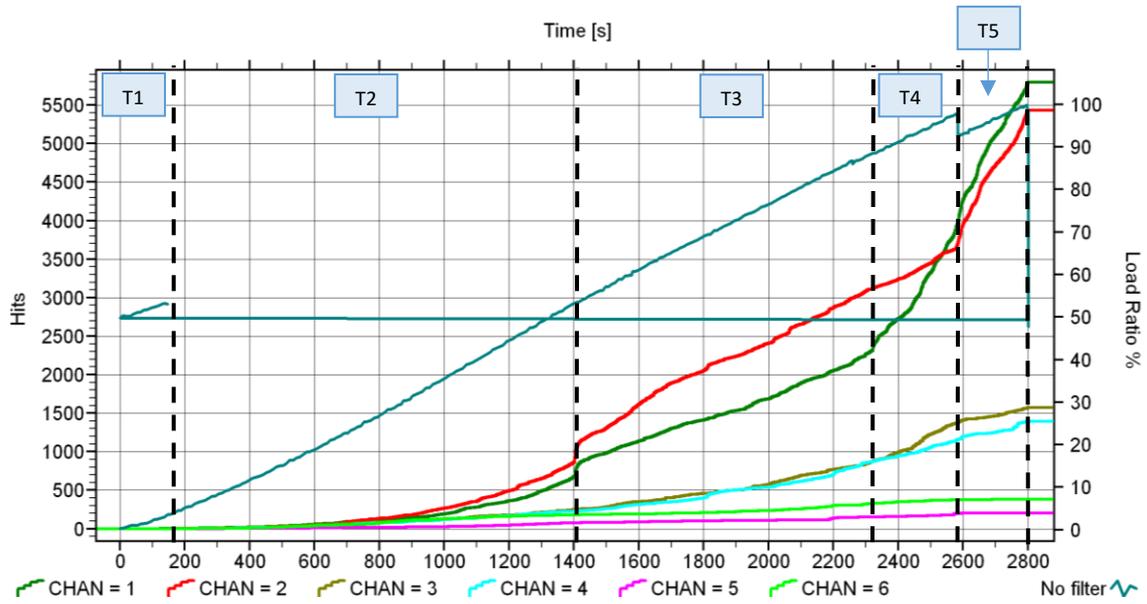


Figura 5.58. Azul: Porcentaje de carga aplicada. Resto de colores: Hits por canal de EA frente al tiempo. Viga LRD2.

Las Figuras 5.59 y 5.60 muestran los resultados de localización de fuentes de EA.

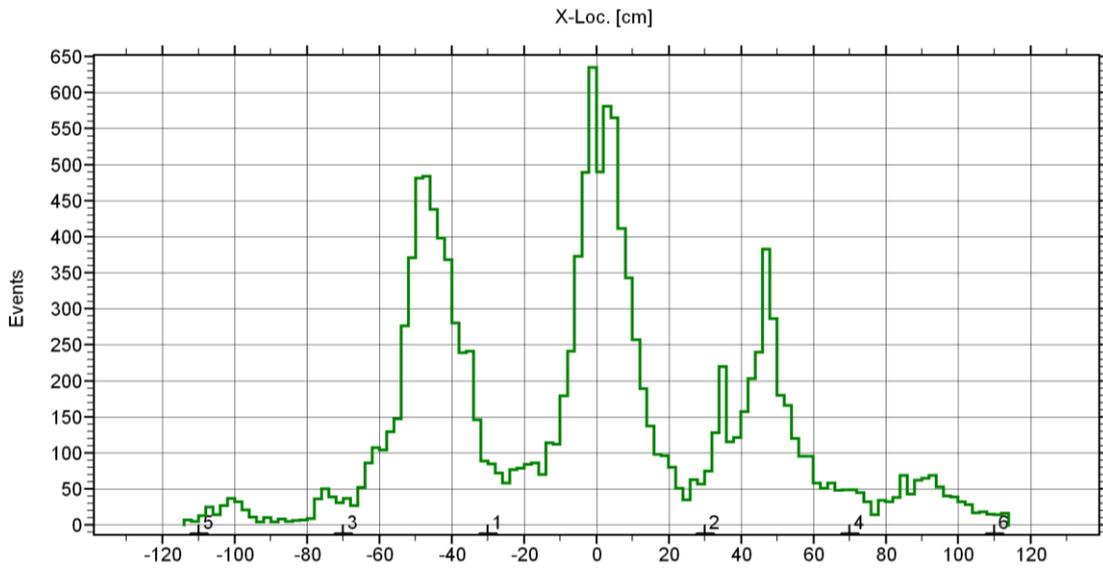


Figura 5.59. Eventos localizados respecto al eje de la viga. Viga LRD2.

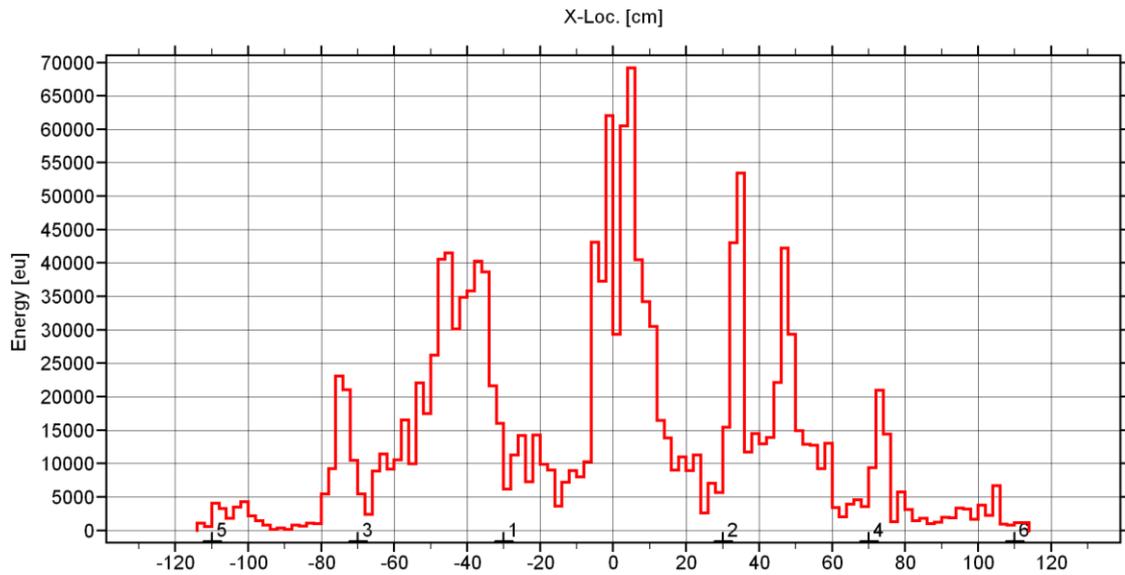


Figura 5.60. Energía localizada respecto al eje de la viga. Viga LRD2.

Se observan en las Figuras 5.59 y 5.60 tres zonas claramente identificables en  $[-60, -30]$  cm,  $[-15, 20]$  cm y  $[30, 60]$  cm. También se aprecian dos zonas de pocos eventos muy energéticos en  $[-80, -70]$  cm y  $[70, 80]$  cm.

Se aporta en la Figura 5.61 el esquema de daños de la viga LRD2 al finalizar el ensayo. Se aprecia, a priori, que la grieta causante de la rotura de la viga tuvo su origen en 11 cm en la cara C y finalizó en el punto 0 cm de la cara B. En esta misma cara nació una grieta de gran entidad en  $[0, -24]$  cm. Estas grietas coinciden con la zona de mayor número de eventos y energía en la localización, de  $[-15, 20]$  cm. Fijándose en la zona comprendida en  $[-61, 53]$  cm se puede apreciar como todas las caras de la viga acabaron llenas de nudos, fisuras, deslaminaciones y roturas de resina, por lo que no es de extrañar que las tres zonas de mayor actividad acústica se concentrasen en  $[-60, 60]$  cm.

Por último, los nudos fisurados y localizados en -83 cm en las caras A, C y D, y en 71 cm en la cara D provocaron la EA de menor entidad en las zona de  $[-80, 70]$  cm y  $[70, 80]$  cm, entendiéndose que hubo un pequeño error de precisión en los primeros nudos.

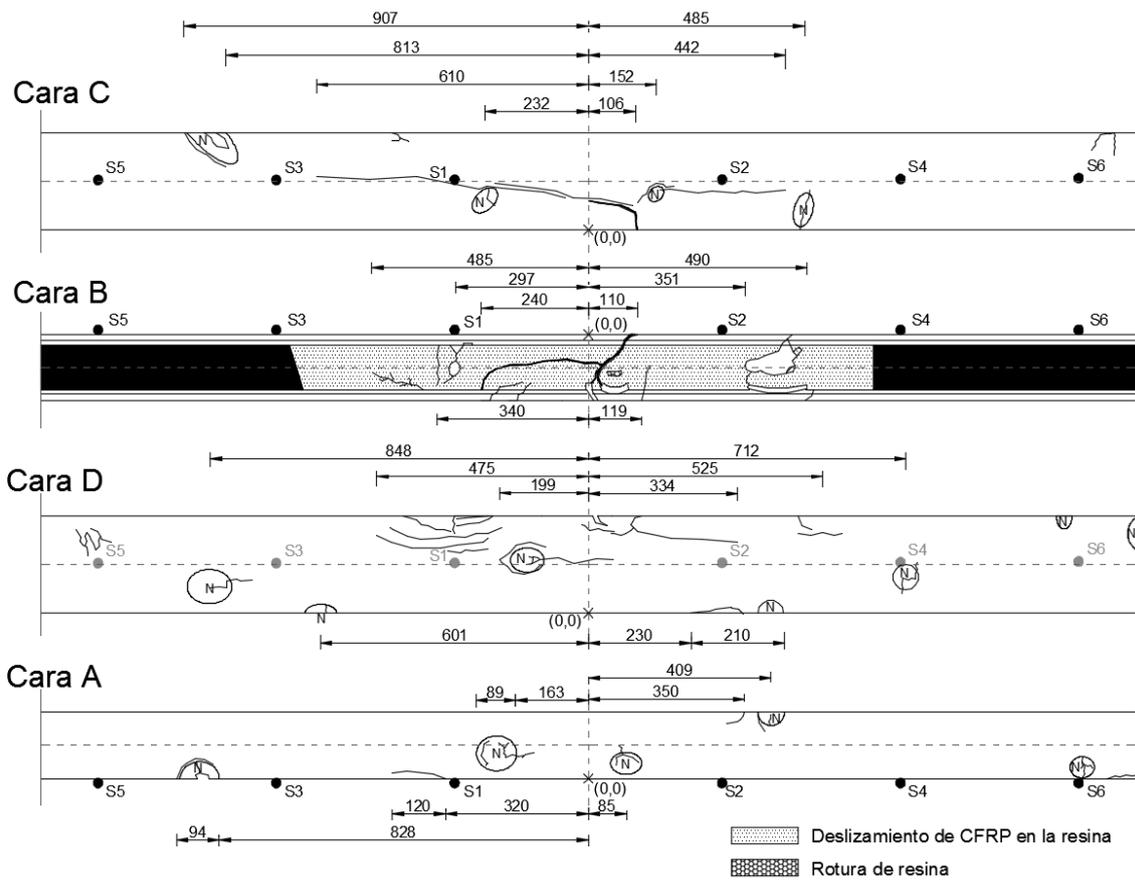


Figura 5.61. Esquema de daños de la viga LRD2. Cotas en mm.

Se muestra en la Figura 5.62 la evolución de los eventos y energía de EA en los tramos de carga ya comentados anteriormente.

Desde el **Tramo 2** (de 3 – 53% de la carga máxima) ya se apreciaron con claridad las tres zonas de EA provocadas por los fallos antes citados.

En el **Tramo 3** (de 53 – 88% de la carga máxima) estas zonas se acentuaron en la misma proporción que en el tramo 2, siendo la central la que destacó con respecto al resto.

A partir del **Tramo 4** (de 88 – 97,5% de la carga máxima) fue la zona izquierda, de [-60, -30] cm la que registró un mayor número de eventos y energía provocada, quizás, por la deslaminación y la rotura de la resina en ese lugar.

En el último tramo volvió a ser la zona central la que registró un mayor número de eventos y energía, posiblemente, anunciando la rotura final de la viga por la grieta ya comentada anteriormente y situada en [0, 11] cm.

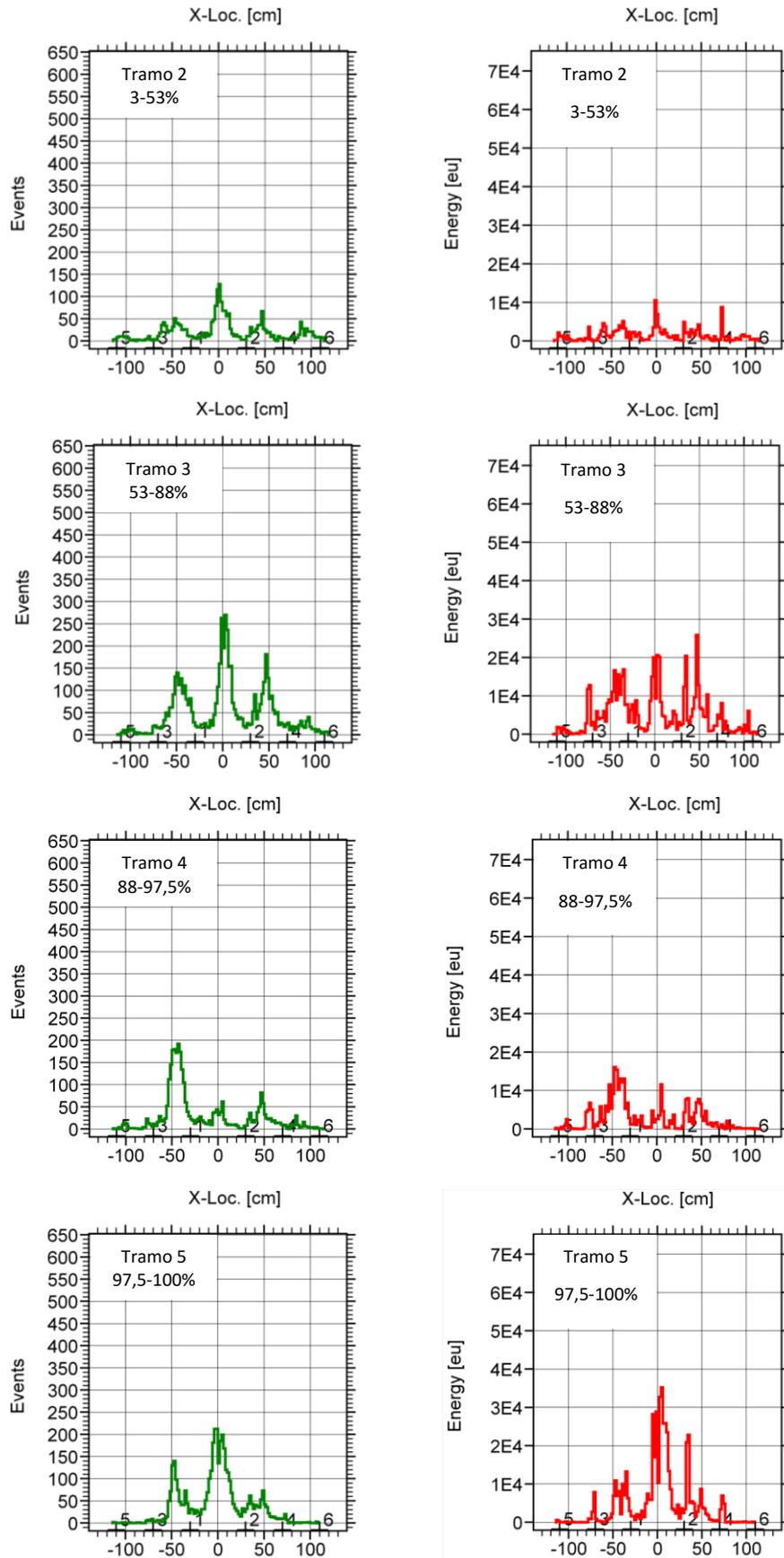


Figura 5.62. Izquierda: Eventos localizados de EA respecto al eje de la viga LRD2. Derecha: Energía de EA respecto al eje de la viga.

Se representa en la Figura 5.63 la amplitud frente a la duración de los *hits* registrados en cada tramo de carga (verde) comparados con los obtenidos durante todo el ensayo (violeta). Se observa que fue durante el tramo 3 durante el que se registraron más *hits* y el tramo 2 durante el que menos, lo cual fue lo más habitual en todas las vigas.

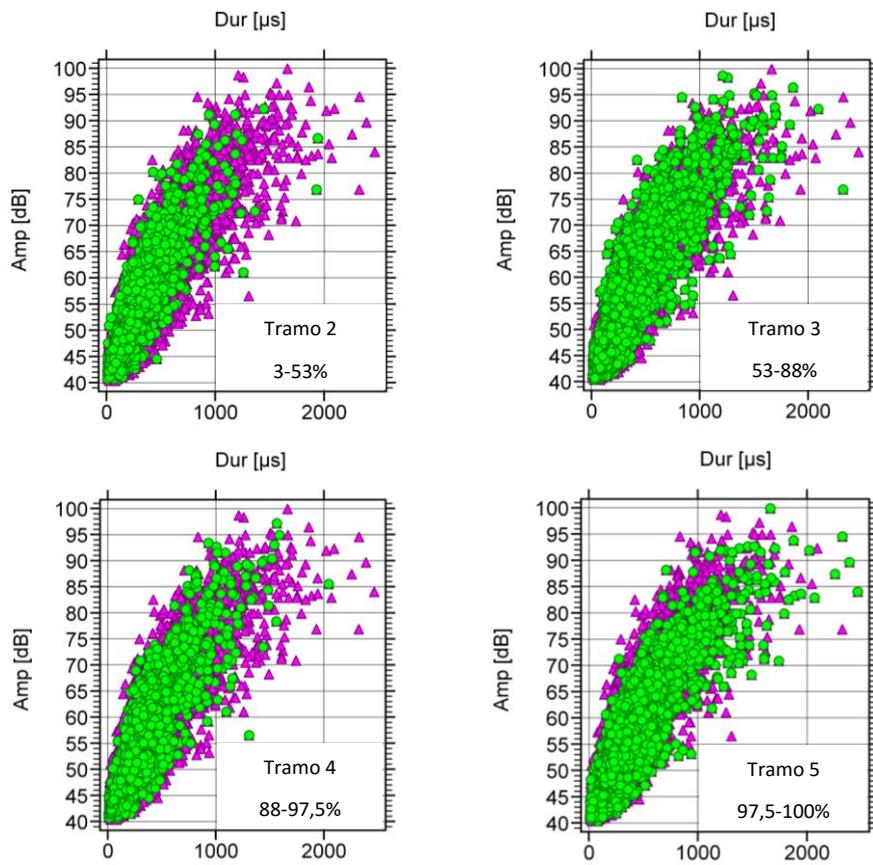


Figura 5.63. Amplitud frente a duración en correlación. Verde: *Hits* en cada tramo de carga. Violeta: *Hits* de todo el ensayo. Viga LRD2.

A modo de resumen se muestran en las Figuras 5.64-5.75 los eventos y energía de EA localizada junto a los daños observados en las vigas.

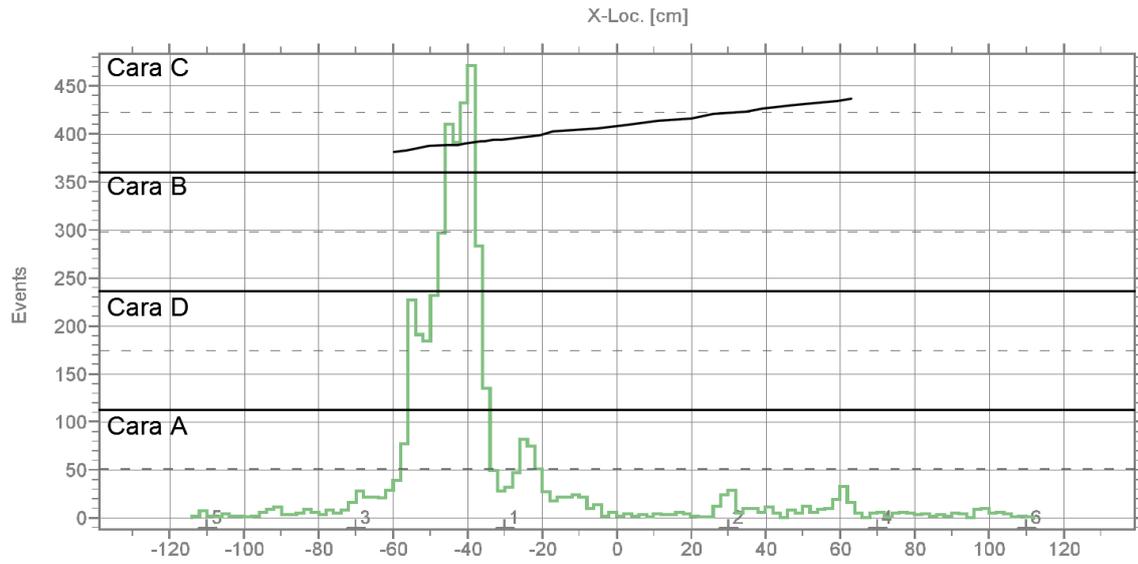


Figura 5.64. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR1.

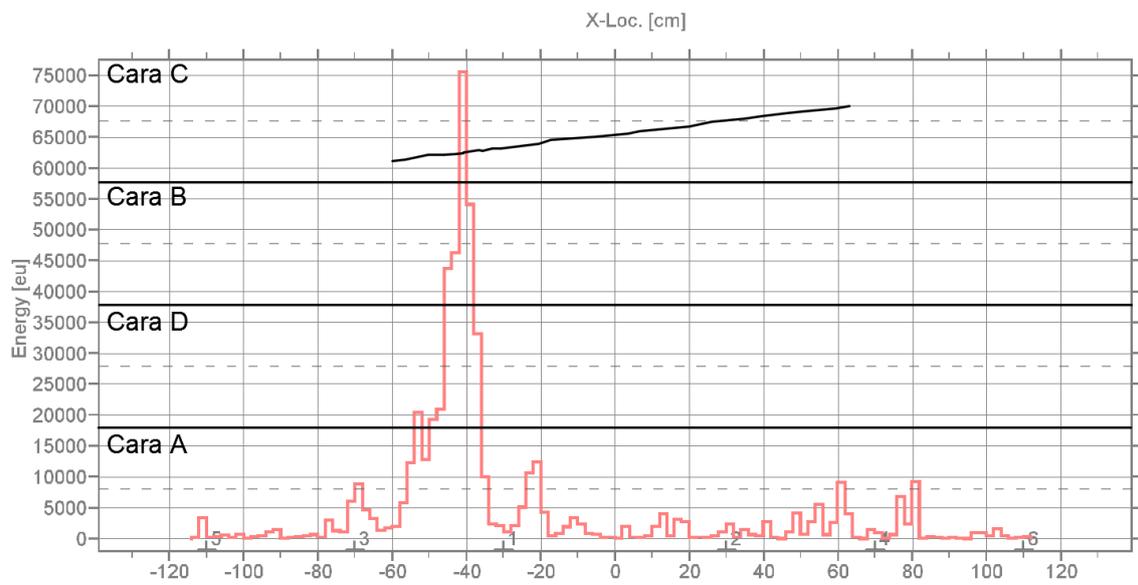


Figura 5.65. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR1.

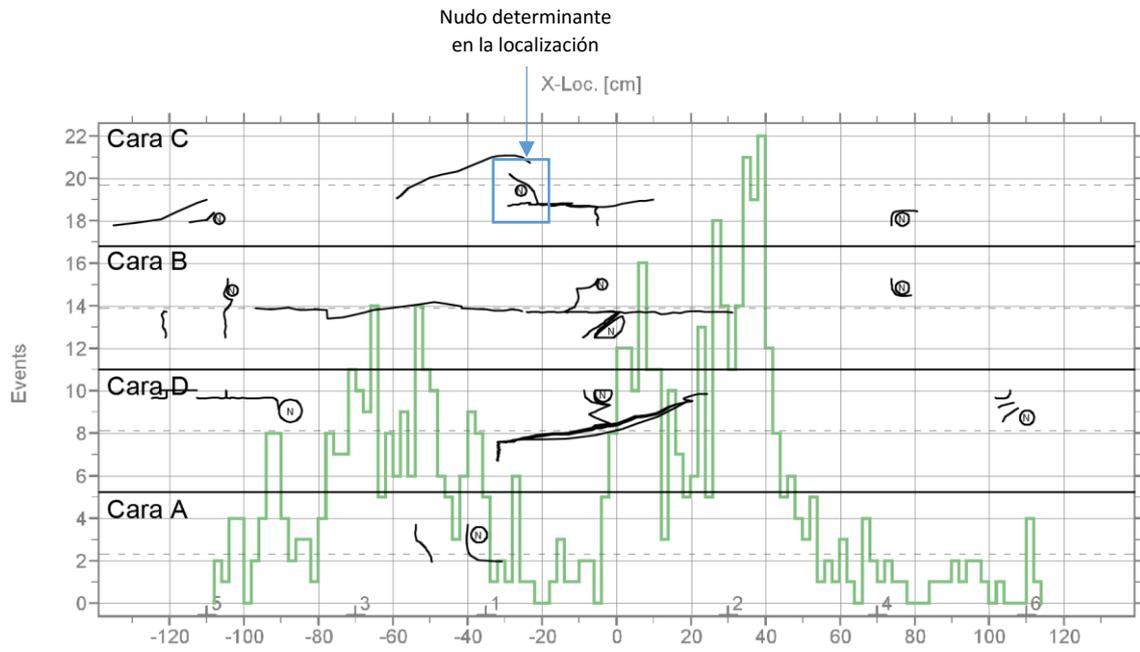


Figura 5.66. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR2.

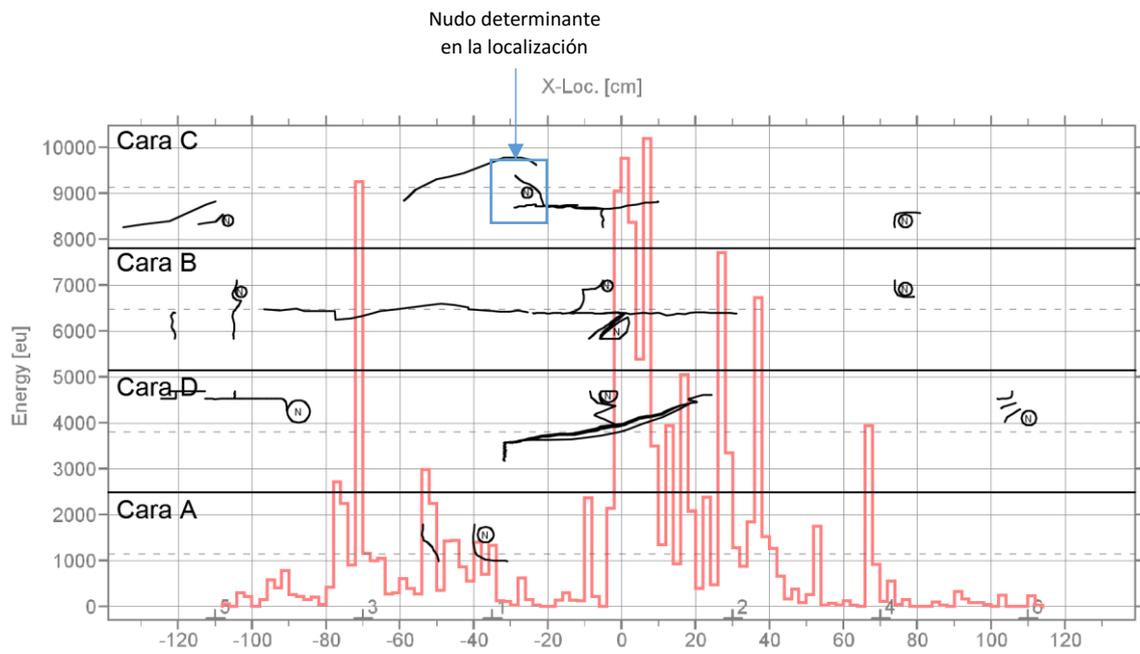


Figura 5.67. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga SR2.

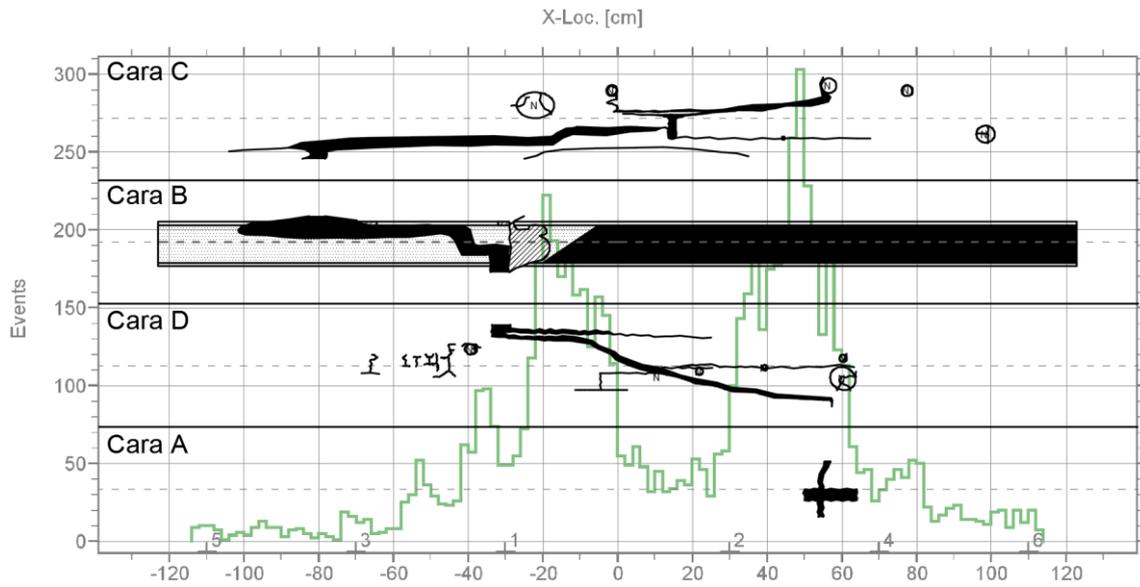


Figura 5.68. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS1.

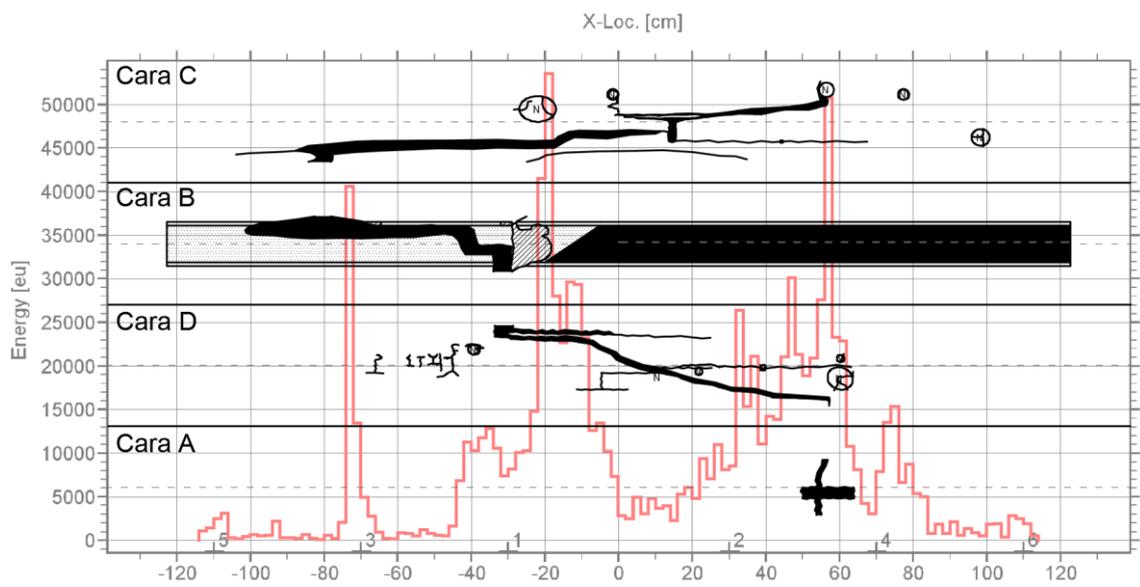


Figura 5.69. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS1.

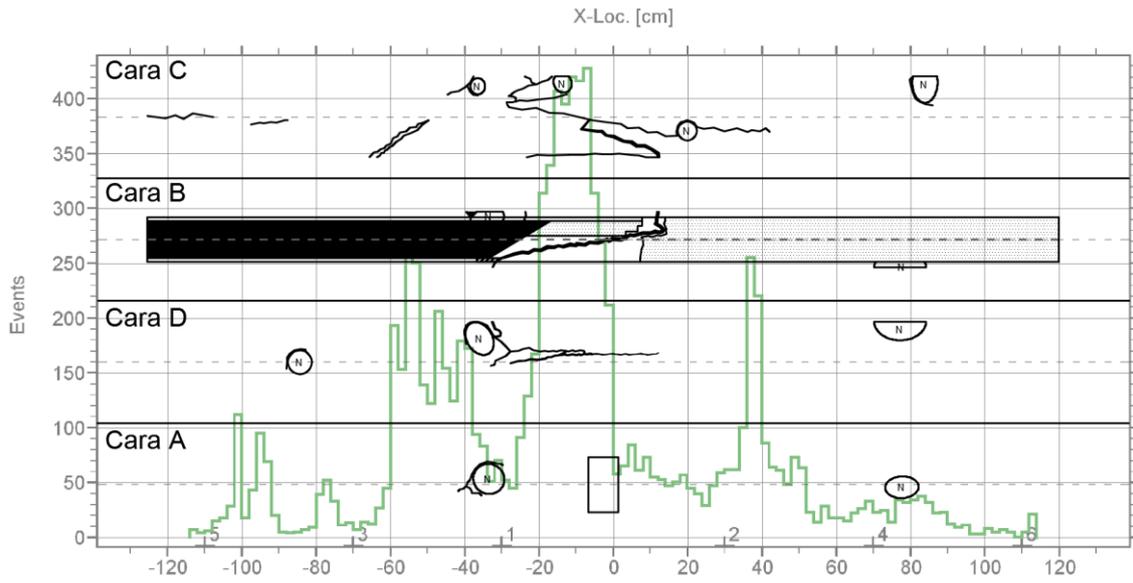


Figura 5.70. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS2.

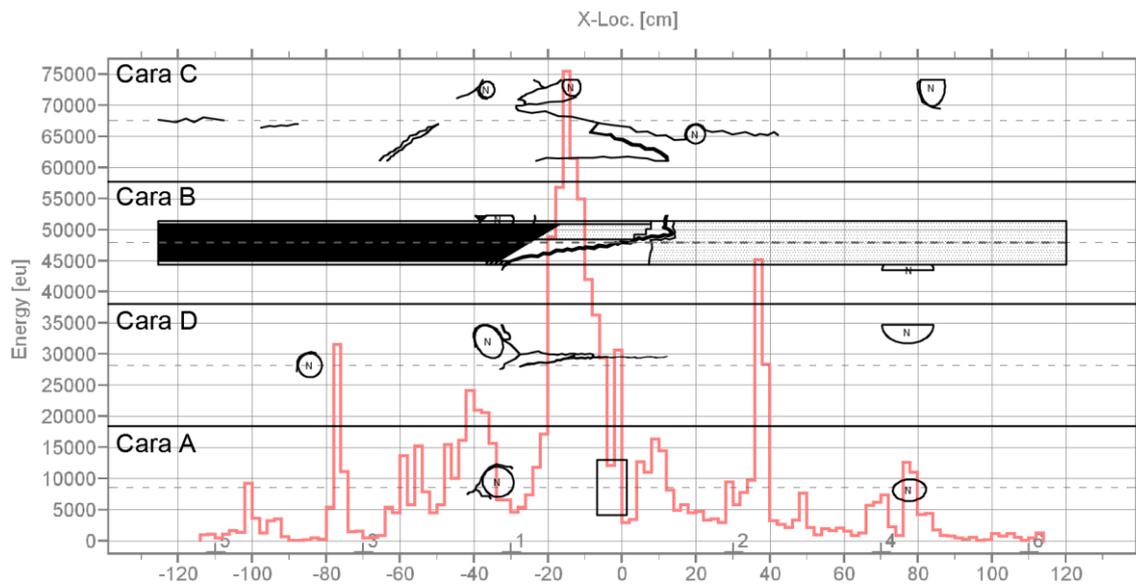


Figura 5.71. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRS2.

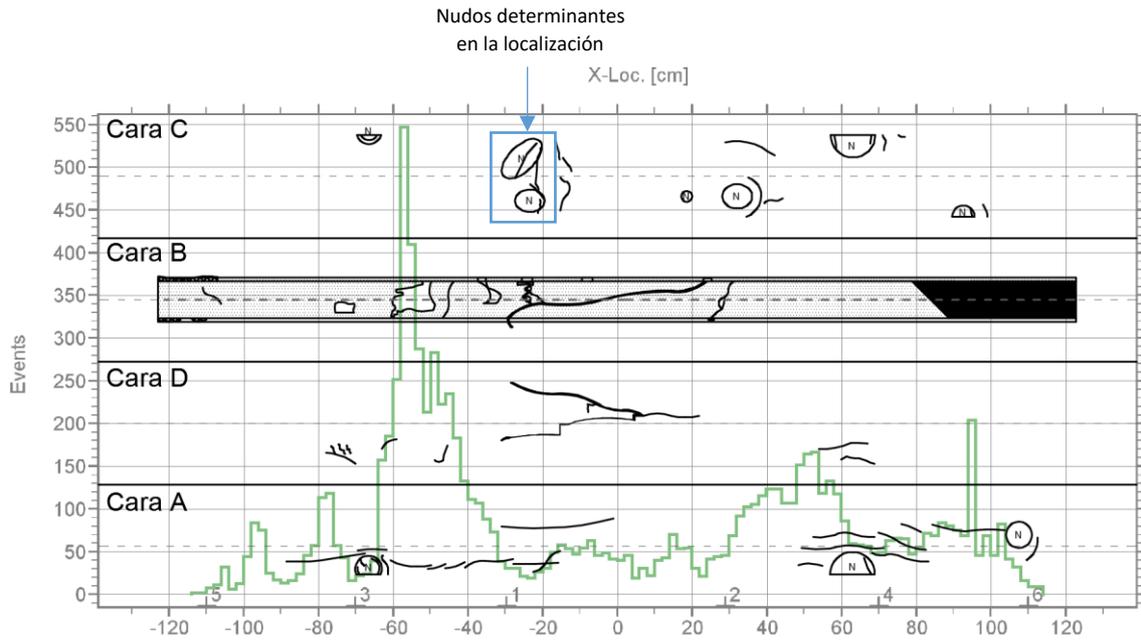


Figura 5.72. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD1.

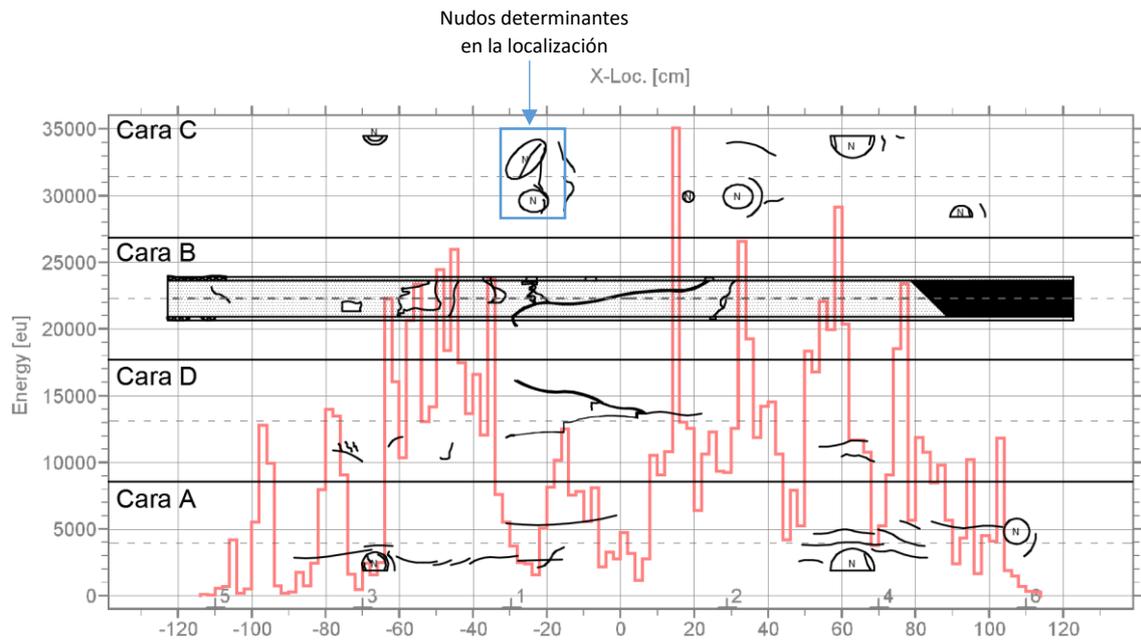


Figura 5.73. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD1.

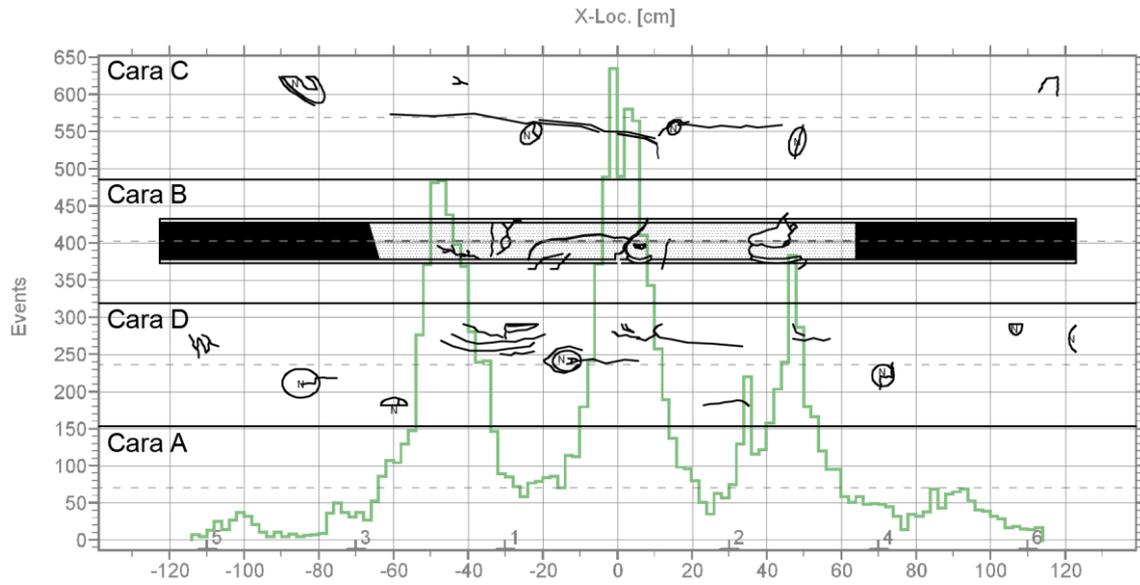


Figura 5.74. Eventos localizados y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD2.

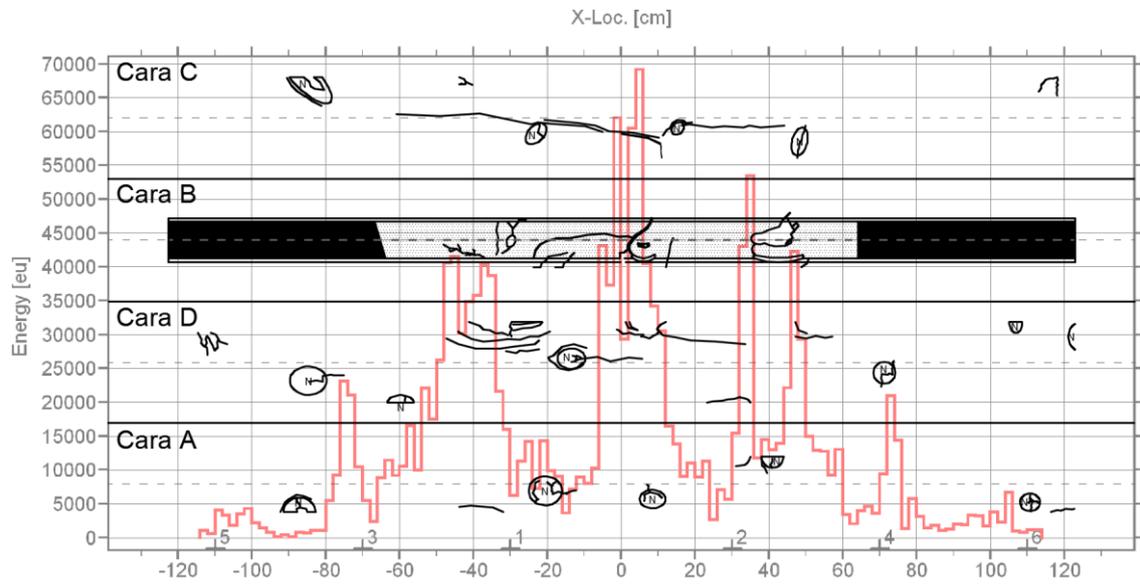


Figura 5.75. Energía localizada y daños observados a lo largo del eje de la viga. Viga LRD2.

---

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSIONES

Como conclusión general se ha demostrado la validez de la relación entre la evaluación con EA y los fallos generados en vigas de madera con y sin refuerzo de CFRP. Confirmado el funcionamiento del método de EA respecto a la localización de fallos con el software comercial *Vallen Systeme* se han podido extraer una serie de conclusiones de los datos experimentales analizados:

- En lo referente al método de EA se ha establecido una clara relación entre el crecimiento de los eventos y la energía de EA como consecuencia del crecimiento de los fallos (nudos, fisuras, grietas, rotura de resina, deslaminación, etc.) en las vigas de madera con y sin refuerzo de CFRP.
- En cuanto a la localización de los fallos queda demostrado que la velocidad de propagación de la onda en cada viga, al ser la madera muy heterogénea, es distinta y, por tanto, se hace necesario un análisis exhaustivo previo para conseguir una aproximación fiable. Además, el hecho de que la viga contenga nudos de gran tamaño influye directamente en la atenuación de las ondas y, por consiguiente, en la localización de las fuentes de EA en la madera mediante el método de EA. Tener en consideración este hecho es de vital importancia, puesto que ha quedado demostrado que la localización de fallos es errónea si un sensor se encuentra cerca de un nudo. Sin embargo, se ha puesto de manifiesto que con el cálculo de la incertidumbre (LUCY) se pueden determinar las fuentes erróneas en la localización. Por consiguiente, se considera de gran importancia realizar un estudio de la atenuación previo para conseguir una buena localización.
- Ha quedado demostrado, por tanto, que la atenuación en la madera aunque es similar por regla general ( $50 \text{ dB}_{AE}/\text{m}$  aproximadamente), puede ser muy cambiante de una zona a otra en función de los daños que presente. En concreto, caben destacar los nudos como factor determinante en la atenuación de las ondas, pudiendo incrementarla en  $24 \text{ dB}_{AE}$ , tal y como ocurre en la viga SR2. Por otra parte, se ha constatado que la atenuación en el CFRP es considerablemente menor que en la madera, del orden de  $31 \text{ dB}_{AE}/\text{m}$ .
- Respecto a los fallos en la viga, se ha demostrado que desde el comienzo de la carga en el **Tramo 2** (3 - 8,9% hasta 50 - 90% de la carga máxima aproximadamente) se localizan las zonas en las cuales se producen los fallos que originan la rotura de la viga. Esto cobra gran importancia en el aspecto de la rehabilitación, pues se pueden conocer con bastante antelación las zonas susceptibles al fallo de la viga, pudiendo reforzarlas, con el consiguiente ahorro económico.
- Ha quedado demostrado, además, que el efecto Kaiser se cumple en las vigas de madera antigua, no comenzando la EA hasta superada la carga máxima de trabajo anterior; en el caso de estas vigas entre 100 y 200 kg de carga. Esto proporciona información muy valiosa sobre las estructuras de madera en las cuales se desconocen las cargas que han soportado durante su vida útil.

## 6.2. TRABAJOS FUTUROS

Los trabajos futuros a desarrollar son:

- Desarrollo de un método de localización tridimensional de fallos en estructuras de madera mediante EA.
- Determinar y localizar las señales de EA producidas por la deslaminación entre la madera y el CFRP con el objetivo de predecir con mayor precisión el momento de fallo en estructuras de madera.

---

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Suárez Vargas, E. (2015). *Rehabilitación de vigas de madera mediante refuerzos de material compuesto laminado de fibra de carbono (CFRP). Comportamiento mecánico y evaluación de fallos con emisión acústica*. Granada: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.
- [2] Rescalvo Fernández, F. (2014). *Desarrollo y aplicación de un programa de localización tridimensional de fuentes de emisión acústica (AELOC)* (Diplomatura). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.
- [3] Gallego Molina, A. & Martínez González, E. (2015). *Emisión Acústica Niveles I y II*. Madrid: Fundación Confemetal.
- [4] AENOR: Norma UNE-EN 1330-9:2010. (2010). *Aenor.es*. Retrieved 28 July 2016, from <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0044688#.V5nkjmiLShd>
- [5] Moreno Bazán, Á. (2015). *Caracterización y adherencia madera antigua-fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares* (Grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.
- [6] Wolfram, S. (1987). *Mathematica Wolfram* (Version Mathematica 5.0). Champaign: Wolfram.
- [7] Vallen, H. (1986). *Vallen AE-Suite Software* (Versión R2008.0915). Icking: Vallen Systeme.
- [8] Berbel Román, E. (2016). *Implantación del CFRP como refuerzo de madera estructural de gran escuadría* (Grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.
- [9] *C.I.Te.Q - Universidad Tecnológica Nacional*. (2016). *Investigacion.frc.utn.edu.ar*. Retrieved 28 July 2016, from <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/LVDT/lvdt.pdf>