

Mejora de la caracterización mecánica de la madera estructural mediante el análisis espectral de los registros del georradar

Doctorando

Carolina Caballero Arce

Directores de la Tesis

Javier Benlloch Marco

Francisco García García

Tesis doctoral

Programa **Patología del hormigón**

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

Noviembre **2015**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Índice

DE LA TESIS

Índice de la tesis.....	3
Índice de tablas, figuras y gráficos.....	5
Agradecimientos.....	13
Resumen.....	15
<i>Resum</i>	17
<i>Summary</i>	19
1. Introducción.....	21
2. Objetivo.....	31
3. Estado de la cuestión.....	33
3.1. Marco general.....	33
3.1.1. Aspectos generales relacionados con las estructuras de madera y la presencia de nudos	36
3.2. Antecedentes	39
3.2.1. Ensayos no destructivos y la clasificación visual.....	43
3.2.1.1. Análisis de la clasificación mecánica.....	45
3.2.1.2. Análisis del resistógrafo.....	46
3.2.1.3. Análisis de la penetrómetro (Pilodyn) y el arranque de tornillo (MAT).....	48
3.2.1.4. Análisis del ultrasonidos o método de transmisión de onda.....	49
3.2.1.5. Análisis del método de vibraciones.....	53
3.2.1.6. Análisis de termografía infraroja (cámara térmica).....	55
3.2.1.7. Análisis métodos nucleares: radiografía y tomografía computerizada	56
3.2.1.8. Análisis del georradar.....	57
4. Plan experimental.....	61
4.1. Equipo humano y emplazamiento.....	61
4.2. Equipo material.....	62

4.2.1. Pequeño material.....	62
4.2.2. Maquinaria para los ensayos.....	62
4.3. Material a ensayar.....	62
4.4. Metodología general y desarrollo.....	64
4.4.1. Estudio bibliográfico.....	65
4.4.2. Técnicas aplicadas.....	66
4.4.2.1. Aplicación de la técnica de la clasificación visual.....	66
4.4.2.2. Aplicación de la técnica del georradar.....	68
4.4.2.3. Ensayo de la resistencia a flexión axial.....	68
5. Discusión de los resultados obtenidos.....	69
5.1. Metodología y justificación de la misma	69
5.1.1. Selección de los radargramas a analizar: Radargamas de Canto.....	70
5.1.2. Selección de la zona a analizar dentro de cada radargrama: Zonas A y B.....	71
5.1.3. Procesado de los radargramas y análisis de los espectros.....	72
5.1.4. Análisis espectral.....	73
5.2. Identificación de defectos	77
5.3. Fiabilidad y precisión.....	102
5.4. Influencia del nudo en la resistencia mecánica de la madera estructural.....	165
6. Conclusiones.....	167
6.1. Aplicación de resultados.....	168
6.2. Líneas futuras de investigación.....	169
Bibliografía de la tesis.....	171
Bibliografía de las tablas, figuras y gráficos.....	183
Anexo 1. Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama.....	191
A.1.1. Análisis de las vigas del grupo PS1.....	191
A.1.2. Análisis de las vigas del grupo PS2.....	226

Índice

DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS

Tablas

Tabla 1. Tabla 3 de la Norma UNE 56544 : 2011 – Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70\text{cm}$	67
Tabla 2. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-1.....	108
Tabla 3. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-5.....	110
Tabla 4. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-6.....	112
Tabla 5. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-7.....	114
Tabla 6. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-11.....	116
Tabla 7. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-13.....	118
Tabla 8. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-19.....	120
Tabla 9. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-25.....	122
Tabla 10. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-26.....	124
Tabla 11. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-28.....	126
Tabla 12. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-3.....	128
Tabla 13. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-4.....	130
Tabla 14. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-9.....	132
Tabla 15. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-10.....	134
Tabla 16. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-11.....	136
Tabla 17. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-14.....	138
Tabla 18. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-15.....	140
Tabla 19. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-16.....	142
Tabla 20. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-18.....	144
Tabla 21. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-19.....	146
Tabla 22. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-21.....	148

Tabla 23. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-22.....	150
Tabla 24. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-27.....	152
Tabla 25. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-28.....	154
Tabla 26. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-29.....	156
Tabla 27. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-32.....	158
Tabla 28. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-36.....	160
Tabla 29. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-37.....	162
Tabla 30. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-38.....	164

Figuras

Figura 1. Forjado de madera de la Sala del Consulado del Mar, Lonja de Valencia.....	21
Figura 2. Bodegas Protos (Arquitecto Richard Rogers).....	21
Figura 3. Sitios Palafíticos Prehistóricos de los Alpes.....	21
Figura 4. Choza Klóketen, Pampa argentina.....	21
Figura 5. Hipótesis de los primeros refugios construidos con troncos o ramas recogidos del suelo.....	21
Figura 6. Viviendas de la tribu Korowai, Papua Nueva Guinea.	22
Figura 7. Choza Bakka, Argentina.....	22
Figura 8. Pilar de madera del Assut (siglos VI y III a.n.e.) hallado en un yacimiento protohistórico del curso inferior del Ebro.....	22
Figura 9. Kizhi Pogost, Rusia. Iglesia Ortodoxa construida íntegramente en madera en1714.....	23
Figura 10. Arquitectura tradicional en la Vera de Extremadura.....	23
Figura 11. Madera empleada en la carpintería de los cerramientos exteriores. Casa Batlló de Gaudí, Barcelona.....	23
Figura 12. La Casa Bethlemen de Schwyz tiene más de 700 años, queda en la Suiza central, considerada como la casa de madera más antigua en Europa.....	23
Figura 13. Catedral Cristo de Luz, California. Estructura en madera resistente a los terremotos.....	24

Figura 14. Nave en Murgue (Álava) 1983. Proyectos OTMO.....	24
Figura 15. Detalle de una policromía perteneciente a un forjado del Alfarje mudéjar del Monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos) fines del Siglo XIV.....	24
Figura 16. La Canaleta, la escuela de madera más grande de España (Vila-Seca, Tarragona) con 3.500 metros cuadrados.....	25
Figura 17. Actualmente en Sevilla se halla la estructura realizada en madera más grande del mundo, el Metropol Parasol.....	25
Figura 18. Primer edificio de 6 alturas en España íntegramente realizado con madera, ubicado en <i>Lleida</i>	25
Figura 19. Vivienda <i>Korowai</i> sobre varas de madera.....	25
Figura 20. Esquema de aprovechamiento de madera aserrada.....	26
Figura 21 y 22. Viga de gran escuadría, del techo de la planta baja de la sala de comercio del consulado del mar (Lonja de Valencia).....	27
Figura 23. Material y métodos para la clasificación estructural.....	28
Figura 24. Esquema y dimensiones de referencia en piezas de madera con fendas según la UNE 56544.....	34
Figura 25. Esquema de desarrollo de nudos en la sección transversal de un tronco.....	36
Figura 26. Imagen de ensayo de clasificación mecánica.....	45
Figura 27. Clasificación mecánica. Esquema <i>Computermatic</i>	45
Figura 28. Clasificación mecánica. Esquema <i>Cook Bolinder</i>	45
Figura 29. Resistograma de madera de <i>P. sylvestris</i>	46
Figura 30. Imagen del Pilodyn.....	48
Figura 31. Equipo de arranque de tornillo.....	48
Figura 32. Esquema de equipo de medida.....	49
Figura 33. Ensayo de vibraciones.....	53
Figura 34. Ídem.....	53
Figura 35. Ídem.....	53
Figura 36. Termografía de un techo de madera.	55
Figura 37. Imagen de un muro construido mediante entramado de madera.....	55

Figura 38. Identificación de humedad.....	55
Figura 39. Sección transversal de una sección de un tronco de madera.....	56
Figura 40. Reconstrucción volumétrica de la sección del tronco.....	56
Figura 41. Sistemas de referencia empleados para la clasificación visual y el georradar.....	66
Figura 42. No es posible identificar los nudos 4 y 5 (x=88cm) de la cara comprimida de manera visual en el radargama de viga PS1-19.	69
Figura 43. Artesonado de madera de la Sala del Consulado del Mar - Lonja de Valencia.	70
Figura 44. Sección constructiva de un forjado tradicional de viguetas de hormigón y bovedilla cerámica.....	70
Figura 45. Detalle gráfico de área que abarca la señal del GPR.....	70
Figura 46. Esquema de las piezas a estudiar divididos por zonas.	71
Figura 47. Espectro en la zona del caballete, correspondiente a la viga PS2-27.	71
Figura 48. Viga Ps2-19. Esquemas de onda GPR atravesando un medio material heterogéneo ΣR	74
Figura 49. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS1-11.....	77
Figura 50. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=30cm.....	78
Figura 51. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=35cm.....	79
Figura 52. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=56cm.....	80
Figura 53. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=77cm.....	81
Figura 54. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=93cm.....	82
Figura 55. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=115cm.....	83
Figura 56. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS1-19.....	84
Figura 57. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: x=41cm.....	85

Figura 58. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=52\text{cm}$	86
Figura 59. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=88\text{cm}$	87
Figura 60. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=101\text{cm}$	88
Figura 61. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=126\text{cm}$	89
Figura 62. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS2-4.....	90
Figura 63. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=52\text{cm}$	91
Figura 64. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=72\text{cm}$	92
Figura 65. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=96\text{cm}$	93
Figura 66. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=108\text{cm}$	94
Figura 67. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS2-22.....	95
Figura 68. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=36\text{cm}$	96
Figura 69. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=62\text{cm}$	97
Figura 70. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=88\text{cm}$	98
Figura 71. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=99\text{cm}$	99
Figura 72. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=115\text{cm}$	100
Figura 73. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=118\text{cm}$	101
Figura 74. Detalle del nudo de canto la viga PS1-1.....	108

Figura 75. Detalle de rotura por un nudo de la viga PS1-5.....	110
Figura 76. Detalle de rotura por dos nudos de la viga PS1-6.....	112
Figura 77. Detalle de rotura de la viga PS1-7, por una zona sin imperfecciones en superficie.....	114
Figura 78. Detalle del nudo de canto la viga PS1-11.....	116
Figura 79. Detalle de la rotura de la viga PS1-13, por una zona libre de imperfecciones en superficie.....	118
Figura 80. Detalle de la rotura de la viga PS1-19, por una zona libre de imperfecciones en superficie.....	120
Figura 81. Detalle de rotura de la viga PS1-25.....	122
Figura 82. Detalle del nudo de canto la viga PS1-26.....	124
Figura 83. Detalle de rotura de la viga PS1-28.....	126
Figura 84. Detalle de rotura de la viga PS2-3.....	128
Figura 85. Detalle de rotura de la viga PS2-4.....	130
Figura 86. Detalle del nudo de canto la viga PS2-9.....	132
Figura 87. Detalle de rotura de la viga PS2-10.....	134
Figura 87. Detalle de rotura de la viga PS2-11.....	136
Figura 89. Detalle de rotura de la viga PS2-14.....	138
Figura 90. Detalle de rotura de la viga PS2-15.....	140
Figura 91. Detalle del nudo de canto la viga PS2-16.....	142
Figura 92. Detalle de rotura de la viga PS2-18.....	144
Figura 93. Detalle de rotura de la viga PS2-19.....	146
Figura 94. Detalle del nudo de canto la viga PS2-21.....	148
Figura 95. Detalle de rotura de la viga PS2-22.....	150
Figura 96. Detalle de rotura de la viga PS2-27.....	152
Figura 97. Detalle de rotura de la viga PS2-28.....	154
Figura 98. Detalle de rotura de la viga PS2-29.....	156
Figura 99. Detalle de rotura por nudo de canto la viga PS2-32.....	158

Figura 100. Detalle de rotura por nudo de la viga PS2-36.....	160
Figura 101. Detalle de rotura por nudo de canto de la viga PS2-37.....	162
Figura 102. Detalle de rotura por un nudo de la viga PS2-38.....	164

Gráficos

Gráfico 1. Detalle comparación de espectros.....	69
Gráfico 2. Grafica superposición de espectros en dos puntos (zona de una viga con nudos y zona de dicha viga sin nudos).....	75
Gráfico 3. El primer espectro corresponde a una zona sin nudos en superficie de la viga PS2-37.....	76
Gráfico 4. Estadística identificación de nudos o bolsas de resina presentes en las superficies de las piezas. Viga por viga (filas) y en total (bola).....	102
Gráfico 5. Estadística identificación de nudos o bolsas de resina presentes en las superficies por donde rompe la viga. Viga por viga (filas) y en total (bola).....	103
Gráfico 6. Estadística identificación de irregularidades ocultas bajo la superficie, por las que posteriormente rompe la viga. Viga por viga (filas) y en total (bola).....	104
Gráfico 7. Porcentaje de identificación de nudos presentes en la viga.....	105
Gráfico 8. Número de nudos identificados.....	105
Gráfico 9. Porcentaje de identificación de nudos por los que rompe la viga.....	106
Gráfico 10. Número de nudos identificados por los que rompe la viga.....	106
Gráfico 11. Identificación de nudos en la viga PS1-1. Clasificación visual y estadísticas.	107
Gráfico 12. Identificación de nudos en la viga PS1-5. Clasificación visual y estadísticas.	109
Gráfico 13. Identificación de nudos en la viga PS1-6. Clasificación visual y estadísticas.	111
Gráfico 14. Identificación de nudos en la viga PS1-7. Clasificación visual y estadísticas.	113
Gráfico 15. Identificación de nudos en la viga PS1-11. Clasificación visual y estadísticas.	115
Gráfico 16. Identificación de nudos en la viga PS1-13. Clasificación visual y estadísticas.	117
Gráfico 17. Identificación de nudos en la viga PS1-19. Clasificación visual y estadísticas.	119
Gráfico 18. Identificación de nudos en la viga PS1-25. Clasificación visual y estadísticas.	121
Gráfico 19. Identificación de nudos en la viga PS1-26. Clasificación visual y estadísticas.	123

Gráfico 20.	Identificación de nudos en la viga PS1-28. Clasificación visual y estadísticas.	125
Gráfico 21.	Identificación de nudos en la viga PS2-3. Clasificación visual y estadísticas.	127
Gráfico 22.	Identificación de nudos en la viga PS2-4. Clasificación visual y estadísticas.	129
Gráfico 23.	Identificación de nudos en la viga PS2-9. Clasificación visual y estadísticas.	131
Gráfico 24.	Identificación de nudos en la viga PS2-10. Clasificación visual y estadísticas.	133
Gráfico 25.	Identificación de nudos en la viga PS2-11. Clasificación visual y estadísticas.	135
Gráfico 26.	Identificación de nudos en la viga PS2-14. Clasificación visual y estadísticas.	137
Gráfico 27.	Identificación de nudos en la viga PS2-15. Clasificación visual y estadísticas.	139
Gráfico 28.	Identificación de nudos en la viga PS2-16. Clasificación visual y estadísticas.	141
Gráfico 29.	Identificación de nudos en la viga PS2-18. Clasificación visual y estadísticas.	143
Gráfico 30.	Identificación de nudos en la viga PS2-19. Clasificación visual y estadísticas.	145
Gráfico 31.	Identificación de nudos en la viga PS2-21. Clasificación visual y estadísticas.	147
Gráfico 32.	Identificación de nudos en la viga PS2-22. Clasificación visual y estadísticas.	149
Gráfico 33.	Identificación de nudos en la viga PS2-27. Clasificación visual y estadísticas.	151
Gráfico 34.	Identificación de nudos en la viga PS2-28. Clasificación visual y estadísticas.	153
Gráfico 35.	Identificación de nudos en la viga PS2-29. Clasificación visual y estadísticas.	155
Gráfico 36.	Identificación de nudos en la viga PS2-32. Clasificación visual y estadísticas.	157
Gráfico 37.	Identificación de nudos en la viga PS2-36. Clasificación visual y estadísticas.	159
Gráfico 38.	Identificación de nudos en la viga PS2-37. Clasificación visual y estadísticas.	161
Gráfico 39.	Identificación de nudos en la viga PS2-38. Clasificación visual y estadísticas.	163

Agradecimientos

DE LA TESIS

Quisiera que las siguientes líneas sirvieran de agradecimiento a las personas que me han acompañado en esta tarea de estudio e investigación que al fin se ha visto materializada en la presente tesis doctoral.

Agradezco el apoyo personal y profesional recibido por el personal del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación de la UPV y por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPV, y muy sinceramente a mis directores de la tesis Javier Benlloch Marco y Francisco Gracia García, por su dedicación y aportaciones, por su saber investigador y docente, y por su continua y cercana disponibilidad, por su apoyo moral y confianza depositada en mí.. Dos referentes a seguir en el camino que inicio.

Por otro lado agradezco el apoyo económico y material del Ministerio de Educación y Ciencia para el desarrollo del proyecto de investigación “*Integración de técnicas avanzadas no destructivas de evaluación de madera estructural*” (Ref: BIA-00342/2008) dentro del Plan Nacional de Investigación.

Por último, pero no menos importante, mi más profundo agradecimiento a mi familia, por su incondicional apoyo e interés en la tarea realizada y por su esfuerzo para que pudiese dedicarme a ella.

Resumen

DE LA TESIS

En la presente tesis se recoge el análisis, resultados y conclusiones del trabajo de investigación realizado en la aplicación del georradar para evaluar madera estructural por medio de métodos no destructivos.

El principal objetivo de esta tesis es la posible aplicación del georradar como técnica no destructiva para mejorar la actual clasificación visual de la madera estructural y mejorar así la evaluación de estructuras de madera a rehabilitar y reducir el descarte de madera estructural nueva en aserradero. Para ello se han ensayado piezas de madera nueva de *Pinus sylvestris* L, utilizando una metodología novedosa, que permite ser exportada y aplicada a otras especies de madera estructural.

Esta nueva metodología se basa en el análisis del espectro, y no en la búsqueda en el radargrama de la imagen del defecto de la madera. Esta nueva metodología va más allá de lo que se ha investigado hasta la fecha respecto al georradar y las imágenes de los radargramas (donde se intentaba identificar de manera visual en el radargrama defectos de la madera: nudos, fendas, bolsas de resina...mediante la obtención de una imagen y su interpretación). Supone un paso adelante en estudios del georradar, pues se han estudiado las propiedades electromagnéticas - espectro de frecuencia- posteriormente a la obtención de la imagen. Lo cual ha supuesto una mejora de la clasificación de la madera y su diagnóstico.

Para el análisis de las piezas se ha aplicado la clasificación visual conforme a las disposiciones de la norma UNE 56544:2011, posteriormente se ha realizado la lectura de las piezas aplicando el georradar y por último se han sometido a un ensayo de la resistencia a flexión axial. Una vez realizada la puesta en común de los resultados se han analizado los espectros de los radargramas, dando lugar a un resultado de fiabilidad y precisión del 97,05% en la identificación a través del georradar de singularidades presentes en la madera. Este alto porcentaje obtenido permite afirmar la posible aplicación del georradar en evaluación de madera estructural como método de ensayo no destructivo de manera complementaria y determinante.

Los resultados obtenidos permitirían la reducción del descarte de la madera estructural en aserradero y la utilización de esta técnica para evaluación estructural en estructuras de madera a rehabilitar in situ o en laboratorio. Finalmente se proponen las posibles aplicaciones de esta técnica y unas futuras líneas de investigación.

Resum

DE LA TESI

En la present tesi s'arreplega l'anàlisi, resultats i conclusions del treball d'investigació realitzat en l'aplicació del georradar per a avaluar fusta estructural per mitjà de mètodes no destructius.

*El principal objectiu d'esta tesi és la possible aplicació del georradar com a tècnica no destructiva per a millorar l'actual classificació visual de la fusta estructural i millorar així l'avaluació d'estructures de fusta a rehabilitar i reduir el descart de fusta estructural nova en serradora. Per a això s'han assajat peces de fusta nova de *Pinus sylvestris* L, utilitzant una metodologia nova, que permet ser exportada i aplicada a altres espècies de fusta estructural.*

Esta nova metodologia es basa en l'anàlisi de l'espectre, i no en la busca en el radargrama de la imatge del defecte de la fusta. Esta nova metodologia va més enllà del que s'ha investigat fins a la data respecte al georradar i les imatges dels radargrames (on s'intentava identificar de manera visual en el radargama defectes de la fusta: nucs, fendes, bosses de resina...) per mitjà de l'obtenció d'una imatge i la seua interpretació). Suposa un pas avant en l'estudis del georradar perquè s'han estudiat les propietats electromagnètiques -espectre de freqüència- posteriorment a l'obtenció de la imatge. La qual cosa ha suposat una millora de la classificació de la fusta i el seu diagnosi.

Per a l'anàlisi de les peces s'ha aplicat la classificació visual d'acord amb les disposicions de la norma UNE 56544:2011, posteriorment s'ha realitzat la lectura de les peces aplicant el georradar i finalment s'han sotmés a un assaig de la resistència a flexió axial. Una vegada realitzada la posada en comú dels resultats s'han analitzat els espectres dels radargrames, donant lloc a un resultat de fiabilitat i precisió del 97,05% en la identificació a través del georradar de singularitats presents en la fusta. Este alt percentatge obtingut permet afirmar la possible aplicació del georradar en avaluació de fusta estructural com a mètode d'assaig no destructiu de manera complementària i determinant.

Els resultats obtinguts permetrien la reducció del descart de la fusta estructural en serradora i la utilització d'esta tècnica per a avaluació estructural en estructures de fusta a rehabilitar in situ o en laboratori. Finalment es proposen les possibles aplicacions d'esta tècnica i unes futures línies d'investigació.



Abstract

OF THE THESIS

This thesis includes the analysis, results and conclusions of the research performed in the application of the ground penetrating radar to evaluate structural timber using non-destructive methods.

*The main objective of this thesis is the possible application of the ground penetrating radar as a non destructive technique for improving the current visual classification of structural wood and evaluation of wooden structures to rehabilitate and reduce the discard of new structural timber sawmill. For this purpose have been tested pieces of new wood of *Pinus sylvestris* L, using a new methodology, which allows to be exported and applied to other species of structural timber.*

This new methodology is based on the analysis of the spectrum, and not on the search of the image of the defect of wood //wood's defect in the radargrama. This new methodology goes beyond what has been investigated to date regarding the ground penetrating radar and the radargrams images (where it had tried to identify defects of wood visually in the radargama: splits, knots, resin pockets...) by obtaining an image and its interpretation). It is a step forward in the study of the ground penetrating radar, as it have been studied its electromagnetic properties - spectrum of frequency- subsequently to the obtaining of the image. Which was an improvement of wood classification and its diagnosis.

Visual classification has been applied to the analysis of the wooden parts, in accordance with the provisions of the standard UNE 56544:2011. Subsequently, the radar has been applied on the surface of the wood, and finally, it has been subjected to an axial flexural strength test. Once implementation of the results was carried out, the spectra of the radargrams have been analyzed, giving rise to a result of reliability and accuracy of 97,05% in the identification of singularities present in the wood by ground penetrating radar. This high percentage obtained allows to confirm the possible application of the ground penetrating radar in evaluation of structural timber as method of non-destructive testing, of complementary and decisive way.

The results would allow the reduction of the disposal of the structural timber sawmill and the use of this technique for structural evaluation structures of wood to rehabilitate on-site or in the laboratory. Finally, the possible applications of this technique and future lines of research are proposed.

1

Introducción

JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS



Fig.1. Forjado de madera de la Sala del Consulado del Mar, Lonja de Valencia. **Fig.2.** Bodegas Protos (Arquitecto Richard Rogers). Estructura en madera laminada. **Fig.3.** Sitios Palafíticos Prehistóricos de los Alpes. Han permitido estudiar la Vida del Neolítico y Edad del Bronce. **Fig.4.** Choza Klóketen, Pampa argentina.

La madera es un material ampliamente utilizado como elemento estructural dentro de la construcción de edificaciones y estructuras civiles. Se encuentra tanto en edificios e infraestructuras con siglos de antigüedad (figura 1) como en construcciones contemporáneas (figura 2), pues el fácil acceso y procesado de la materia prima la ha convertido en el principal y más extendido material estructural hasta la llegada del hormigón y del acero.

Junto con la piedra, es uno de los materiales más cálidos y evocadores que existen. Ha acompañado al hombre desde su origen (figura 3), utilizándose en utensilios cotidianos, herramientas y como material de construcción en viviendas. Sus propiedades físicas (resistencia, dureza variable, flexibilidad y fácil manufactura) y su facilidad de acceso en la naturaleza, hizo de ella un material idóneo para la construcción de los primeros refugios (Guardiola *et al.*, s.f.) (figura 4) (figura 5) fuera de las cuevas o habitáculos de piedras apiladas (EdCA, 2008).



Figura 5. Posibles primeros refugios construidos con troncos o ramas recogidos del suelo.

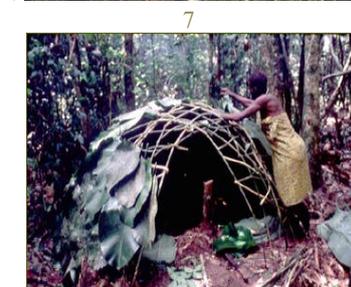


Fig. 6. Viviendas de la tribu Korowai, Papua Nueva Guinea. Viviendas de madera a 25m de altura sostenidas mediante troncos, o varas de madera. **Fig. 7.** Choza Bakka, Argentina. **Fig. 8.** Pilar de madera del Assut (siglos VI y III a.n.e.) hallado en un yacimiento protohistórico del curso inferior del Ebro.

Gracias a algunas poblaciones cuyo modo de vida perdura desde la época de piedra (como es el caso de los papúes de Nueva Guinea, (figura 6), y de algunas etnias aborígenes del Amazonas (figura 7), se sabe que las primeras estructuras de madera estarían formadas por ramas y troncos, utilizándose como soportes principales o formando la envolvente del espacio mismo a habitar (Borrás, 2010).

De estas primeras construcciones, lamentablemente, pocos restos arqueológicos⁸ han llegado hasta nuestros días, únicamente en contados casos en los que la madera se ha conservado en condiciones ambientales favorables (*C. i R. d'Arqueologia*, 2014) (figura 8).

A pesar de la imagen extendida de ciudades de ladrillo, piedra y mármol de las antiguas civilizaciones (persas, griegos o romanos), en origen estaban formadas por viviendas de madera, en las cuales se hacinaban familias que se calentaban y cocinaban con leña, lo que provocaba numerosos incendios⁹. La fácil combustión de ésta incrementó el uso de otros materiales más resistentes al fuego, como el adobe, la arcilla cocida y la piedra, sobre todo en edificios de gran entidad (en estos últimos además se buscaba diferenciarse del pueblo llano a través de la imagen de sus construcciones).

⁸ Pocos son restos de madera fosilizada que ha llegado hasta nuestros días. La presencia de oxígeno, la acidez del suelo, la actividad de los microorganismos y las variaciones de humedad madera, hacen que este material (compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina) no se conserve, degradándose hasta desaparecer (*C. i R. d'Arqueologia*, 2014).

⁹ El cuerpo de bomberos más antiguo de que se tiene noticia se constituyó, durante el mandato de Julio César; aunque es muy probable que en la antigua Mesopotamia y en Egipto existieran precedentes más antiguos (García, s.f.).



Fig. 9. Kizhi Pogost, Rusia. Iglesia Ortodoxa construida íntegramente en madera en 1714. **Fig. 10.** Arquitectura tradicional en la Vera de Extremadura. **Fig. 11.** Madera empleada en la carpintería de los cerramientos exteriores. Casa Batlló de Gaudí, Barcelona. **Fig. 12.** La Casa Bethlemen de Schwyz (Suiza), la casa de madera más antigua en Europa (700 años).

Se ha podido hallar vestigios en algunos casos y construcciones casi íntegras en otros, de construcciones civiles, palacios, templos (figuras 9) y casas (figura 10) que datan desde el siglo XX a.n.e. hasta el siglo XX n.e., pues fue uno de los materiales predilectos hasta la revolución industrial, la cual introdujo de manera masiva primero el acero y posteriormente el hormigón (aunque ya se hacía uso de morteros desde el Antiguo Egipto), desplazando a la madera hacia usos ornamentales (figura 11)(Manzaneque, s.f.).

En algunos países durante el siglo XX, tras una reciente época de ultra desarrollismo poco respetuosa con el medio ambiente, prácticamente dejó de construirse con madera. El hormigón, el acero y la construcción desmesurada de edificios relegaron el empleo de la madera a la carpintería, como material acabado y en casas prefabricadas de madera. La rehabilitación de edificios también se vio afectada por esta tendencia, sustituyendo piezas de madera, que podían ser reparadas, por otras de hormigón o acero (Basterra *et al*, 2005).

A pesar de que en la cuenca del Mediterráneo la madera nunca ha disfrutado de una buena reputación, ya que existe una percepción negativa sobre ella como material de construcción de alta peligrosidad ígnea, otros países nunca han dejado de hacer uso de ella. En el centro y el norte de Europa (figura 12) o en Norteamérica (figura 13)⁷ sigue siendo el principal material de construcción, pues está muy valorada por sus cualidades isotérmicas (Colorado, s.f.). Sin embargo en España la falta de empleo de la madera venía provocada por la falta de normativa y certificados de calidad que dieran seguridad al calculista y al usuario (Fernández-Golfín *et al.*, 1998).

⁷ El 90% de las viviendas unifamiliares de Estados Unidos, Canadá y Suecia poseen la estructura de madera, mientras que en otros países europeos es menor. (COLORADO, s.f.)

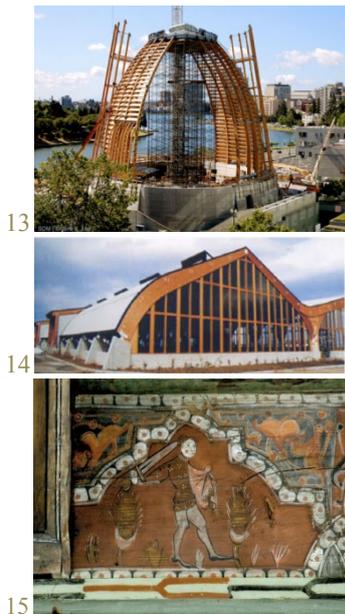


Fig. 13. Catedral Cristo de Luz, California. Estructura en madera resistente a los terremotos. **Fig. 14.** Nave en Murgue (Álava) 1983. Primera estructura de madera laminada, por influencia de los centros comerciales franceses. **Fig. 15.** Detalle de una policromía perteneciente a un forjado del Alfarje mudéjar del Monasterio de Santo. Domingo de Silos(Burgos) fines del siglo xiv,

Aunque a partir de los años 90 se incrementó el empleo de la madera estructural mayoritariamente en edificaciones singulares (figura 14), actualmente existe una tendencia de recuperación de la madera como material estructural, pero todavía estamos a la cola de Europa, sólo por delante de Portugal y Grecia. La gran diferencia con los países del centro y el norte de Europa es el empleo en edificación residencial, donde un gran porcentaje de las estructuras están construidas con este material (Promateriales, s.f.).

Actualmente todavía existe bastante desconocimiento sobre construcción en madera, pues su tradición prácticamente se ha perdido, lo que ha conducido a un abandono de la cultura de construcción en madera. Esto se debe al abusivo empleo de otros materiales y a la falta de difusión de sus capacidades técnicas y mecánicas por parte de las Escuelas Técnicas durante un largo periodo del siglo XX, dejando prácticamente en manos de los fabricantes su información y difusión (Basterra *et al.*, 2005) (Promateriales, s.f.). La entrada en vigor del Eurocódigo (1995), del CTE (2006), de la normas UNE y la falta de información específica sobre la materia, propiciaron numerosos estudios de investigación y publicaciones, los cuales están permitiendo construir con madera bajo criterios de calidad certificados (Fernández-Golfín *et al.*, 1998).

Por una parte, en rehabilitación de edificios y estructuras existe cada vez más una concienciación entre los profesionales para restaurar los elementos constructivos de madera, estudiándolos mediante métodos lo menos invasivos posible, y sustituyendo por madera en buen estado únicamente aquellas piezas o aéreas que estén deterioradas, pues el valor de la pieza de madera antigua que llega hasta nuestros aumenta su valor a medida que perdura en el tiempo (figura15).



16



17



18



19

Fig. 16. La Canaleta, la escuela de madera más grande de España (Vila-Seca, Tarragona) con 3.500 metros cuadrados. **Fig. 17.** Actualmente en Sevilla se halla la estructura realizada en madera más grande del mundo, el Metropol Parasol. **Fig. 18.** Primer edificio de 6 alturas en España íntegramente realizado con madera. Ubicado en Lleida. **Fig. 19.** Vivienda Korowai sobre varas de madera.

Se podría afirmar que ha remitido la tendencia de sustitución sistemática de elementos constructivos de madera en obra de rehabilitación por elementos metálicos, una práctica poco respetuosa con las estructuras históricas que sobreviven a nuestros días.

En nueva construcción la madera está volviendo a ganar terreno en las estructuras. Las más comunes son aquellas de edificaciones unifamiliares, en edificios públicos (figura 16), comerciales o deportivos y estructuras civiles (figura 17). En cuanto a edificaciones residenciales en altura, son contados los casos en los que la estructura es íntegra de madera (figura 18) (Ecohabitar, 2013).

Sin embargo todas estas estructuras de madera contemporáneas, de obra nueva y algunas de rehabilitación, tienen algo en común: se trata de madera laminada encolada, en algunos casos recubierta de una capa de carbono, para aislar la estructura y protegerla del fuego. No es madera aserrada maciza, pues en la madera laminada encolada se conoce la resistencia exacta de la pieza, y la maciza no ofrece las mismas garantías mecánicas pues podría poseer un defecto oculto que restara capacidad portante. Asimismo las estructuras de madera maciza únicamente permite luces moderadas, de 4 a 18 metros, mientras que la laminada permite construir grandes luces, de 30 a 70 metros (CSCAE, 2011).

Maciza o laminada se perfila como el material del futuro (Arriaga, 1995), por ser un material económico, con excelentes capacidades mecánicas y físicas, facilidad de puesta en obra (construcción en seco) y sostenible medioambientalmente en su producción (figura 19). Posee una excelente relación resistencia/peso propio. Los sistemas

constructivos tradicionales pesados (forjado de viguetas y hormigón armado) poseen un peso propio siete veces superior al sistema de entramado de madera, la cual pesa lo mismo que la carga que resiste, mientras que la madera pesa apenas un 20% del peso máximo a soportar (Arriaga, 1995).

Sin embargo, alejada de ser una materia homogénea, los defectos estructurales de la madera condicionan la resistencia mecánica y estructural de ésta, siendo su comportamiento diferente a lo largo de la misma debido a la presencia de defectos estructurales, como principalmente nudos^β (García, s.f.). Los nudos tienen un efecto significativo en su resistencia mecánica (la resistencia es inversamente proporcional al área de nudos), por lo que son tenidos en cuenta en la normativa de madera de diferentes países, las cuales establecen la clasificación de maderas estructurales y limitan los tamaños de los nudos según la RAN (razón de área nudosa) (Dávalos *et al.*, 2009).

Aunque el criterio más restrictivo de la norma viene determinado por la presencia de nudos y sus dimensiones, no toda la madera es igual. La madera de gran escuadría no posee exactamente las mismas características físicas que la de pequeña escuadría, pues se obtiene de una sección diferente del tronco. La sección del tronco destinada a pequeña escuadría^δ no suele contener la médula, mientras que para gran escuadría^ζ es necesario el aprovechamiento del corazón de la pieza (algunas normas de clasificación mecánica de la madera, para las calidades altas no permiten la presencia de médula) (figura 20).

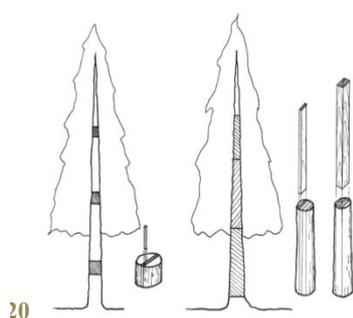


Fig. 20. Esquema de aprovechamiento de madera aserrada.

^β Las ruedas más antiguas que han llegado hasta nosotros fueron halladas en tumbas de Mesopotamia fabricadas entre el 3000 y 2500 a C. estaban hechas con tres tablones unidos entre sí mediante tirantes de madera y el agujero del eje pertenecía al hueco natural dejado por un nudo saltadizo (García Esteban, s.f.). ^δ Implica menos madera de albura, más blanda y ligera, menor presencia de gemas, fendas menos aparentes y poca desviación de la fibra. ^ζ Implica mayor proporción de madera de duramen, más resistente, durable y pesada.

Sin embargo el aprovechamiento total del tronco en madera de gran escuadría (en adelante MEG) supone la presencia de la medula y de la madera juvenil, y será más difícil evitar algunos defectos como las gemas, la desviación de la fibra o las fendas de secado.

Defectos cuyas dimensiones no son permitidas por la limitación de la norma siendo desechadas para uso estructural, y que sin embargo podemos encontrarlas realizando su función portante en estructuras con siglos de antigüedad (figuras 21 y 22).



21



22

Fig. 20. Esquema de aprovechamiento de madera aserrada. **Fig. 21 y 22.** Viga de gran escuadría, del techo de la planta baja de la sala de comercio del consulado del mar (Lonja de Valencia)

Las piezas estructurales de madera de gran escuadría de los edificios antiguos, normalmente proceden cada una de un sólo árbol, pero en la actualidad es difícil conseguir piezas de madera de grandes dimensiones, por lo que si se precisan grandes escuadrías se recurre a piezas de madera laminada encolada (Arriaga *et al.*, s.f.). Para madera aserrada, la normas actuales de clasificación se basan en ensayos realizados con madera de pequeña escuadría (de sección máxima aproximadamente 80mm x 200mm). La aplicación de las mismas a piezas de gran escuadría es difícil, y un elevado porcentaje serían rechazadas por la norma, incluidas las presentes en estructuras históricas y pese a que en muchos casos estas piezas han estado en servicio sin problemas durante muchos años (Íñiguez, 2007).

Para la clasificación de madera aserrada susceptible de uso estructural (ME1, ME2 y no aptas para uso estructural, ST II y ST III) actualmente se analizan las piezas recreando las condiciones de uso al que se destinarán, siendo de tamaños y calidades comerciales. El método que se emplea es el de clasificación visual (en adelante CV). Un método algo subjetivo que requiere de la aplicación de otros ensayos,

destruictivos o no destruictivos (Alcuña *et al.*, 2001), para evaluar la madera de forma más precisa, ya que no se puede estimar de manera visual los defectos internos de la madera que producen una pérdida en su capacidad físico-mecánica (figura 23).



Figura 23. Material y métodos para la clasificación estructural

Actualmente existe la tendencia generalizada de aplicar técnicas no destructivas o semi-destructivas para el análisis y evaluación del estado de la madera, siendo los más comunes el resistógrafo, ultrasonidos y arranque de tornillos, aunque su fiabilidad y precisión es mejorable (Álvarez *et al.* 2005, Bertolini *et al.* 1998, Bucur 2003, Capuz 2003, Hermoso 2001, Íñiguez 2006). Sin embargo, recientemente se ha introducido en el estudio de la madera la técnica del georradar (en adelante GPR), la cual utiliza radiación electromagnética en el espectro de las microondas (Rodríguez *et al.*, 2011). Una técnica, ya aplicada con éxito en el estudio de otros materiales constructivos como el hormigón (Canas *et al.*, 1996) y en prospecciones del suelo (García *et al.* 2000, Ramírez *et al.* 2008), la cual permite la

identificación de las principales singularidades externas e internas de la madera sin dañarla (desviación de la fibra, nudos, etc) (Bucur, 2003).

Dichas singularidades son el principal motivo de descarte de la madera aserrada para uso estructural, pero están presentes en las estructuras históricas en servicio hasta nuestros días, lo cual demuestra que algunos de los criterios actuales de descarte de madera por la presencia de estos “defectos” serían mejorables. Sin embargo no hay que olvidar que la calidad de la madera que ha llegado hasta nuestros días en estructuras históricas no es la misma que la actual. La tala y el posterior uso de la madera como material estructural ha sido históricamente una actividad intensiva, en la que se aprovechaba todas las piezas de la madera para fines constructivos y existía una especialización de los oficios que la rodeaban. Pero actualmente las especies de mejor calidad y crecimiento lento han sido reemplazadas por otras de crecimiento rápido y peor calidad estructural, y la escasa demanda, en términos de población mundial, permitía un equilibrio medioambiental que en estos momentos se ha visto destruido por las exigencias del mercado.

Al deterioro medioambiental provocado por la contaminación de la atmósfera y el subsuelo, hay que sumarle la deforestación a la que está sometido nuestro planeta. Para fabricar metales y hormigón se requiere de una gran cantidad de energía por tonelada. Se estima que para producir la misma cantidad en peso en madera, el consumo de energía en la producción de hormigón es 4 veces mayor, y para el acero es 60 veces mayor (mientras que la producción de madera es beneficiosa para el medio ambiente). La madera ofrece soluciones estructurales 10 veces más económicas, tiene un consumo energético y una emisión de

dióxido de carbono 52 veces menor que el aluminio, 15 que el hormigón y 12 que el acero. Estos datos deberían suponer un giro en la concienciación del sector de la construcción debido a la situación energética mundial (Arriaga, 1995).

El sector de la construcción y sus recientes normativas exigen la máxima calidad en sus elementos constructivos por motivos de seguridad y durabilidad, tanto en obra nueva como en rehabilitación de estructuras existentes. Si seguimos los criterios que se aplican actualmente en las normas, esta exigencia de calidad requiere de un descarte en madera destinada para uso estructural de casi un 50% (Fernández Golfín *et al.*, 2001). Una cantidad excesiva (pues se infravaloran sus capacidades mecánicas) siendo necesaria su reducción. Por ello, se puede afirmar que existe una doble problemática derivada de la técnica de la CV que impide ver los defectos internos de la madera: por una parte un gran descarte de madera nueva aserrada para uso estructural y por otra parte una falta de precisión en el diagnóstico de la capacidad portante de la madera en el campo de la rehabilitación.

Por este motivo la presente tesis se centra en la hipótesis de la aplicabilidad de la técnica del GPR como técnica no destructiva para mejorar la técnica de CV, y así obtener un diagnóstico estructural más preciso de fácil aplicabilidad y seguridad en la obtención de resultados, en cualquier punto a estudiar de la madera, tanto en obra nueva como en rehabilitación, que además contribuya a la reducción del descarte de la madera aserrada, por ser una técnica muy precisa.

2

Objetivo

DE LA TESIS

El objetivo principal de la presente tesis es la posible aplicación del GPR como técnica no destructiva para mejorar la actual CV de la madera estructural.

Con ello se pretende la obtención de un diagnóstico estructural más preciso y seguro en la obtención de resultados, en cualquier punto a estudiar de la madera, tanto para madera nueva aserrada como para madera en rehabilitación.

Manteniendo los actuales estándares de calidad en la seguridad estructural, este estudio lograría:

- Reducir el descarte de madera aserrada para uso estructural, actualmente casi un 50%, contribuyendo así a un mejor aprovechamiento de la madera aserrada para uso estructural. Esta selección a través de la CV y el GPR conjuntamente, permitiría ver los defectos internos de la madera y ser más precisos en su evaluación.
- Mejorar el diagnóstico y precisión en la evaluación de la capacidad de carga en el ámbito de la rehabilitación de estructuras de madera mediante ensayos no destructivos (en adelante END). El GPR permitiría identificar los defectos internos y de las caras ocultas de la madera para mejorar la valoración de seguridad estructural e identificación de los daños físicos.

El paso inicial en la restauración de estructuras requiere de la realización de un estudio previo del estado de la pieza a rehabilitar, hasta el momento mediante inspección visual y toma de pequeñas muestras a analizar en el laboratorio o métodos destructivos o semi-destructivos, obteniendo en ocasiones resultados poco fiables debido a que no se puede estudiar el interior de toda la pieza homogéneamente.

La utilización conjunta de estas técnicas de fácil aplicabilidad presenta varias ventajas frente a otros sistemas:

- No es necesario el traslado de elementos que integran la estructura a un laboratorio para su estudio.
- Ni la estructura ni el recubrimiento de esta (como es el caso de las policromías) es dañada pues no es un ensayo destructivo.
- Es un método de fácil aplicabilidad y transporte a obra.

Asimismo también se pretende contribuir al perfeccionamiento de dichas técnicas de ensayo no destructivo para su posterior difusión, contribuyendo a una mejor normativa y a una metodología para la aplicación del GPR en la madera. Actualmente no existe una normativa reguladora al respecto de la técnica del GPR, por lo que este trabajo tiene también como fin contribuir al establecimiento de una metodología de trabajo en la aplicación de esta técnica, mediante el estudio en profundidad de radargramas y espectros del GPR.

En este estudio se realizará un registro de parámetros de la CV, y se analizará en profundidad radargramas y espectros, obtenidos mediante el GPR, que determinen la presencia de nudos. Posteriormente se contrastarán resultados. Asimismo este estudio proporcionará diferentes líneas de investigación futuras para la madera, la CV y la técnica del GPR.

3

Estado de la cuestión

MARCO GENERAL + ANTECEDENTES

3.1. Marco general

Las características de la madera son ampliamente conocidas. Las principales propiedades físicas de la madera que afectan a su resistencia mecánica son la anisotropía, la higroscopicidad y la densidad. La madera posee una estructura fibrosa que se compone de “tubos huecos” compuestos por fibras que siguen la misma dirección, paralela a la longitudinal del tronco o la rama, siendo interrumpidas por fibras en dirección transversal con la salida de una rama, en cuyos encuentros se hallan los nudos, puntos débiles de dicha estructura.

Las diferentes direccionalidades de las fibras son las responsables de que la madera sea un material anisótropo, no posee la misma resistencia mecánica en la dirección paralela a las fibras que en la perpendicular, siendo hasta 30 veces mayor su resistencia en el sentido longitudinal. El eje longitudinal comprende el plano paralelo a la fibra, el eje radial el perpendicular al crecimiento de los anillos y el tangencial es perpendicular a la fibra y tangente a los anillos de crecimiento. Asimismo es posible una desviación de las fibras provocada por la interrupción del nudo, alrededor del cual se produce una concentración de tensiones que lo convierte en puntos especialmente débiles donde se reduce la capacidad mecánica

de la madera. La presencia de nudos puede reducir la resistencia a flexión de una pieza de manera notable (Arriaga *et al.*, 2007).

Otro factor determinante en la resistencia de la madera es la humedad. La madera es susceptible a la humedad ambiente, pues es un material higroscópico e intercambia humedad con la atmósfera en la que se encuentra. Un cambio en la humedad de la madera implica un cambio de dimensiones en la misma y una variación en sus propiedades físicas y mecánicas. Si aumenta la humedad se produce una hinchazón en las fibras y por lo tanto en sus dimensiones. Una disminución provoca una merma y por lo tanto disminuye las dimensiones de la madera. Esta variación en el volumen provoca la aparición de fendas

(figura 24), uno de los defectos de la madera consecuencia de la merma en sentido tangencial durante su secado, siendo mayores cuanto mayor es la sección. La madera recién talada contiene de un 60 a un 200% de humedad. Una vez secada al aire o al horno se ha establecido internacionalmente una humedad del 12% para realización de ensayos en madera estructural (Normas UNE-EN 13183-1 y UNE-EN 13183-2).

Diversos autores han estudiado el correcto secado de la madera. Fernández-Golfín y Conde (2007) escribieron un manual donde se explican las técnicas y consideraciones para realizarlo correctamente y según Carballo (2009) si la madera se seca correctamente se minimizan los defectos en la misma provocados por la humedad. Asimismo según Steele y Cooper (2000) es posible identificar las diferencias de humedad en la misma viga (pues ésta puede variar a lo largo de la pieza), utilizando el método de radiofrecuencia (aunque sólo han obtenido buenos resultados en la identificación de nudos y huecos).

34 ††

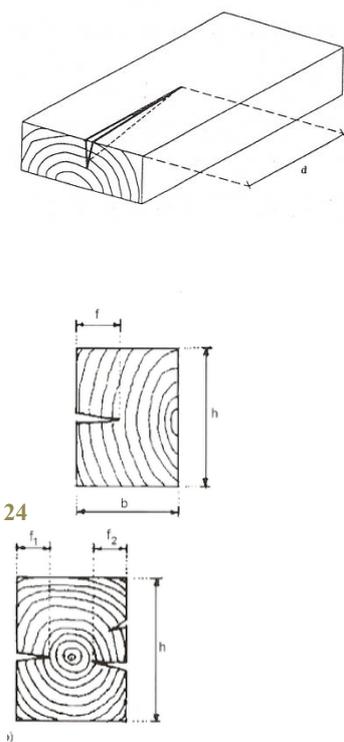


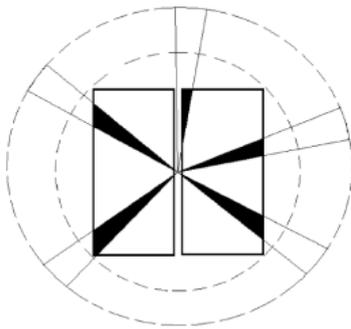
Fig. 24. Esquema y dimensiones de referencia en piezas de madera con fendas según la UNE 56544.

La densidad de la madera está directamente relacionada con su contenido en humedad: la dureza de la madera es proporcional al cuadrado de la densidad, decayendo en proporción inversa con el grado de humedad. Puede variar del orden del 10% al 20% respecto a su valor medio en piezas de la misma especie. Generalmente aumenta a medida que nos alejamos de la médula. La densidad de la madera varía según la especie (desde 300 hasta 1550 kg/m³, siendo más habituales en madera estructural aquellas con densidades entre 450 y 600 kg/m³). En España se aplica la norma UNE 56531:1977 para regular el ensayo que determina la densidad de la pieza a estudiar.

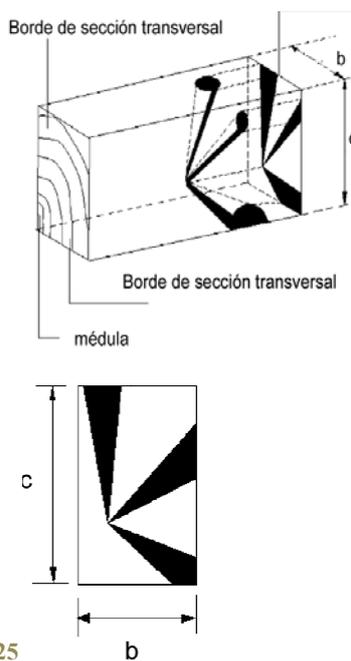
Otra de las características importantes de la madera es que no es un material homogéneo. La presencia de nudos, fendas, gemas y la desviación de las fibras son las principales particularidades que determinan la clase resistente en la CV de la madera, y el descarte de la misma si no es apta, según la norma, para uso estructural. Asimismo habría que añadir a la heterogeneidad de su naturaleza, la variabilidad en las propiedades de la madera en función del árbol, la especie y las condiciones ambientales. Es posible encontrar piezas del mismo lote y especie con diferencias en sus resistencias de hasta 10 veces (Glos *et al*, 2002). Por ello es necesaria la clasificación estructural de la madera por calidades, bien por CV o por Ensayo No Destructivo, para garantizar una resistencia mínima.

3.1.1. Aspectos generales relacionados con las estructuras de madera y la presencia de nudos.

Los nudos son la singularidad de la madera sobre la que la CV posee un carácter más restrictivo (Cown *et al.*, 2004; Gaunt, 2004; Karsulovic y Cisternas, 1991; Lam *et al.*, 2004; Lam *et al.*, 2005; y Mackenzie *et al.*, 2005). Estos poseen un efecto significativo sobre la resistencia de la madera, el cual es más notorio en las coníferas debido a que su tronco presenta gran cantidad de ramas.



Debido a la influencia que los nudos poseen sobre la resistencia estructural de la madera, las normas de clasificación de madera de varios países se basan en la CV, y en concreto en el principio de la razón de área nudosa RAN (grupo de nudos proyectada sobre la sección transversal de una pieza). Este concepto se fundamenta en las limitaciones a los tamaños de los nudos y la cantidad de los mismos (figura 25). Dichas normas definen las clases estructurales a partir de las singularidades que reducen la resistencia.



A pesar de que cada país aplica normas diferentes para determinar si una pieza de madera es apta para uso estructural o no y su clasificación por calidades (en España se aplica la norma UNE 56544:2011), la presencia de dichos nudos es uno de los principales defectos por los que actualmente se produce un descarte en la madera aserrada para uso estructural del 52%, infravalorando la capacidad resistente de muchas de las piezas desechadas (Arriaga *et al.*, 2007). Esto se debe a que la resistencia y rigidez en flexión de la madera está inversamente correlacionada con el área proporcional de nudos (RAN). La resistencia es directamente proporcional a la densidad D y a la rigidez (MOE). Siendo los principales

Fig. 25. Esquema de desarrollo de nudos en la sección transversal de un tronco. Todas normas de clasificación visual analizan principalmente la relación de su tamaño respecto al tamaño de la sección en cara y canto (Esteban, 2003).

parámetros para predecir la resistencia a flexión de la madera son la razón de área de nudos (RAN), la densidad (D) y el módulo de elasticidad (MOE).

La influencia de los nudos (RAN) en la clasificación de madera estructural ha sido estudiada por varios autores. Para Dávalos *et al.* (2009) la capacidad de la densidad y RAN se asemejan en cuanto a su capacidad para estimar el módulo de ruptura (MOR). Asimismo, si se mide el esfuerzo en la zona donde se ubica el mayor defecto mejora sensiblemente la correlación estadística. Para determinar la resistencia a flexión, la mejor ecuación deriva de un análisis de regresión lineal múltiple que involucra al MOR como variable dependiente y a la densidad, a la RAN y al MOE como variables independientes, con un R^2 de 0.885. Mismas conclusiones que Karsulovic y Cisternas (1991).

$$\text{MOR} = 67.35\text{Db} - 0.124\text{RAN} + 0.00537\text{MOE}$$

Según Dávalos *et al.* (2009) al incluir el módulo elástico se incrementa la correlación, mejorando la calificación estructural al combinar el sistema de CV y el mecánico. Considerando las variables D, MOR y RAN se obtienen los siguientes valores del coeficiente de determinación R^2 : 0.42 para D y MOR, 0.41 para RAN y MOR, 0.61 RAN y esfuerzo en la zona del nudo más grande, 0.39 para RAN y MOE, y 0.84 para MOE y MOR. Estos datos son aproximados a los obtenidos por Gaunt (2004), quien obtuvo un R^2 de 0.36 para la relación RAN–MOR y 0.15 para la ecuación de regresión entre MOE y RAN.

Sin embargo según Fernández-Golfín *et al.* (1998) la CV no es suficiente para realizar una correcta clasificación de la madera estructural, pues es un método subjetivo y conservador. Postura que coincide con Acuña *et al.* (2005),

para quienes la aplicación de la norma UNE 56.544 no es muy precisa para realizar una clasificación de madera estructural, pues *desestima muchas piezas con unas características resistentes superiores a lo que se define en la norma UNE EN 338-2010, con la consiguiente pérdida de rendimiento clasificatorio y de pérdida de valor en el mercado.*

Para Íñiguez (2007) la CV, a pesar de definir un nivel de seguridad adecuado, representa un nivel reducido de aprovechamiento del material, pues muchas veces el porcentaje de piezas de rechazo es demasiado elevado y la separación entre las propiedades mecánicas de cada calidad es muy reducida.

Este excesivo descarte, la imposibilidad en la falta de precisión en la caracterización de las piezas y la imposibilidad de la identificación de defectos internos ha propiciado el desarrollo y aplicación de otras técnicas no destructivas para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la madera estructural.

3.2. Antecedentes

La CV es el método más antiguo y más ampliamente utilizado para la detección de defectos en la madera estructural y su clasificación, tanto en aserradero con madera nueva como para peritar estructuras y estimar su valor resistente. Sin embargo, a pesar de ser un método sencillo, fácil, rápido barato y con resultados inmediatos, posee ciertos inconvenientes que lo convierten en un método poco preciso: no permite detectar los defectos internos y es un método que depende en cierto grado de la subjetividad de quién lo realiza.

La CV se basa en identificación de las singularidades presentes en la madera de manera visual, evaluando y comparando las dimensiones y de dichas singularidades con respecto a la pieza, según la norma de cada país (Fernández-Golfín *et al.*, 2003). A partir del resultado de la evaluación se clasifica el material en calidades según las características mecánicas conocidas, siendo los nudos, la desviación de la fibra, las gemas y los agentes biológicos, las principales singularidades que condicionan las calidades.

Actualmente la UE posee una norma UNE-EN: 308 común para todos los países, que recoge las clases resistentes y determina las características mecánicas y físicas mínimas que deben cumplir cada una de ellas. En cada país, esta norma se combina con la norma desarrollada según la especie más empleada en el mismo, dando lugar a la norma EN 1912 (Carballo *et al.*, 2009).

Tanto en aserradero, laboratorio, y rehabilitación de edificios, para la evaluación estructural, siempre se emplea esta técnica y se complementa con otro END. La mayor ventaja de esta técnica es la versatilidad y sencillez de la misma, pues puede

emplearse tanto in situ como en laboratorio.

La primera vez que se realizó una CV de la madera fue en 1923 por el *Forest Products Laboratory* de EEUU (Fernández-Golfín *et al.*, 2001), y hasta hoy se ha estado mejorando esta técnica y dando lugar a las diferentes normas. En España, actualmente se utilizan dos normas, la UNE 56544 (madera de coníferas) y la UNE 56546 (madera de frondosas), sin embargo hasta la aparición de las mismas se utilizaron la británica BS y la alemana DIN. Fueron diversos estudios los que mediante sus investigaciones permitieron la elaboración de la normativa visual española (Fernández-Golfín *et al.*, 1998; Fernández-Golfín *et al.*, 2003; Ortiz *et al.*, 1989; Ortiz y Martínez, 1991; Martínez, 1992; Hermoso, 2001; Conde, 2003, Fernández-Golfín *et al.*, 2007^a; Sáenz, 2008; Badia, 1999, Díez, 1998; Díez *et al.*, 2006); Conde, 2007; Hermoso, 2001 - 2003b - 2007; Adell, 2005; Íñiguez, 2007.

Sin embargo las normas UNE, al estar está basadas en ensayos realizados en maderas de especies determinadas (*Pinus radiata*, *pinaster*, *sylvestris* y *nigra* y *Abies alba* (coníferas), y *Eucalyptus globulus* y *Juniperus thuriphora* (frondosas)) la convierte en una norma poco precisa para otras especies de madera estructural que se encuentran en el territorio español, como la madera de *Castanea sativa* (Vega, 2013).

Según Vega se produce un rechazo del 72% en madera de castaño, si aplicamos la norma UNE 56546 -frondosas-, aun cuando en madera apta y no apta las diferencias eran mínimas. Lo cual plantea la necesidad de elaborar especificaciones para adaptar la norma a la madera de castaño.

Asimismo, según Casado *et al.* (2009) la norma infravalora la capacidad resistente de la madera de chopo (*Populus alba*), lo que da lugar a un rechazo del 50% (por presencia de nudos), a un 17% (por presencia de gemas) y a un 5.2% (por deformaciones máximas). Este autor también indica que sería conveniente mejorar la calidad de la madera aserrada de chopo mediante un control más riguroso del cultivo del chopo y su aserrado.

Sin embargo la norma también presenta inconvenientes en aquellas especies sobre las que se han basado los estudios para la redacción de las mismas. Respecto de las coníferas, existen numerosos estudios que coinciden al afirmar que es un método excesivamente conservador, el cual infravalora y desestima mucha madera (Carballo *et al.*, 2007b; Rodríguez, 2009), lo que ha propiciado que se realicen estudios para reducir el descarte mediante otros END y/o la modificación de los criterios de la CV (Díez *et al.*, 2000; Adell *et al.*, 2008).

Según Arriaga *et al.* (2007) la norma alemana DIN 4074-1:2003 es la que mejor permite una CV aplicada en MEG ya que establece especificaciones distintas según las escuadrías de las piezas.

En cuanto a MEG, Arriaga *et al.* (2007) cuestiona que la calidad de la madera, desde el punto de vista resistente, siga evaluándose visualmente en función de la cantidad y tamaño de las singularidades presentes en las piezas (nudos, fendas, desviación de la fibra, etc.), bajo la aplicación de la norma UNE 56544, pues provoca que sean rechazadas la mitad de piezas de MEG, principalmente por el defecto de las gemas, seguido de las fendas. En MEG la presencia de estas últimas

son inevitables y su influencia en la resistencia y rigidez son bajos, aunque la tendencia actual de las normas es la reducción de su influencia, según Pedrotti *et al.*, (2000).

Arriaga *et al.* (2007) plantea una revisión de la norma (bajo criterios de CV) y una aplicación parcial de la misma, sobre todo para MEG y estructuras a rehabilitar. Plantean que únicamente se tengan en cuenta los defectos de los nudos y desviación de la fibra. Según estos autores, si se utiliza el criterio de CV únicamente restringiendo a nudos y desviación de la fibra, el porcentaje de rechazo baja a unos valores del 10%. Actualmente el rechazo del 45% para pino radiata y silvestre y el 38% para Laricio provoca que no se produzca un aprovechamiento industrial total de la madera aserrada para construcción.

42 ††

Sin embargo, para poder identificar correctamente todos los nudos de una pieza, incluidos los nudos ocultos en el interior o en caras de la pieza que no están visibles, habría que recurrir a END, pues la CV por sí sola no es un método suficientemente preciso, por lo que necesita ser complementado por otros END.

Para mejorar la evaluación de la madera estructural se han venido desarrollado otras técnicas instrumentales no destructivas o casi no-destructivos que muestran un gran potencial e incluso se han tornado habituales, especialmente para descubrir defectos que no son evidentes en la superficie (López *et al.*, 2014).

3.2.1. Ensayos no destructivos y la clasificación visual

Los primeros estudios sobre END diferentes a la CV se iniciaron en los años 50 (Jayne, 1959 y Pellerin *et al.*, s.f.), en investigaciones sobre la determinación de las constantes elásticas de la madera mediante ondas de impacto, obteniendo buenos resultados mediante la medición del tiempo de propagación y su relación con la elasticidad del material (Bucur, 2006; Bell, 1950; Galiginaitis, 1954; James, 1962; Senft, 1962 y Pellerin, 1965). Desde entonces se han desarrollado diferentes métodos para evaluar la madera estructural (para ser aplicados en laboratorios y/o a pie de obra) constituyendo hoy día importantes herramientas.

Actualmente existen estudios que avalan la caracterización de la madera con END como métodos para estimar las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Sandoz ,2000; Beall, 2002; Esteban, 2003; Íñiguez, 2007; Baar *et al.*2011; Montón, 2012; Fernández-golfín *et al.* 1997; Hermoso *et al.* 2002). Los END a diferencia de los destructivos, no alteran las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de las piezas. Estos ensayos evalúan las propiedades de la madera (módulo de elasticidad, densidad y resistencia) mediante la aplicación de fenómenos físicos.

Según la técnica empleada los END se pueden dividir a *grosso modo* en:

- Inspección visual (CV).
- Métodos de propagación de onda (ultrasonido, ondas sónicas, vibración).
- Métodos mecánicos (clasificación mecánica, penetrómetro, resistencia al arranque de tornillo, resistógrafo).

- Otros métodos (Métodos electromagnéticos: GPR; nucleares: radiografía y tomografía computarizada; infrarrojos: cámara térmica).

Según Montero (2013) el resistógrafo (Acuña *et al.*, 2011), el penetrómetro (Bobadilla *et al.*, 2007) y, según casos, el extractor de tornillo (Basterra *et al.*, 2006) pueden detectar defectos con cierta eficiencia. *El penetrómetro y el extractor de tornillo tienen un alcance superficial, mientras que el resistógrafo permite un estudio completo de una sección, pero todos de una manera muy localizada. Los métodos acústicos son tan eficaces en este sentido, pero trabajan de manera indirecta a través de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas inducidas en la pieza examinada (Sáñez, 1989).* Sin embargo, ninguno de ellos es suficiente por sí solo para determinar con un alto grado de precisión las propiedades físico-mecánicas de la madera, por ello se combinan varios métodos (Rodríguez *et al.*, 2011).

A continuación se explican más detalladamente las ventajas e inconvenientes de cada una de los END y su relación con la CV.

3.2.1.1. Análisis de la clasificación mecánica

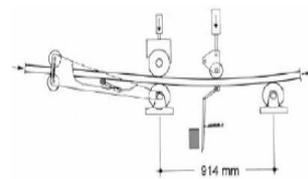
El método más extendido de clasificación mecánica se trata de un ensayo de flexión para relacionar esfuerzos con deformaciones. Puede realizarse de dos maneras, se somete a flexión una tabla a la cual se aplica una carga determinada para medir la deformación que provoca o bien se fija la deformación a producir y se mide la carga aplicada (figuras 26, 27 y 28).

En Fernández-Golfín *et al* (2001) se recoge una amplia revisión de este método. Otros estudios más recientes sobre el rendimiento de esta máquina son (Bengston, 2006; Bacher, 2008; Hanhijärvi, 2008^a, 2008^b; Nocenti, 2010 y Ranta-Maunus, 2010).

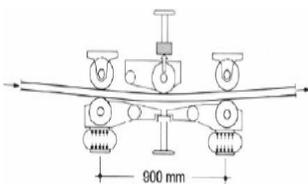
La principal ventaja de este ensayo es que cuenta con respaldo normativo (EN-14081), sin embargo los inconvenientes son múltiples:



26



27



28

Fig. 26. Imagen de ensayo de clasificación mecánica.

Fig. 27. Clasificación mecánica. Esquema Computermatic

Fig. 28. Clasificación mecánica. Esquema Cook Bolinder.

- No ofrece un resultado continuo a lo largo de la pieza pues se analizan varias secciones de la misma para determinar la humedad, densidad, presencia de nudos y principalmente el módulo de elasticidad en el tramo más desfavorable.
- Limitación del tamaño de la pieza (espesor máximo de 100mm), lo que deja fuera la gran escuadría. No aplicable a todas las escuadrías empleadas en construcción (grandes escuadrías).
- Método caro.
- No es posible aplicarlo *in situ* en obra de rehabilitación.
- Necesita ser complementado por una inspección visual, al ser un método de análisis discontinuo.

Según Carballo *et al.* (2009), a pesar de haber estudios que presentan ajustes de máquinas para determinadas especies de madera (Carballo *et al.*, 2008) aún no están homologados por la Unión Europea. Asimismo ningún aserradero invierte en este tipo de clasificadoras pues el volumen de madera aserrada en España comercializado para uso estructural es escaso.

3.2.1.2. Análisis del resistógrafo

Es una técnica pseudo-no destructiva que se utiliza para localizar degradaciones interiores de la madera localizadas o sus características internas, mediante la determinación de su densidad. Se evalúa la resistencia que ofrece la madera a la introducción de una aguja giratoria de 1,25 a 1,5mm de diámetro a velocidad constante (figura 29). El registro de datos se realiza a través de una gráfica que indica la fuerza ejercida (amplitud %) por unidad de longitud.

La aplicación de este método, según Vilches y Correal (2009), permite obtener buenos resultados para la estimación de la resistencia a flexión, con un 88% en el R^2 y resultados regulares para densidad con un R^2 52%. Sin embargo otros autores obtienen buenos resultados con valores del 80% para la densidad (Acuña *et al.*, 2011 y Mariño *et al.*, 2008). Según Alvarez *et al.* (2005), el resistógrafo ofrece un buen resultado para inspección de estructuras de madera y determinación de resistencia y densidad.

Asimismo, este método permite identificar el espesor de los anillos (anillos de verano y primavera con diferente densidad) y si la madera presenta ataques de xilófagos o existen pudriciones internas (Álvarez *et al.*, 2005).



Fig. 29. Resistograma de madera de *P. sylvestris*.

Según Acuña *et al.* (2011) es un buen instrumento para aplicar en obras de rehabilitación, pues en madera sana es posible asignar a través de las variables definidas mediante resistógrafo el tipo de especie a la que pertenecería la madera y sus valores de resistencia mecánica. Acuña *et al* obtienen un coeficiente de determinación $R^2 > 90\%$ mostrando una excelente relación entre las variables resistográficas analizadas y la densidad de la madera. Según Acuña es el ensayo más preciso que existe para determinar la densidad de la madera estructural R^2 más del 80% (Acuña *et al.*, 2011).

Sin embargo presenta una desventaja, únicamente permite una medición localizada de la pieza a estudiar, requiriendo varias perforaciones para poder estudiar la pieza de manera continua. Al ser un ensayo puntual y nunca se puede utilizar para validar una pieza entera. Aunque por otra parte es una técnica rápida y precisa, que ofrece una alta precisión en la determinación de la humedad y es posible aplicarlo en obra.

Según Capuz (2003) no es una técnica peor que el ultrasonidos. Mediante el resistógrafo es posible discriminar las calidades visuales de la madera previamente obtenidas por la UNE 56544. En madera libre de defectos obtiene un $R^2 > 60\%$ para obtener la densidad. Según Capuz es una técnica útil en inspección de estructuras siempre que se aplique junto con otros END para obtener un diagnóstico adecuado.

3.2.1.3. Análisis de la penetrómetro (Pilodyn) y el arranque de tornillo (MAT)

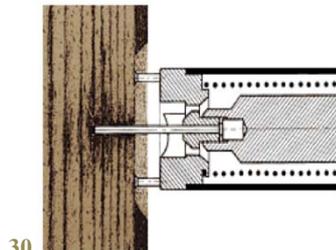
El penetrómetro y el arranque de tornillo se emplean principalmente para determinar la densidad. El penetrómetro (figura 30) consiste en la penetración de una varilla a velocidad constante, en la que se mide la resistencia que ejerce la madera, mientras que el arranque de tornillo (figura 31) consiste en medir la resistencia que ejerce la madera al introducir un tornillo en ella.

Según Acuña (2007), el penetrómetro es un método excesivamente superficial y local. El método de arranque de tornillo, según (Bobadilla *et al.*, 2007), para hallar la densidad, proporciona coeficientes de determinación (R^2) 49,5%, poseyendo mejores correlaciones en términos generales que el penetrómetro. Asimismo también afirma que es posible la determinación de la especie (si se desconoce) mediante la combinación de arranque de tornillo y ultrasonidos.

Según Carballo *et al.* (2009) ambas técnicas se emplean para estimar la densidad en inspección de estructuras, conjuntamente a otros END. Sin embargo varios autores se decantan por la técnica del arranque de tornillos.

Según Bobadilla *et al.* (2007) en un estudio comparativo sobre la calidad de las estimas de la densidad y del módulo de elasticidad en vigas históricas de pino, obtienen un R^2 del 50%. Aunque propone la utilización de esta técnica junto con otros END, estudiados por otros autores en profundidad (Basterra *et al.*, 2005a y 2005b). Otros autores también obtienen buenos resultados mediante el arranque de tornillos, como Basterra *et al.* (2006) y Casado *et al.* (2005). Pero es en la tesis de Iñiguez (2007) donde se superan los resultados

48 ††



30



31

Fig. 30. Imagen del Pilodyn (Catalogo de Proceq).

Fig. 31. Equipo de arranque de tornillo.

anteriores en la predicción de la densidad mediante arranque de tornillo. Se obtiene un R^2 del 71% mediante una regresión lineal. Bobadilla *et al.* (2007) afirma que la combinación del ensayo de ultrasonidos, arranque de tornillo y CV permitiría un descarte en la madera del 4%, frente al 54% si únicamente se aplican criterios de CV.

3.2.1.4. Análisis del ultrasonidos o método de transmisión de onda

Este ensayo mide de la velocidad de propagación de una onda a través de la madera (Equipos Sylvatest -onda ultrasónica- y Microsecond Timer -onda de impacto-) (figura 32) para estimar MOE y MOR. A través de la velocidad de la onda es posible estimar las propiedades mecánicas, y si se conoce el dato de la densidad es posible calcular el módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) (Acuña *et al.*, 2001; Hermoso *et al.*, 2003 y Casado *et al.*, 2005), resultando este último un estimador más preciso que la velocidad de onda, según Carballo *et al.* (2009).

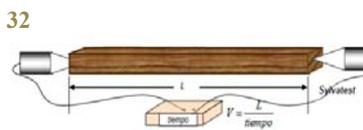


Fig. 32. Esquema de equipo de medida.

Según Sandoz (1996), el método de ultrasonido por transmisión de onda es el más indicado para caracterización de materiales heterogéneos. Sin embargo Carballo *et al.* (2009) afirma que, a pesar de que ésta y la CV son las técnicas más utilizadas por los grupos españoles, los resultados del ultrasonidos no acaban de cumplir las expectativas creadas. En la estimación de MOE y MOR se obtienen coeficientes de determinación que varían del 40% al 70%, siendo más precisa la estimación de MOE que la de MOR, con coeficientes de determinación más bajos.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Sandoz

(1989) y Machado *et al.* (1998). En la velocidad de propagación en la dirección longitudinal de las fibras se obtienen resultados del orden de 45-75% para R^2 en la determinación de las propiedades mecánicas (Sandoz 1989 y Machado *et al.* 1998). Los mismos valores para MEG que se obtienen en (Arriaga *et al.*, 2005, 2006).

Hermoso (2011) la considera una técnica válida para la caracterización de la madera estructural, pues obtiene un R^2 del 34% para relacionar la velocidad de propagación de ultrasonidos y la tensión de rotura en pino silvestre.

Sin embargo otros estudios como Branco *et al.* (2010) obtienen resultados muy bajos, pues para estimar MOE obtiene un R^2 del 15% (una pequeña mejora frente al 6% de la CV). Branco *et al.* atribuyen estos valores tan bajos a la variabilidad de la madera nueva o antigua, pues la densidad en esta última es mayor y por lo tanto posee mejores propiedades mecánicas y resistentes. Esta afirmación contrasta con la realizada por (Montero, 2013), quien basándose en estudios de (Gorlacher, 1991) y (Lourenço *et al.*, 2007) afirma que el ultrasonidos es posible ser aplicado por igual en madera nueva o madera para rehabilitar, pues en los estudios realizados respecto al tema no se han encontrado diferencias.

Asimismo Branco *et al.* (2010) también afirman que la predicción en la estimación de la densidad en estructuras preexistentes es menos precisa que en laboratorio, lo cual dificulta la determinación de MOE din por ultrasonidos puesto que el dato de la densidad ha de ser exacto, y en ocasiones se le atribuye un valor aproximado (Kasal y Anthony, 2014).

Para Acuña *et al.* (2005 y 2007) una de las desventajas de este ensayo son las variaciones a la hora de situar los transductores

(es posible variar la distancia entre ellos y las orientaciones de los mismos respecto a la fibra de madera), lo que dificulta la comparación de los resultados obtenidos.

Esta variación de la onda según la estructura del material presenta otra desventaja según Conde *et al.* (2007) y Acuña *et al.* (2004), ya que este método ha de ser evaluado y puesto a punto para cada especie de madera. Asimismo su aplicación en grandes luces se torna complicada, pues la longitud de la pieza a medir influye en la precisión del resultado, ya que a mayor distancia la onda pierde intensidad.

Según Montero (2013) existe una ventaja en el ensayo de onda sónica (medición de la velocidad de propagación de una onda generada por un impacto) sobre el método de ultrasonidos pues permite estudiar piezas de mayor longitud. A la pérdida de intensidad hay que sumarle que la frecuencia de la onda a la que se realiza este ensayo (25kHz) no identifica muchos de los nudos que encuentra en su trayectoria. Cabe recordar que la resistencia estructural de la madera depende en gran parte de la presencia de singularidades, como los nudos, las fendas, la desviación de las fibras... Asimismo para (Rodríguez, 2009) el ultrasonidos es un método poco seguro puesto que determina un alto porcentaje de madera como apta para uso estructural a pesar de no serlo.

Sin embargo existen estudios que indican que se produciría una mejora en la predicción de las características mecánicas por el método de ultrasonidos si se combina con la CV (Ceccotti y Togni, 1996; Acuña, 2004 y Conde *et al.*, 2007).

Según Ceccotti y Togni (1996) si se emplean conjuntamente ambas técnicas, pero aplicando la norma alemana DIN 4074, se obtienen un coeficiente de determinación de 80%.

Acuña *et al.* (2004) afirma en su estudio sobre piezas de madera *Pinus pinaster Ait.*, que la combinación de ambas técnicas es un buen método para realizar a pie de obra. Según Acuña es posible estimar el valor de la resistencia combinando la CV y el ensayo de ultrasonidos, pues el coeficiente de determinación es del 40% para determinar la tensión de rotura. Asimismo relaciona la variable cantidad de nudo con los valores de módulo de elasticidad, velocidad de ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico, siendo posible la utilización de la función de defectos en la predicción del valor de la resistencia a rotura de las vigas de madera. Para Acuña *et al.* (2007) existe una buena relación para determinar las características de la madera mediante ultrasonidos y los ensayos de flexión estática (sobre todo) y ensayo de rotura. Este método aporta mayor rendimiento que la CV para realizar la clasificación resistente de la madera (en *P. pinaster Ait*) y aporta menos errores. La técnica de ultrasonidos presente un porcentaje de aciertos del 72%, muy por encima del 53% de la CV.

Esteban (2003) afirma que la técnica de ultrasonidos permite reducir el número de variables para el estudio de las propiedades de la madera con END. Este autor evalúa el efecto de la cantidad de nudos y su relación con la capacidad resistente de la madera, obteniendo relaciones lineales: una entre el perímetro de la sección y la suma de los diámetros de los nudos, y otra entre la pérdida de MOR y el MOR de la sección completa. Sin embargo obtiene resultados muy bajos, con R^2 del 10% para MOEdin y 24% para MOEglobal en un estudio realizado con piezas de madera vieja.

Según Conde *et al.* (2007) por el método de ultrasonidos en madera estructural se obtiene un R^2 de 63% para la

evaluación de la resistencia a flexión (MOR) y un R^2 del 73% para el módulo de elasticidad a flexión (E_g). El tamaño relativo del nudo de cara (dc) solo tiene efecto significativo en la predicción de MOR, mientras que el tamaño relativo del nudo de canto (dh) tiene un efecto significativo en la predicción de ambas variables (MOR y E_g)⁷. La adición de la densidad mejora notablemente los modelos si bien añade una complicación práctica en obra, ya que la medición de esta variable es sumamente complicada, motivo por lo cual deberán ser empleados métodos de estimación (penetrómetros) o de sondeo (barrenas Pressler).

≈ Este distinto comportamiento puede atribuirse al diferente efecto que las desviaciones locales de fibras, debidas a la presencia de los nudos (en la cara o en el canto), producen en la resistencia y elasticidad de la madera sometida a esfuerzos de flexión (Conde 2007.)

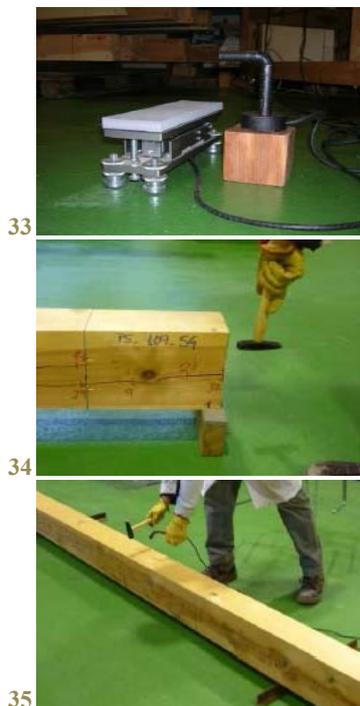


Fig. 33, 34 y 35. Ensayo de vibraciones.

3.2.1.5. Análisis del método de vibraciones

Este método consiste en el análisis de vibraciones inducidas -ondas vibratorias- (figuras 33, 34 y 35), pudiendo aplicarse de manera longitudinal y transversal. Principalmente se utiliza para determinar MOE y la resistencia. En este ensayo la pieza se somete a un impacto determinado, la cual responde con un comportamiento dinámico en forma de vibración, cuya frecuencia depende de sus propiedades físicas y mecánicas (según el módulo de elasticidad dinámico y la densidad).

Según Carballo *et al.* (2009) esta técnica se emplea frecuentemente en Europa de manera conjunta con la clasificación mecánica con maquinaria de nueva generación, y en España a partir del estudio realizado por Arriaga *et al.* (2005), para quien es un técnica adecuada para

caracterización de madera estructural en gran escuadría (MEG) (Arriaga *et al.*, 2005; Íñiguez *et al.*, 2007) por ser un método rápido. Sin embargo, según Carballo *et al.* (2009) esta técnica no es posible aplicarla en estructuras en servicio aunque se está investigando sobre ello (Gülzow *et al.*, 2007).

Según Divos y Tanaka (2005) existe una buena correlación entre los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico, sin embargo es necesaria la corrección de los valores de rigidez obtenidos a partir del dinámico pues son superiores a los reales o al estático. Mediante vibración longitudinal se han obtenido coeficientes del 79% para el módulo de elasticidad y un 52% para tensión de rotura. Para determinar la densidad, se ha obtenido un R^2 del 47% combinando vibratorias con otros métodos como penetrómetro y arranque de tornillos.

Según Íñiguez *et al.* (2007) mediante el ensayo de vibraciones es posible definir las propiedades de la madera con un alto grado de precisión, siendo más eficaces y fáciles de emplear que otros END y CV. Asimismo Carballo *et al.* (2009) indica que debería fomentarse el empleo de esta técnica en la clasificación de madera aserrada, pues se produce menos descarte de madera que con la CV (Carballo *et al.*, 2007a).



Fig. 36. Termografía de un techo de madera. **Fig. 37.** Imagen de un muro construido mediante entramado de madera. **Fig. 38.** Identificación de humedad.

3.2.1.6. Análisis de la termografía infrarroja (cámara térmica)

Gracias a las propiedades térmicas de la madera y a su intercambio de temperatura con el ambiente es posible identificar sus singularidades mediante infrarrojos (termogramas) (Montero, 2013) y estimar propiedades como la densidad, MOE o MOR (C. B. Wessels *et al.*, 2011) (figuras 36, 37 y 38). Sin embargo el equipo ha de ser calibrado y no es un método de medición directa, pues requiere de un procesado para obtener los resultados.

Según López *et al.* (2014) es posible la identificación y medición de manera precisa de los defectos internos de la madera a una profundidad máxima de la superficie de 8mm y un diámetro de 12mm. Sin embargo a una profundidad de 12mm resulta difícil obtener una medición precisa (pues el contraste térmico de todos los defectos de la madera resultan similares entre sí) resultando difícil identificar el tipo de singularidad del que se trata.

Permite la identificación de defectos de 4mm de diámetro a 2mm de profundidad, y de 8mm de diámetro a 8mm de profundidad (en piezas de madera, de especie de hoja caduca, con superficie cepillada). En el caso del *P. sylvestris* a una profundidad de 8mm es difícil identificar 12mm de diámetro.

Las singularidades de la superficie son fácilmente detectables, sin embargo la textura y las variaciones de densidad dificultan la correcta identificación de los defectos internos. Es posible identificar los diferentes anillos y maderas estacionales (en el caso de las coníferas la diferencia es de 3 a 1 unidad termográfica entre la madera de verano y la de primavera respectivamente) (López *et al.*, 2014).



39



40

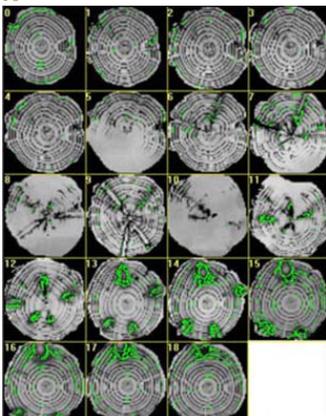


Fig. 39. Sección transversal de una sección de un tronco de madera.

Fig. 40. Reconstrucción volumétrica de la sección del tronco.

3.2.1.7. Análisis de los métodos nucleares: radiografía y tomografía computerizada.

La radiografía consiste en aplicar rayos X a la pieza de madera a estudiar (figuras 39 y 40). La madera es capaz de absorber en función de la densidad del material, una radiación (electrones, neutrones, rayos gamma y rayos X) a la que es expuesta (Montero, 2013). Sin embargo posee una desventaja, está limitado por el tamaño y dirección de las singularidades internas, siendo necesario que las fendas tenga al menos un 2% del espesor de la pieza y paralela al haz de emisión radiactiva.

La tomografía es capaz de reconstruir la sección transversal de una pieza, pero es una técnica poco empleada pues implica un elevado coste. Asimismo se emplea mayoritariamente para detección de grietas, pudriciones (Laudon *et al.*, 2012), estudios dendrocronológicos, aunque según S.M. Stängle *et al.* (2015) existen estudios que demuestran que la aplicación en aserradero de la tomografía computerizada sería una técnica útil pues optimizaría la identificación de defectos en la madera y la producción de los aserraderos (Aguilera *et al.*, 2002; Chang y Gazo, 2009; Lundahl y Grönlund, 2010 y Berglund *et al.*, 2013).

Según S.M. Stängle *et al.* (2015) esta técnica es capaz de identificar nudos con una gran precisión. Sin embargo Aguilera *et al.* (2002) afirma que debido a la velocidad del equipo en la toma de datos algunos de los nudos de pequeño tamaño no llegan a ser identificados. Asimismo S.M. Stängle *et al.* (2015) encuentra varias desventajas: esta técnica está limitada a troncos con diámetros inferiores a 45 cm y a especies de maderas no excesivamente duras, la presencia de grietas no permite identificar correctamente la ubicación de la

médula, el software empleado requiere de una mejora para detectar en tiempo real las singularidades de la madera y la adquisición del equipo supone una gran inversión económica por parte de los aserraderos (software, escáner, mantenimiento del equipo, resultados no inmediatos y procesado de datos, diferentes configuraciones del equipo según especies, etc).

Añade que no es un método rentable para aserraderos pequeños o medianos (Hodges *et al.*, 1990), sin embargo en Europa algunos aserraderos grandes ya utilizan este END con maderas blandas.

3.2.1.8. Análisis del georradar

Esta técnica consiste en el desplazamiento de una antena por la superficie del material a estudiar, que mediante impulsos electromagnéticos propaga una onda hacia el interior del material, la cual es parcialmente reflejada en las interfaces donde existe un contraste dieléctrico, obteniendo radargramas que posteriormente se procesan y analizan.

Según Rodríguez (2009) el empleo de la técnica del GPR es muy sencillo, lo cual supone una gran ventaja en la evaluación de la madera estructural. Asimismo, afirma que es una técnica más fiable que el resistógrafo y el ultrasonidos, para evaluar la anisotropía dieléctrica, la humedad y la densidad. Sin embargo, en la determinación de madera apta considera adecuada la aplicación conjunta de estas tres técnicas. Lo cual coincide con la opinión de otros autores nombrados anteriormente sobre la idoneidad de la aplicación conjunta de diferentes END, sin que ninguno de ellos sea lo suficientemente preciso por sí solo.

Asimismo afirma que para determinar la clase resistente de la madera el GPR es superior al CV y al ultrasonidos, los cuales la subestiman, mientras el GPR permite disminuir el error en la asignación de calidades y el error que se comete en la determinación de madera apta para uso estructural cuando no lo es. Con el GPR se comete un error del 8% mientras que con la CV es del 18% y con ultrasonidos es del 23%. Esta autora afirma que en el estudio realizado en Rodríguez (2009) de entre todas las piezas rechazadas por la CV (un 68%), el GPR detecta que un 63% de las mismas son aptas para uso estructural, a pesar de la presencia de singularidades.

Otros autores también se muestran optimistas respecto a este END. Según Carballo *et al.*, 2009, los resultados obtenidos en diferentes estudios sobre GPR son interesantes (Capuz, 2003; Rodríguez *et al.*, 2007a, 2007b y 2008), pues el GPR determina MOE con mejor precisión que el resistógrafo, con R^2 mayores. Asimismo se obtienen R^2 del 90% en la determinación del contenido de humedad en la madera (Rodríguez, 2009). Según Carballo *et al.*, (2009), en (Rodríguez, 2009) la autora *recopila un cuerpo de doctrina suficiente* para permitir la utilización de esta técnica en la inspección y diagnóstico de estructuras en madera. Sin embargo la tesis doctoral de Rodríguez contiene algunas deficiencias respecto al empleo del GPR:

- No establece el alcance del GPR mas allá de una diagnosis por imagen y cálculo de humedad.
- No establecer unos parámetros para asignar una clase estructural por medio del GPR y la CV no identifica los nudos pequeños.
- El GPR no es capaz de diferenciar los nudos de las fendas.

- No establece un protocolo/metodología para realizar este ensayo.
- Existe el inconveniente del plano de aplicación del GPR y la anisotropía de la madera. Dependiendo del plano de aplicación detecta o no la singularidad.

Para la obtención de la nueva metodología aplicada en la presente tesis doctoral, hallada a través de la investigación realizada en la presente tesis, no se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en otros estudios realizados en GPR y madera, como los nombrados anteriormente.

4

Plan experimental

En el Plan Experimental se ha estudiado la resistencia a flexión de la madera estructural y la influencia que la posición de los nudos tiene en ella y se ha contrastado con la localización e identificación de los nudos obtenidos mediante la lectura del GPR. Por lo que los objetivos de este plan han sido los siguientes:

1. Identificar los nudos presentes en las piezas mediante CV.
2. Identificar los nudos presentes en las piezas mediante la técnica del GPR.
3. Realización del ensayo mecánico a flexión para determinar las características de la madera a ensayar.
4. Puesta en común de resultados obtenidos.

61 ††

4.1. Equipo humano y emplazamiento

El equipo humano que ha formado parte de este trabajo de investigación ha sido el Personal del Laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y el Grupo de Investigación de la UPV denominado “de Recuperación del Patrimonio Cultural”.

Este trabajo ha sido desarrollado en varios emplazamientos. La toma de datos y los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia. El estudio y procesado de datos de la CV se

llevó a cabo en Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica superior de Arquitectura de Valencia. El estudio y procesado de datos del GPR se llevó a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartografía y Topografía de la Universidad Politécnica de Valencia.

4.2. Equipo material

4.2.1. Pequeño material

Pequeño material y material auxiliar: Para la toma de datos de las vigas (dimensiones generales de la pieza y localización y dimensiones de las singularidades) se ha empleado el siguiente material:

- Escuadras de diferentes tamaños.
- Flexómetro con precisión milimétrica.
- Galga
- Higrómetro

4.2.2. Maquinaria para los ensayos

- Pórtico IBERTEST para ensayo mecánico
- Georradar

4.3. Material a ensayar

El material a ensayar ha sido financiado mediante el proyecto de investigación “*Integración de técnicas avanzadas no destructivas de evaluación de madera estructural*” (Ref: BIA-00342/2008) dentro del Plan Nacional de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia.

En el estudio fueron ensayadas 80 piezas de madera de

dimensiones aproximadas 200 mm x 77mm x 2000mm en condición seca y contenido de humedad 12,5 – 13,5 %, proporcionadas por un almacén comercial de la provincia de Valencia. El 95 % de las muestras presentaban más de 5 nudos.

Para el estudio se seleccionó la madera de *Pinus sylvestris* L, por su uso frecuente en estructuras de madera en España.

A continuación se enumeran el número de piezas estudiadas, dimensiones y especie a la que pertenecen y uso:

- 40 piezas de madera nueva de Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) - Pino tipo 1: La denominada en el texto como Ps1 es asimilable en calidad a la ME1 de la norma EN-UNE 56544.
- 40 piezas de madera nueva de Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) – Pino tipo 2. La Ps2 debe asociarse con la clase resistente ME2 de la norma EN-UNE 56544.

4. 4. Metodología general y desarrollo

La metodología aplicar fue la siguiente:

Parte 1. Estudio previo

- 1°. Estudio bibliográfico. Se ha centrado en madera estructural, CV, END y MEG.
- 2°. Selección de las piezas en aserradero y traslado al laboratorio.

Parte 2. Aplicación de las técnicas – Fase experimental

- 3°. Aplicación del método de CV. Registro escrito de cada una de las piezas, mediante toma de datos y croquis. Dimensiones y posición de cada uno de los nudos y características de la pieza de madera.
- 4°. Aplicación del método del GPR en cada una de las piezas. Se realizaron once lecturas por pieza (tres en cada cara, una en cada canto y tres a lo largo del fuste siguiendo el plano de la testa).
- 5°. Ensayo mecánico a flexión. El puente de ensayo de flexión es el modelo PEF-150-HDA de IBERTEST, con pistón hidráulico y capacidad de carga de 150 kN de carga máxima de ensayo.

Parte 3. Obtención y discusión de resultados

- 6°. Análisis de los registros del Georradar para la obtención de la nueva metodología. Se procesaron y filtraron con el software RADAN 6.6 (GSSI) para obtener las imágenes de los radargramas y los espectros.
- 7°. Puesta en común de las lecturas del GPR junto con los datos obtenidos de la CV y el ensayo mecánico a flexión.

4.4.1. Estudio bibliográfico

El paso inicial en desarrollo del trabajo de investigación ha sido el estudio bibliográfico relacionado con la madera estructural, necesario para conocer y valorar el estado de la cuestión y concretar los objetivos principales de esta tesis. Se han consultado documentos oficiales, libros, revistas y artículos de investigación, siendo los principales temas sobre los que se ha realizado esta lectura los siguientes:

- Propiedades de la madera y madera estructural.
- Normativa de madera estructural nacional y extranjera.
- Métodos de clasificación de madera estructural y ensayos destructivos y no destructivos.
- Estructuras de madera de nuevo uso y preexistentes en rehabilitación de edificios.
- Técnica del GPR.

Todo el material consultado está contenido en el apartado de bibliografía de la presente Tesis Doctoral, haciendo referencia al mismo en cada una de las referencias del texto a lo largo del mismo.

4.4.2. Técnicas aplicadas

4.4.2.1. Aplicación de la técnica de la clasificación visual

Realización de toma de datos y croquis de las mismas. Identificación, medición y registro de las singularidades (nudos, fendas, gemas, desviación de la fibra, bolsas de resina).

El sistema de referencia empleado en las piezas ha sido el siguiente:

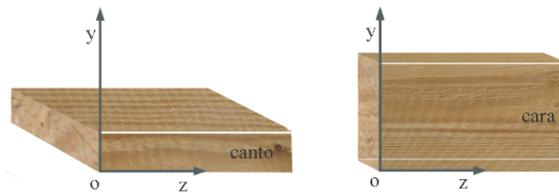


Figura 41. Sistemas de referencia empleados para la CV y el GPR.

Una vez evaluados y registradas las singularidades de las piezas se ha realizado la CV según la norma UNE 56544 (tabla 1):

Tabla 3 – Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ mm

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 2/3$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO ⁽¹⁾		
– Pino silvestre		Sin limitación
– Pino laricio		Sin limitación
– Pino gallego y pinaster		Sin limitación
– Pino insigne (radiata)		Sin limitación
FENDAS	De secado ^{(2) (3)}	$f \leq 3/5$ Las fendas de contracción sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.
	– Rayo – Heladura – Abatimiento	No permitidas
ACEBOLLADURAS		No permitidas
BOLSAS DE RESINA y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor o igual que 1,5·"h"
MADERA DE COMPRESIÓN		Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1:6 (16,7%)
GEMAS		
– longitud		$\leq 1/3$ de "L"
– dimensión relativa		$g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS		
– Muérdago (<i>V. album</i>)		– No se admite
– Azulado		– Se admite
– Pudrición		– No se admite
– Galerías de insectos xilófagos		– No se admiten
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4) (5)}		
– Curvatura de cara		20 (10) mm (para una longitud de 2 m)
– Curvatura de canto		12 (8) mm (para una longitud de 2 m)
– Alabeo		2 (1) mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
– Abarquillado		sin limitación
<p>(1) Estos criterios sólo se consideran cuando se comercializa en húmedo.</p> <p>(2) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.</p> <p>(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad.</p> <p>(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.</p> <p>(5) Se toman los valores más exigentes indicados entre paréntesis, cuando la calidad MEG de lugar a una clase resistente superior a C18.</p>		

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD POLITECNICA VALENCIA-HEMEROTECA
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla 1. : Tabla 3 de la Norma UNE 56544:2011- Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ cm

4.4.2.2. Aplicación de la técnica del GPR.

Para el estudio de las maderas se empleó un GPR SIR-10H (GSSI) con una antena de frecuencia 1,6 GHz (Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI)). Posteriormente se procesaron y filtraron con el software RADAN 6.6 (GSSI) para obtener las imágenes de los radargramas y los espectros.

Se realizaron ocho lecturas por pieza (tres en cada cara y una en cada canto), situando la antena apoyada sobre la superficie de las viguetas. Cuando la antena se situaba en las testas de las piezas de madera, la microonda se propagaba en la dirección longitudinal de la vigueta, mientras que cuando la antena se situaba en la cara o en el canto de la pieza de madera, la onda se propagaba en la dirección transversal.

4.4.2.3. Ensayo de la resistencia a flexión axial

Las piezas se ensayaron a flexión estática en una máquina IBERTEST de 150 kN de capacidad de carga, mediante el procedimiento descrito en la norma UNE EN-408:2010

Para las estimaciones de humedad, densidad, módulos de elasticidad se procedió según lo expuesto en la norma EN 408:2010 y en los protocolos utilizados en el laboratorio acreditado del INIA para ensayos de madera estructural. En el ensayo se determinó la resistencia a la flexión axial y el módulo de elasticidad global en flexión.

Para predecir la resistencia de las piezas se verificó la correlación entre el MOR y los parámetros densidad básica, RAN, MOE y la posición de los nudos.

Discusión

DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

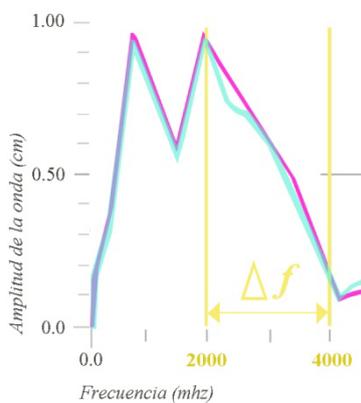


Gráfico 1. Detalle comparación de espectros. El espectro fucsia corresponde a cualquier zona de la viga libre de defectos (el espectro en estas zonas no varía). El espectro azul corresponde al punto $x=88\text{cm}$, concretamente los nudos 4 y 5 de la cara comprimida. En la superposición de ambos espectros se aprecia el cambio que sufre la curva en el área entre la frecuencia 2000 mHz y 4000 mHz., ya que aparecen pequeños picos de frecuencia. Este cambio indica la presencia de singularidades en la madera en ese punto. Sin embargo en la imagen del radargrama (figura 42) no ha sido posible identificarlos.

5.1. Metodología y justificación de la misma

Hasta la fecha el estudio de la madera por medio del GPR se había basado en el análisis visual del radargrama, intentando identificar la imagen del nudo en el radargrama (figura 42), dando lugar a resultados poco fiables.

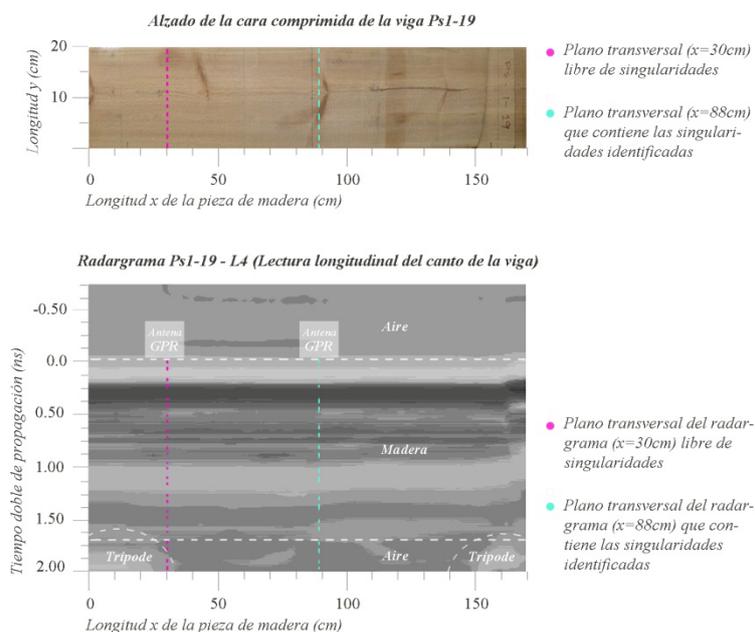


Figura 42. No es posible identificar los nudos 4 y 5 ($x=88\text{cm}$) de la cara comprimida de manera visual en el radargrama de viga PS1-19.

Sin embargo, el empleo de esta nueva metodología basada en el estudio de los espectros y no en el análisis visual de los radargramas, ha permitido avanzar en el empleo del GPR. Es un método más efectivo, pues mediante de este modo es

posible identificar singularidades de la madera como nudos o bolsas de resina, ya que en la zona de dichos defectos se produce un cambio en la gráfica del espectro, lo cual no deja lugar a dudas (gráfico 1).

5.1.1. Selección de los radargramas a analizar: Radargamas de Canto.

De entre los 858 radargramas que componen este estudio se decidió realizar únicamente el análisis de aquellos correspondientes a los cantos de las vigas (Ver Anexo 1), por dos razones:

Se supuso el caso más desfavorable de accesibilidad a una viga de madera. En obras de rehabilitación no es posible o aconsejable desmontar la pieza de madera para su estudio, y en las vigas de madera suele quedar accesible un canto de la misma, pues sus caras quedan ocultas por el artesonado de madera (es el caso de la Sala del Consulado del Mar de la Lonja de Valencia) (figura 43) o por el entrevigado cerámico (forjado de revoltón cerámico empleado en la arquitectura tradicional) (figura 44), y una de sus caras también queda oculta por la capa de compresión del forjado y el pavimento.

La lectura del GPR en la sección del canto abarca todos los nudos de la pieza, pues la antena comprende un área correspondiente a las dimensiones estudiadas (siendo el ancho de las vigas del estudio 7,9cm) (figura 45). Si se hubiera analizado la lectura del GPR por la cara de la pieza hubieran quedado nudos fuera del área de la antena.

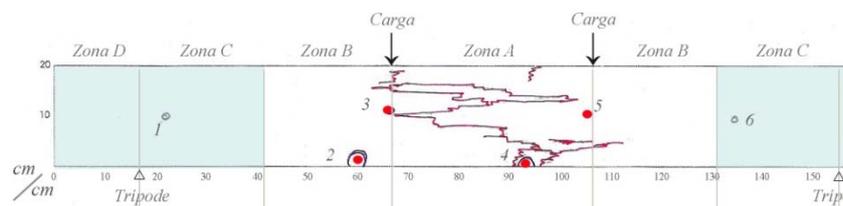
70 ††



Fig. 43. Artesonado de madera de la Sala del Consulado del Mar - Lonja de Valencia. **Fig. 44.** Sección constructiva de un forjado tradicional de viguetas de hormigón y bovedilla cerámica. **Fig. 45.** Detalle gráfico de área que abarca la señal del GPR.

5.1.2. Selección de la zona a analizar dentro de cada radargrama: Zonas A y B.

En el estudio estadístico de los resultados no ha sido posible incluir la identificación de los nudos situados en el área de influencia de la reflexión de los caballetes (zonas C y D) (figura 46), pues la reflexión de la onda sobre los mismos distorsionaba el registro de la misma al atravesar la madera que quedaba por encima de ellos (figura 47). Por ello, ante la duda, se ha preferido no incluirlos aunque la mayoría habían sido detectados por el GPR.



71 †

Figura 46. Esquema de las piezas a estudiar divididas por zonas.

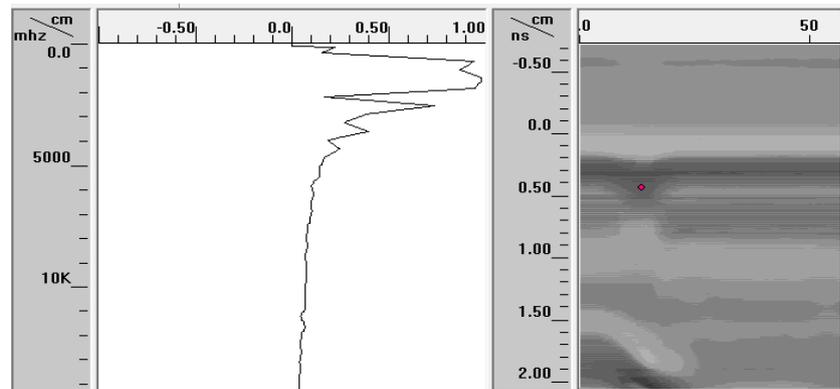


Figura 47. Espectro en la zona del caballete, correspondiente a la viga PS2-27. Este patrón de espectro se repetía en todas las vigas, en las zonas de los caballetes (+10cm en el punto donde estaban situados), hubiera o no un nudo por encima de ellos.

Por este motivo se decidió centrar el estudio en la identificación de los nudos que quedan dentro de las zonas A

y B, correspondientes a la zona central de la pieza, descartando así las zonas distorsionadas por la reflexión de los caballetes sobre los que se apoyaban las piezas de madera.

5.1.3. Procesado de los radargramas y análisis de los espectros

El análisis de GPR ha constado de dos fases, una primera fase de toma de datos en laboratorio aplicando el GPR a las piezas de madera, y una segunda fase de análisis de los registros mediante el software informático:

- Fase 1: Toma de datos en laboratorio (descrita anteriormente en el punto 4.4.3.2.)
- Fase 2: Análisis espectral de los radargramas.

Para el análisis espectral de los radargramas se empleó del software RADAN 6.6 (GSSI), aplicando la siguiente metodología:

- 1º. Normalización de la imagen. Ajuste de la longitud del radargrama a la longitud de la pieza a través del número de *scans*.
- 2º. Ampliación de la imagen en sentido horizontal.
- 3º. Selección del área de la pieza de madera y eliminación de las demás.
- 4º. Aplicación del filtro *Deconvolution*.
- 5º. Análisis espectral para la identificación de defectos de la madera (Nudos, fendas, bolsas de resina...)
- 6º. Cotejado de la identificación de nudos mediante el GPR con la CV realizada.

5.1.4. Análisis espectral

La propagación de una onda por un medio depende, entre otros factores, de la constante dieléctrica del medio (de su permitividad dieléctrica), la cual tiene relación directa con la densidad y humedad del medio.

Es sabido que mediante las características dieléctricas de un material es posible determinar su absorción de energía al exponerse a una frecuencia dentro del rango de las microondas. Según Oloyede y Groombridge (2000) existe una relación entre el valor de la constante dieléctrica y la energía absorbida por el material al ser calentado dieléctricamente.

Cuando la madera es sometida a un campo eléctrico, su respuesta dieléctrica varía debido a su composición heterogénea (materia leñosa, agua y aire), la cual le confiere un comportamiento dieléctrico que varía principalmente según la aplicación de la frecuencia del campo (de manera inversamente proporcional) y la dirección de las fibras (Muñoz y Vignote, s.f.). Asimismo la constante dieléctrica de la madera es proporcional a su densidad y depende del contenido de humedad de la madera.

Dicho comportamiento dieléctrico sometido a las frecuencias de las microondas ha sido estudiado ampliamente (Kabir et al., 1997 y 2000; Olmi et al, 2000; Sahin, 2002; Sahin y Nügul, 2004) y más concretamente para predecir nudos y defectos (Kabir et al., 1998; Barandit et al, 2006; Kaestner y Baath, 2000) y en la predicción de la humedad y la densidad (Johansson et al., 2003; Lundgren et al., 2006).

La directa relación entre la humedad, la densidad y la respuesta dieléctrica de la madera sometida a un campo de frecuencias de microondas fue determinante para que este estudio se centrara en el análisis de los espectros (figura 48).

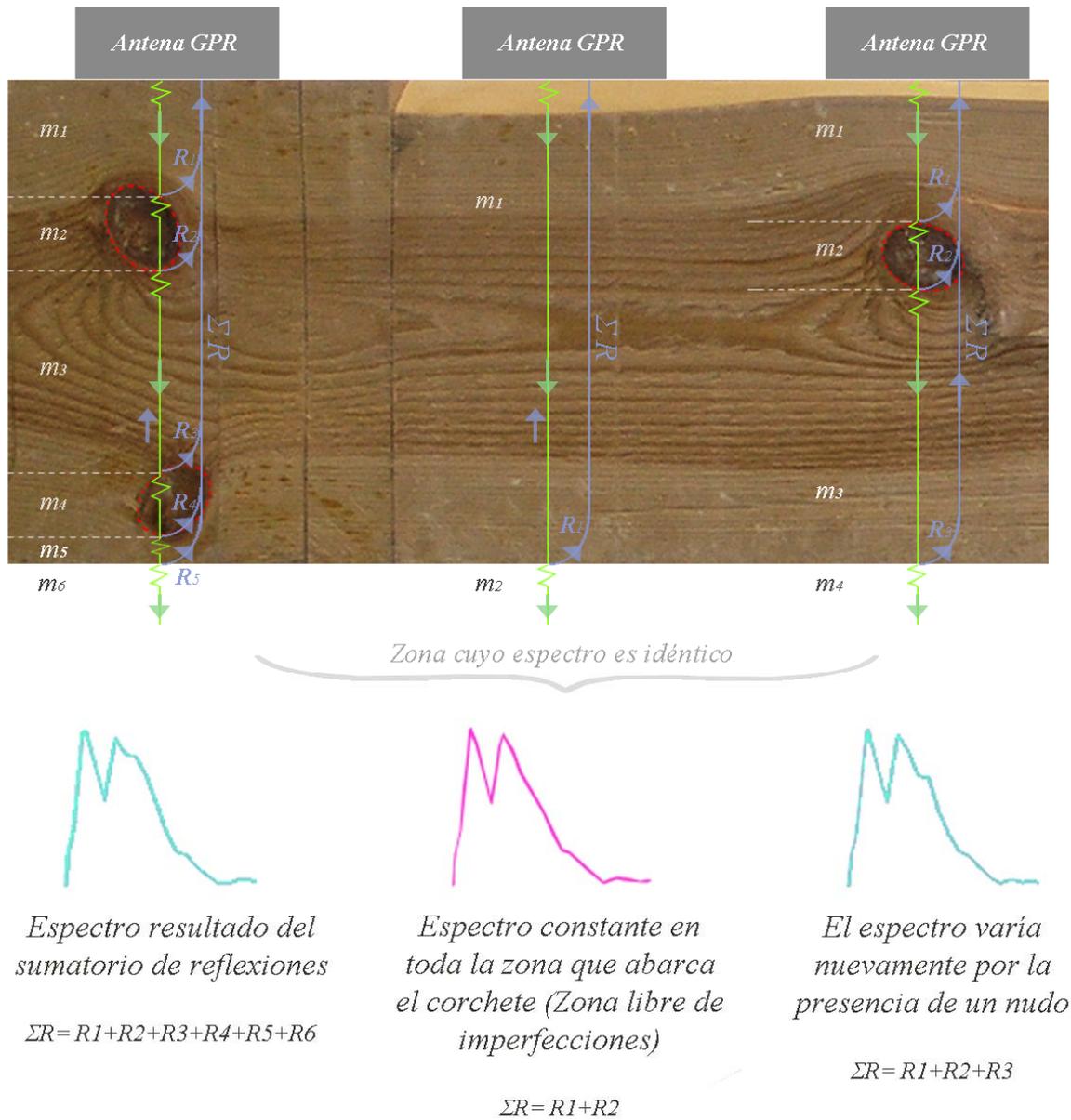


Fig. 48. Viga Ps2-19. Esquemas de onda GPR atravesando un medio material heterogéneo ΣR (Sumatorio de Reflexiones). Cuando una onda atraviesa un único material el espectro se compone de una única reflexión del medio atravesado, mientras que cuando atraviesa varios materiales el espectro se compone de la suma de las reflexiones de todos los medios que atraviesa.

El espectro del GPR muestra la respuesta del material a la señal emitida por el GPR, mediante una gráfica en la que se representa la amplitud de la señal en un rango determinado de frecuencias. Los picos de la gráfica son frecuencias dominantes (la respuesta del material), la superposición de las frecuencias de todas las reflexiones del medio atravesado.

Cuando una onda atraviesa un medio no homogéneo, dicha onda recoge las diferentes respuestas de las heterogeneidades con sus frecuencias propias, obteniendo una superposición de ondas de varias frecuencias. Si el material es homogéneo no se produce ninguna variación en los espectros (correspondientes a los diferentes puntos o plano transversal respecto de la dirección del recorrido del GPR).

La señal viaja por la verticalidad de la onda y cuando detecta una singularidad (nudo, fenda, bolsa de resina), se produce un nuevo aporte de reflexiones. Este nuevo aporte frecuencial implica una variación en la gráfica del espectro (gráficos 2 y 3). Si el material es homogéneo no se detecta ninguna singularidad, siendo el espectro idéntico a lo largo de todo el radargrama.

Dicha amplitud depende principalmente del coeficiente de transmisión y de reflexión del material que atraviesa la señal, aunque no es el único factor determinante de la respuesta del radargrama, pues otros factores son la humedad, el tipo de corte al que se ha sometido la pieza, la direccionalidad de las fibras, ...)

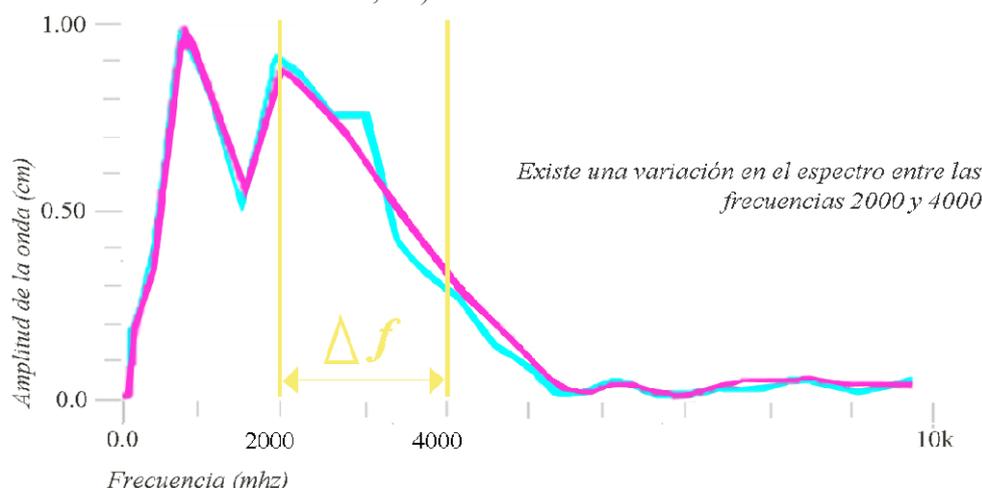


Gráfico 2. Superposición de espectros en dos puntos (zona de una viga con nudos y zona de dicha viga sin nudos). Siempre Existe una variación de la curva del espectro entre las mismas frecuencias.

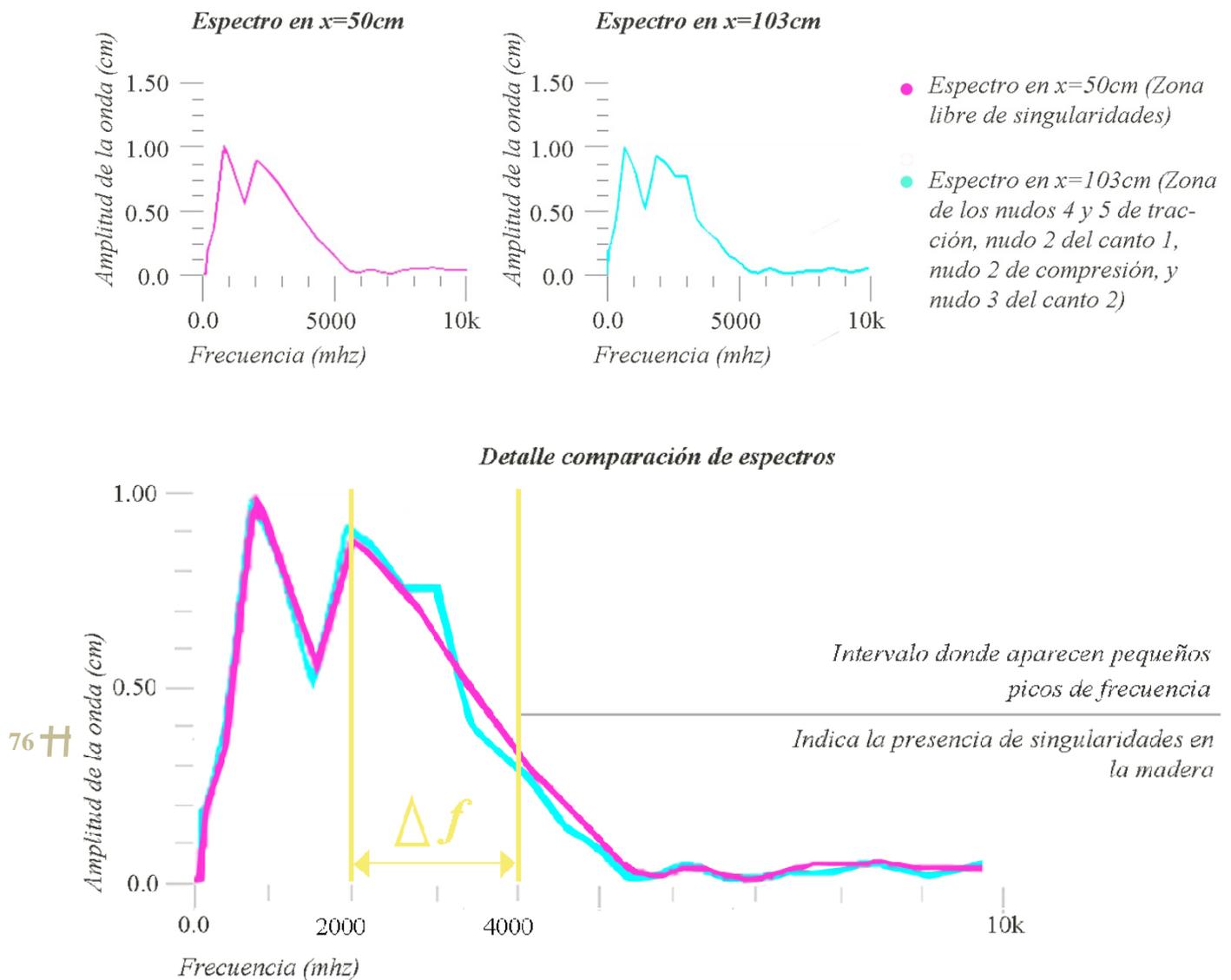


Gráfico 3. El espectro fucsia corresponde a una zona sin nudos en superficie de la viga PS2-37 (punto $x=50\text{cm}$ respecto del inicio de la viga) en la que se puede apreciar que la curva correspondiente a la frecuencia del GPR (emite a 1.6Ghz) tiene un descenso continuo. Mientras que en el espectro azul, correspondiente al punto $x=103\text{cm}$, se produce una un cambio en la forma de la curva (la respuesta se produce entre las frecuencias 2000 Ghz y 4000 Ghz), aparecen pequeños picos de frecuencia, debido a que la señal del GPR encuentra una singularidad correspondiente a varios nudos.

Se ha descartado la posibilidad de aplicar una antena con mayor frecuencia para obtener una mayor precisión en la detección de irregularidades. Esto se debe a que a mayor frecuencia de emisión menos capacidad de penetración en el material a estudiar. Esto se debe a que un aumento de mayor frecuencia de emisión tiene menos capacidad de penetración limitándose a los 2 primeros cm.

5.2. Identificación de defectos

A continuación se explican algunos ejemplos de vigas analizadas, cuyos casos son los más singulares puesto que el GPR identifica a través de los espectros singularidades ocultas bajo superficie, por donde posteriormente rompe la viga haya o no presencia de nudos en superficie.

Ejemplo 1

La pieza PS1-11 presente algún defecto oculto en la zona central de la rotura, correspondiente a la zona A de la viga, rompiendo por dicha zona en el Ensayo a Flexión.



Figura 49. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS1-11.

Viga Ps1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=30\text{cm}$

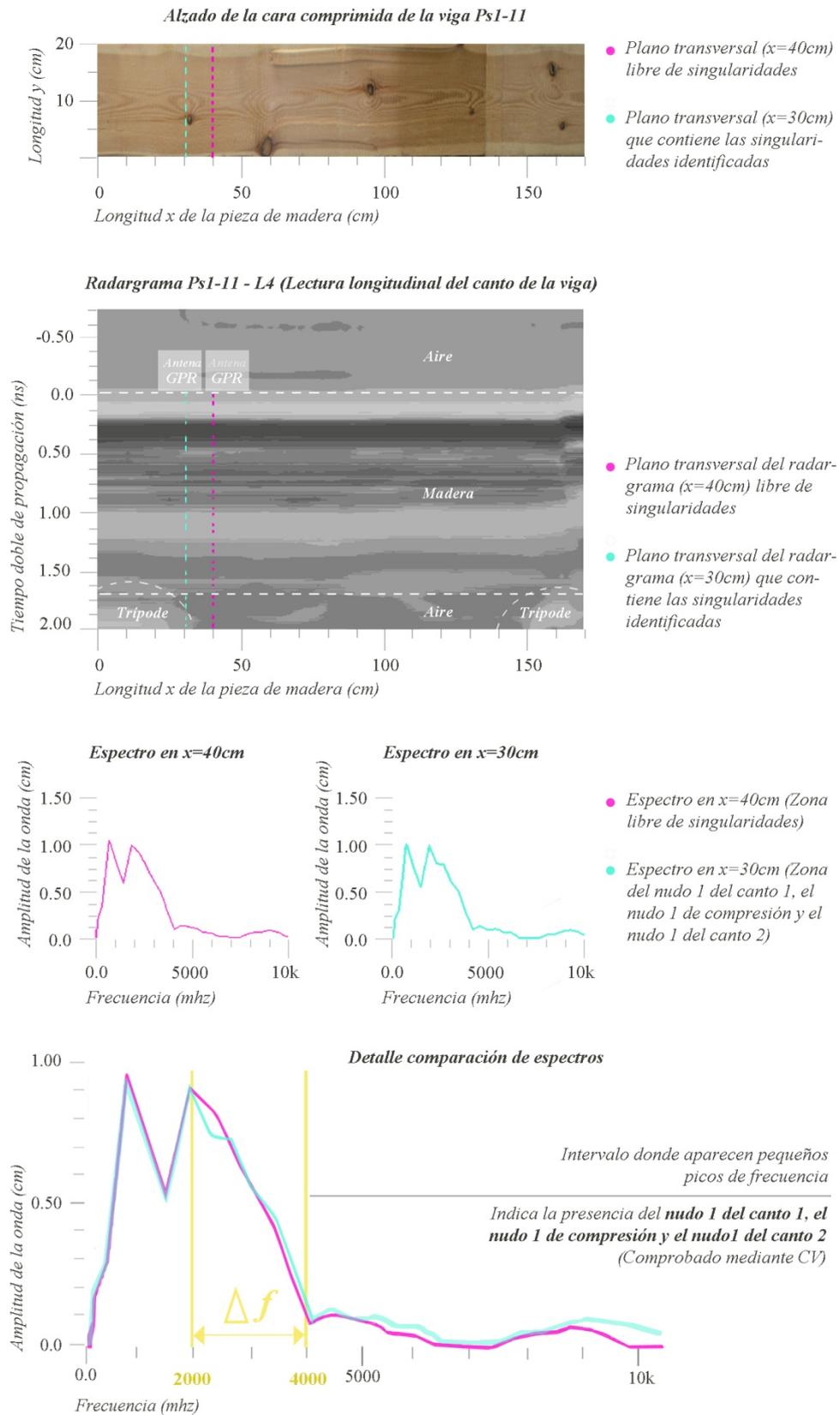


Figura 50. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=30\text{cm}$.

Viga Ps1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=30\text{cm}$

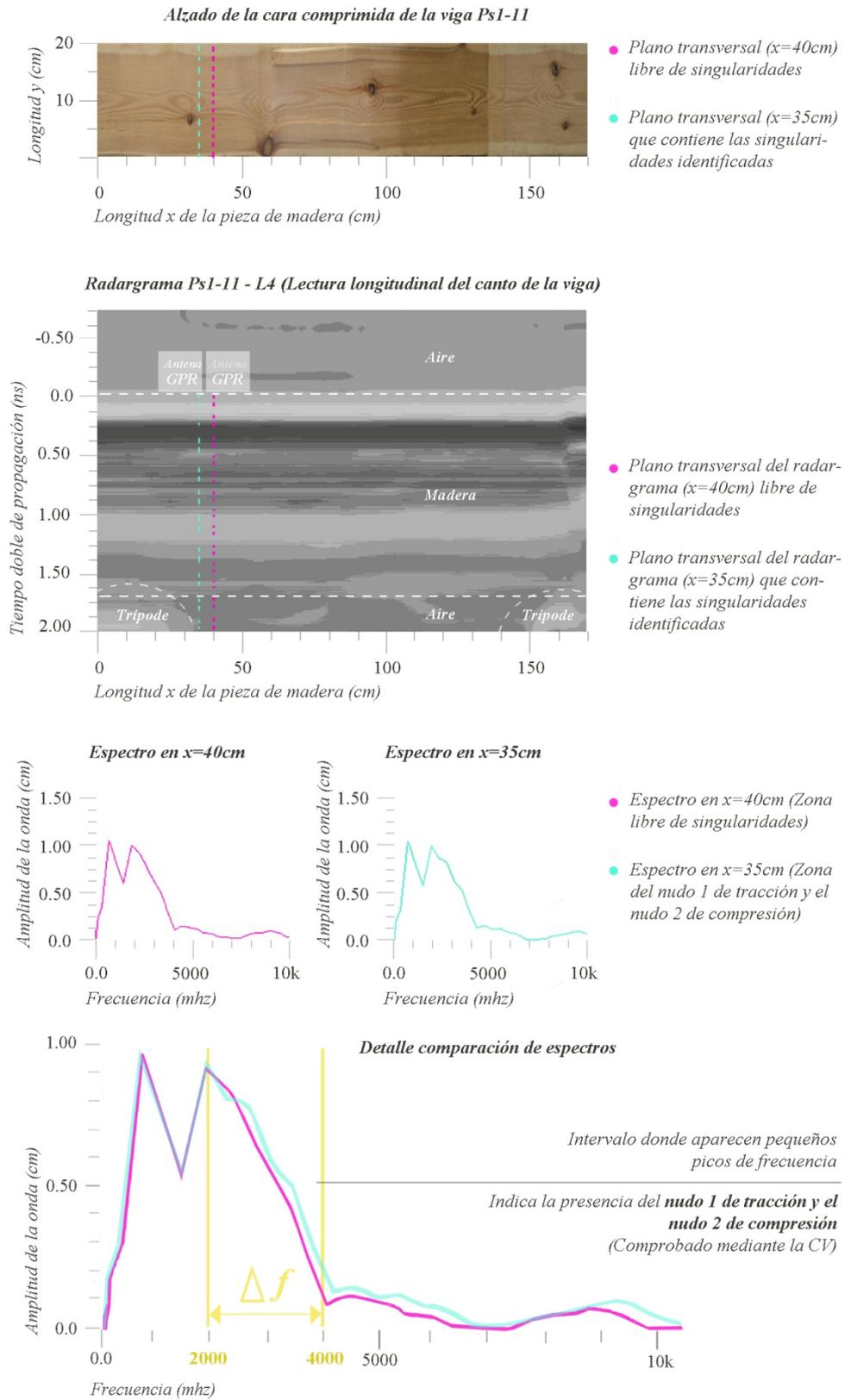


Figura 51. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=35\text{cm}$

Viga Ps1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=56\text{cm}$

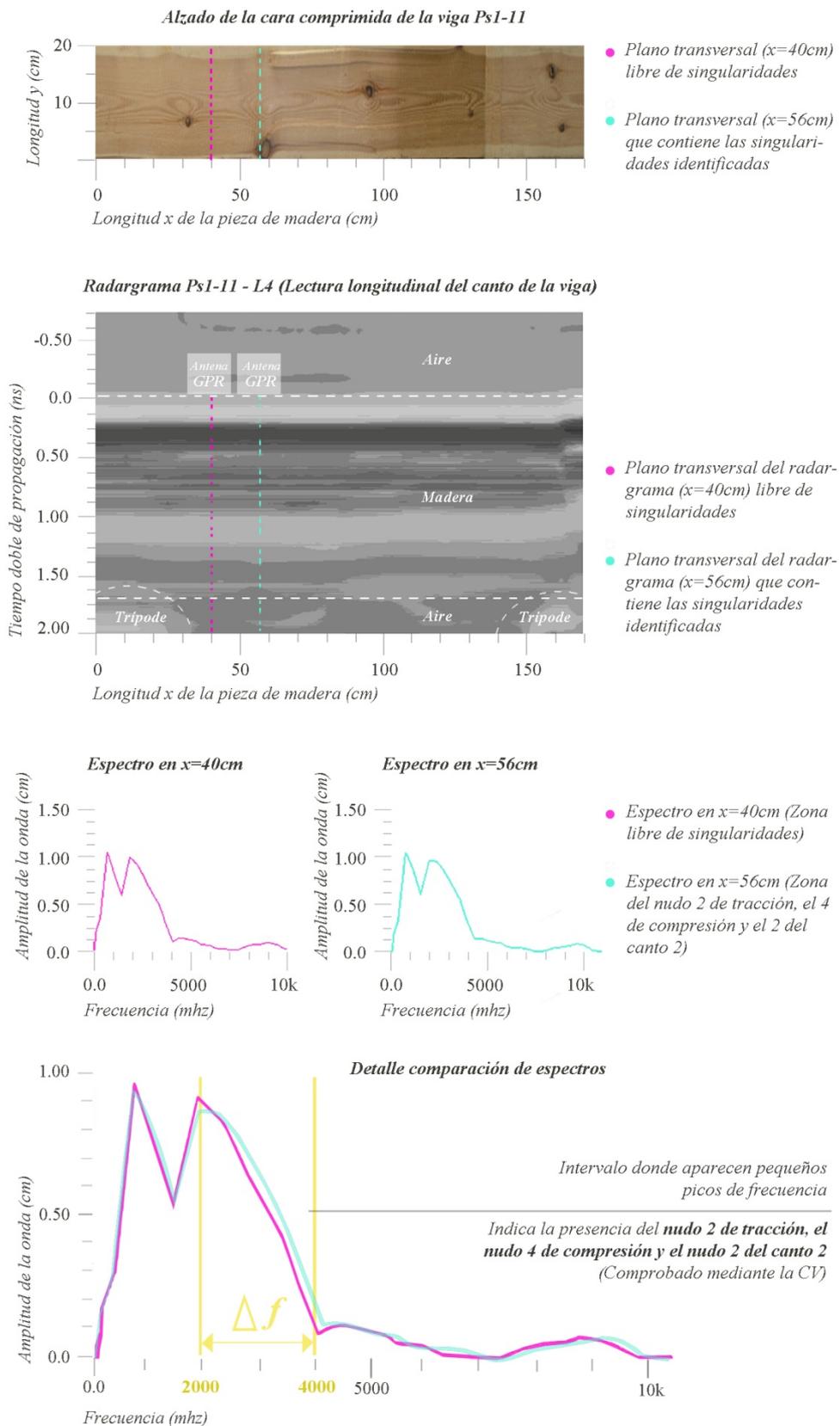


Figura 52. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=56\text{cm}$

Viga Ps1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=77\text{cm}$

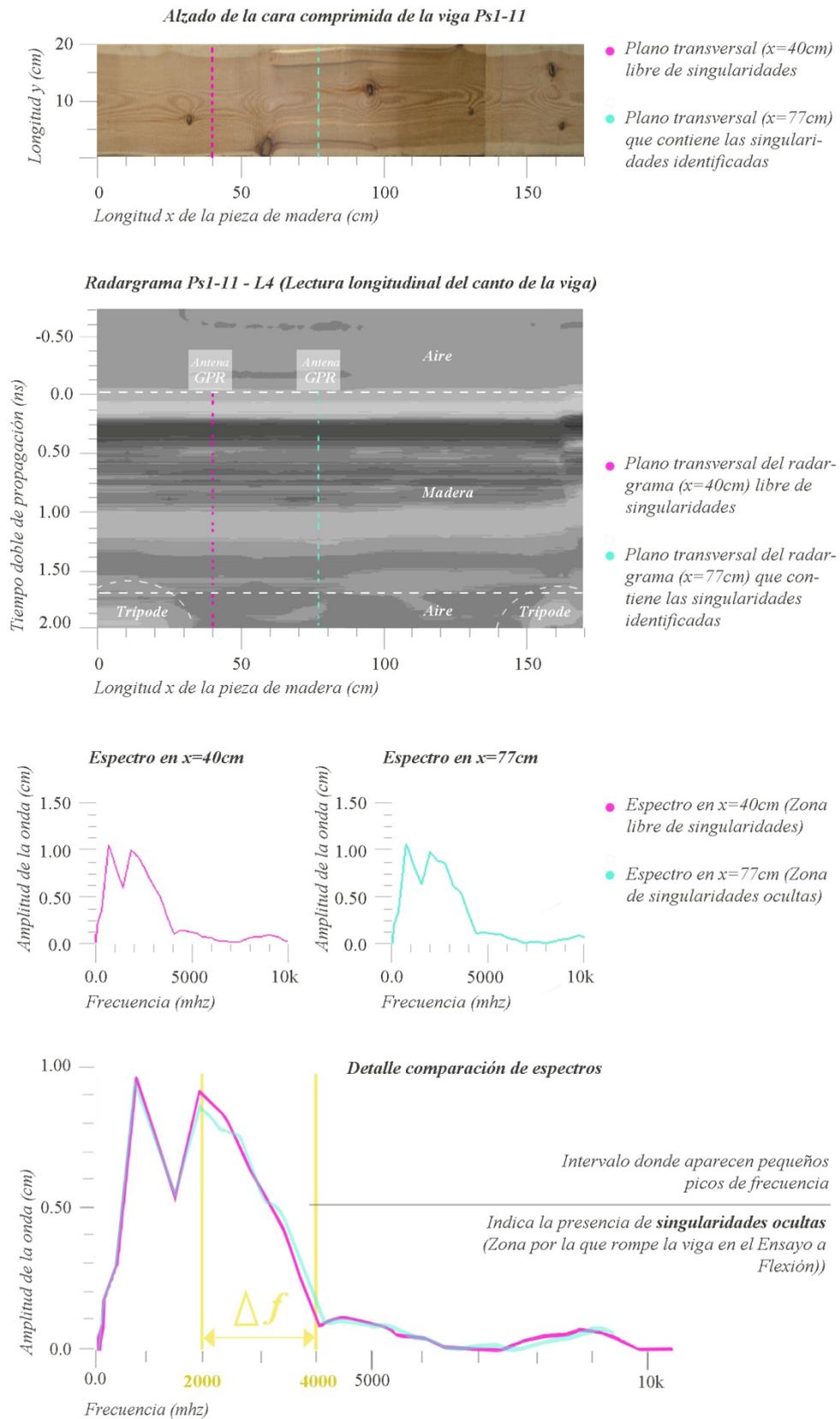


Figura 53. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=77\text{cm}$

Viga Ps1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=93\text{cm}$

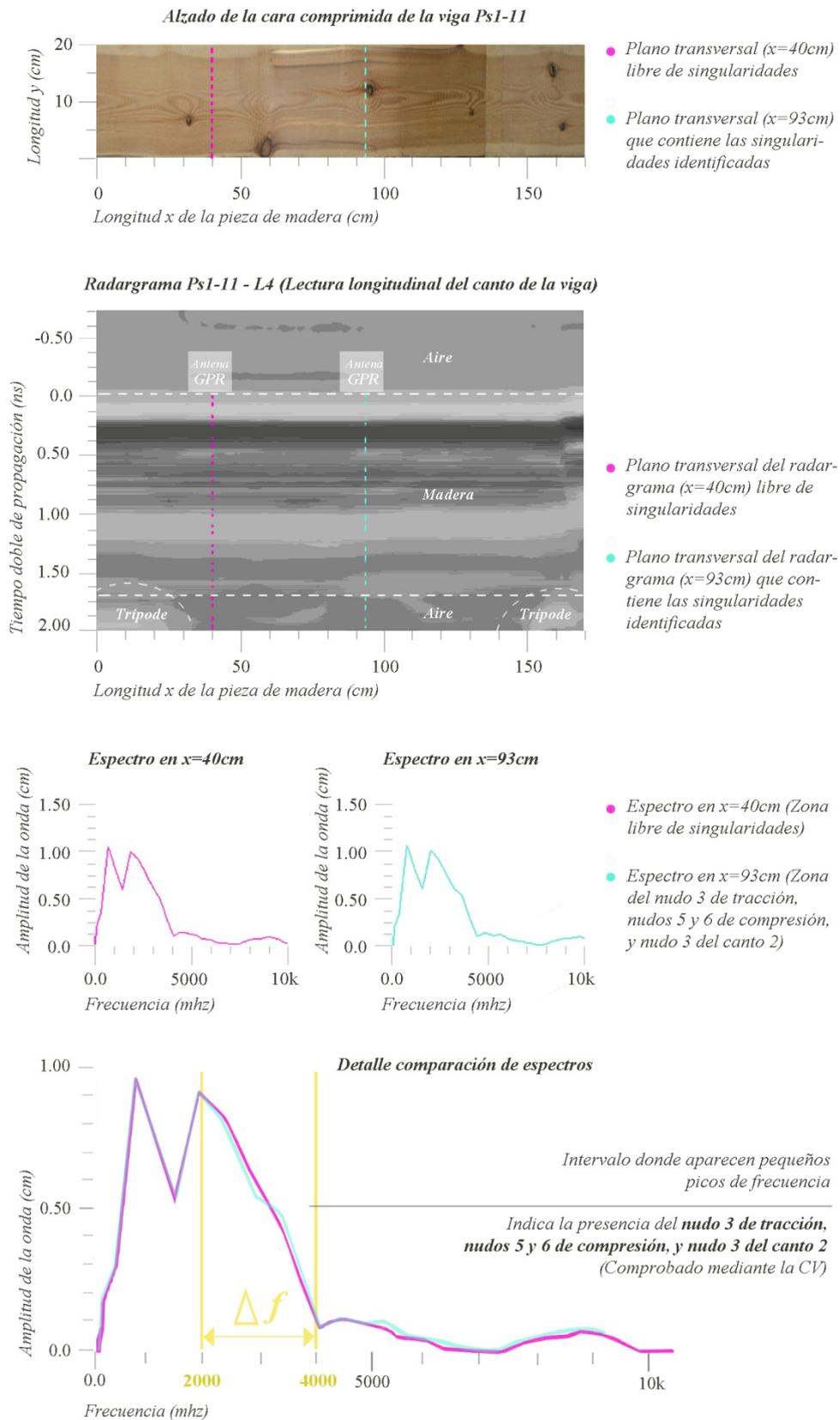


Figura 54. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=93\text{cm}$

Viga Ps1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=115\text{cm}$

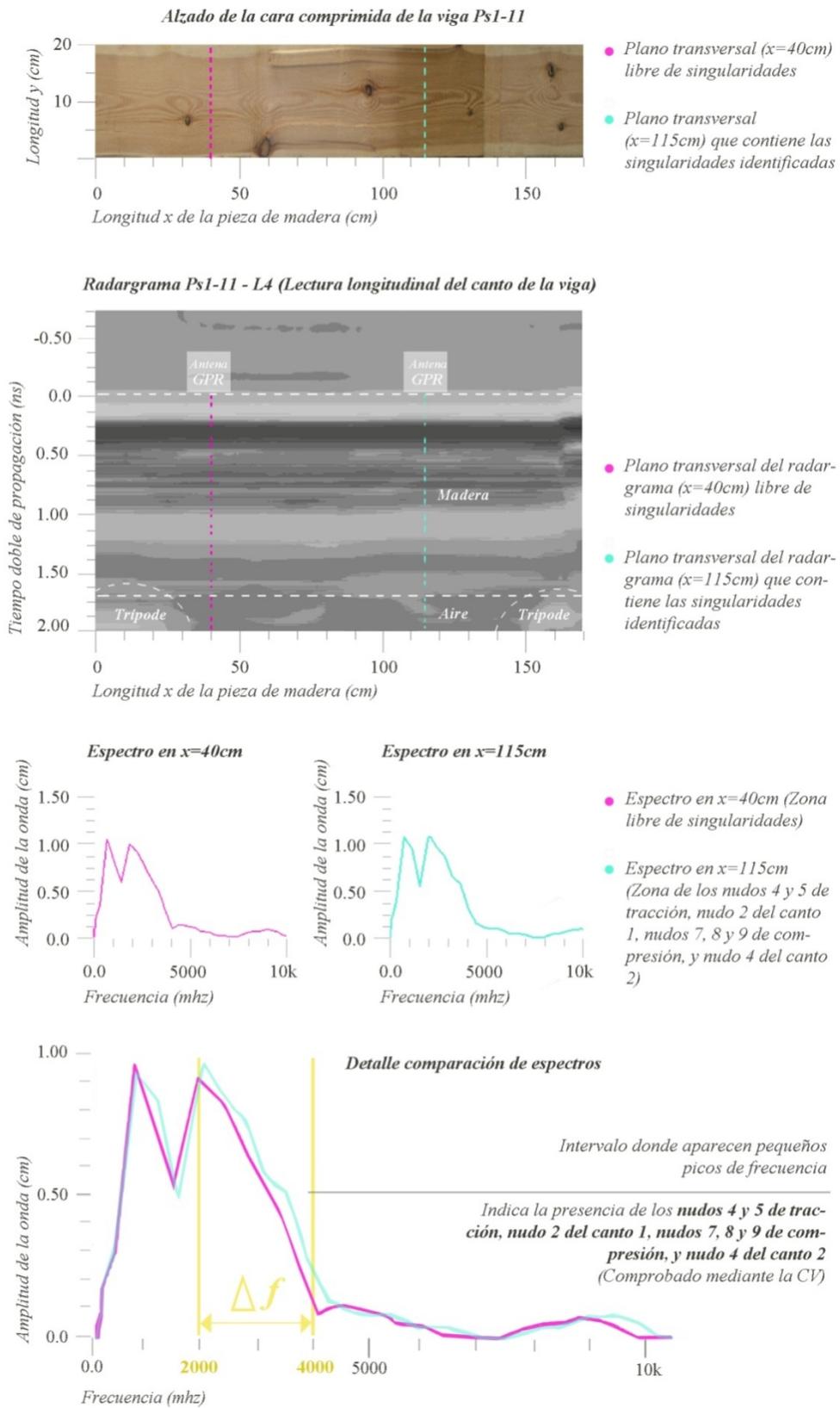


Figura 55. Viga PS1-11. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=115\text{cm}$

Ejemplo 2

La superficie de la pieza PS1-19 no presenta ningún nudo en superficie, lo cual a priori haría que fuese calificada como apta para uso estructural. Sin embargo el GPR detectó anomalías internas en la zona A, libre de nudos, por donde posteriormente rompió la viga en el ensayo a flexión.

84

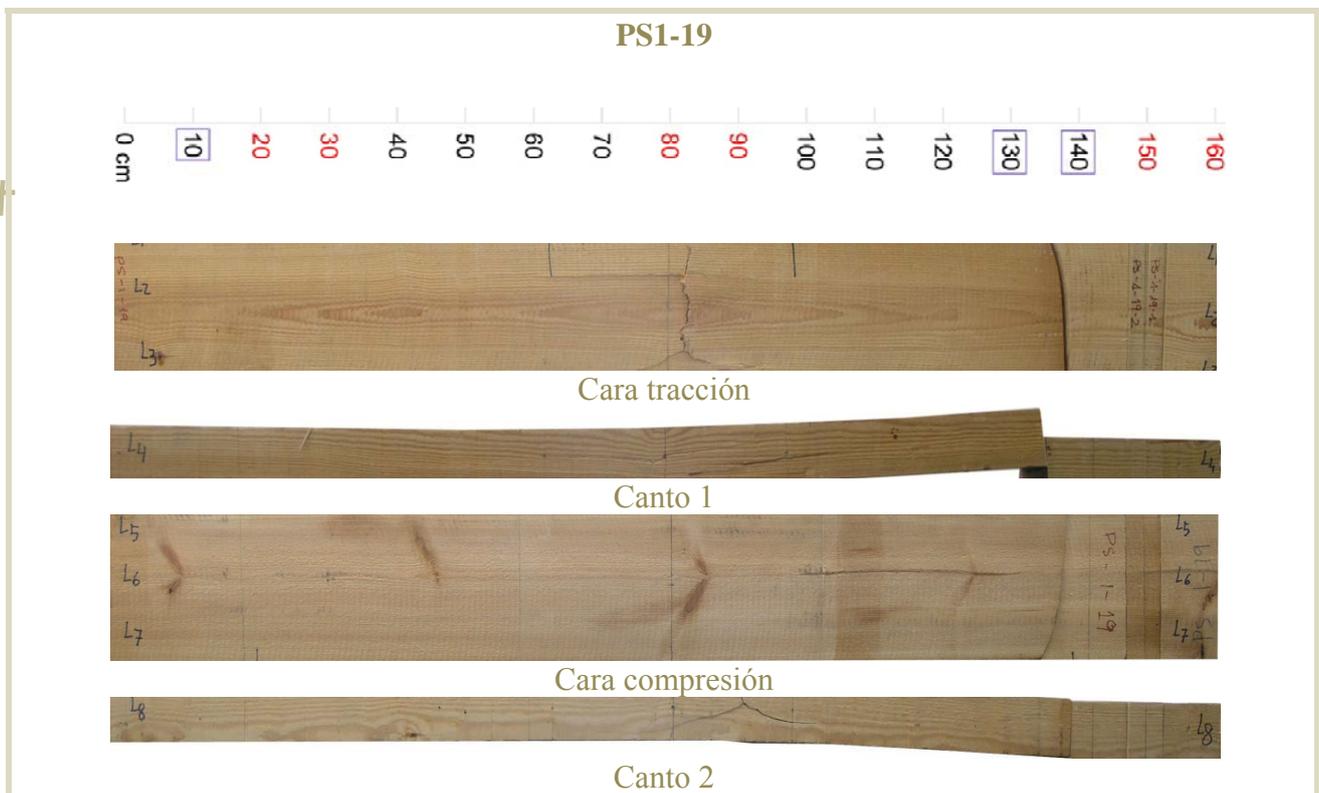


Figura 56. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS1-19.

Viga Ps1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=41\text{cm}$

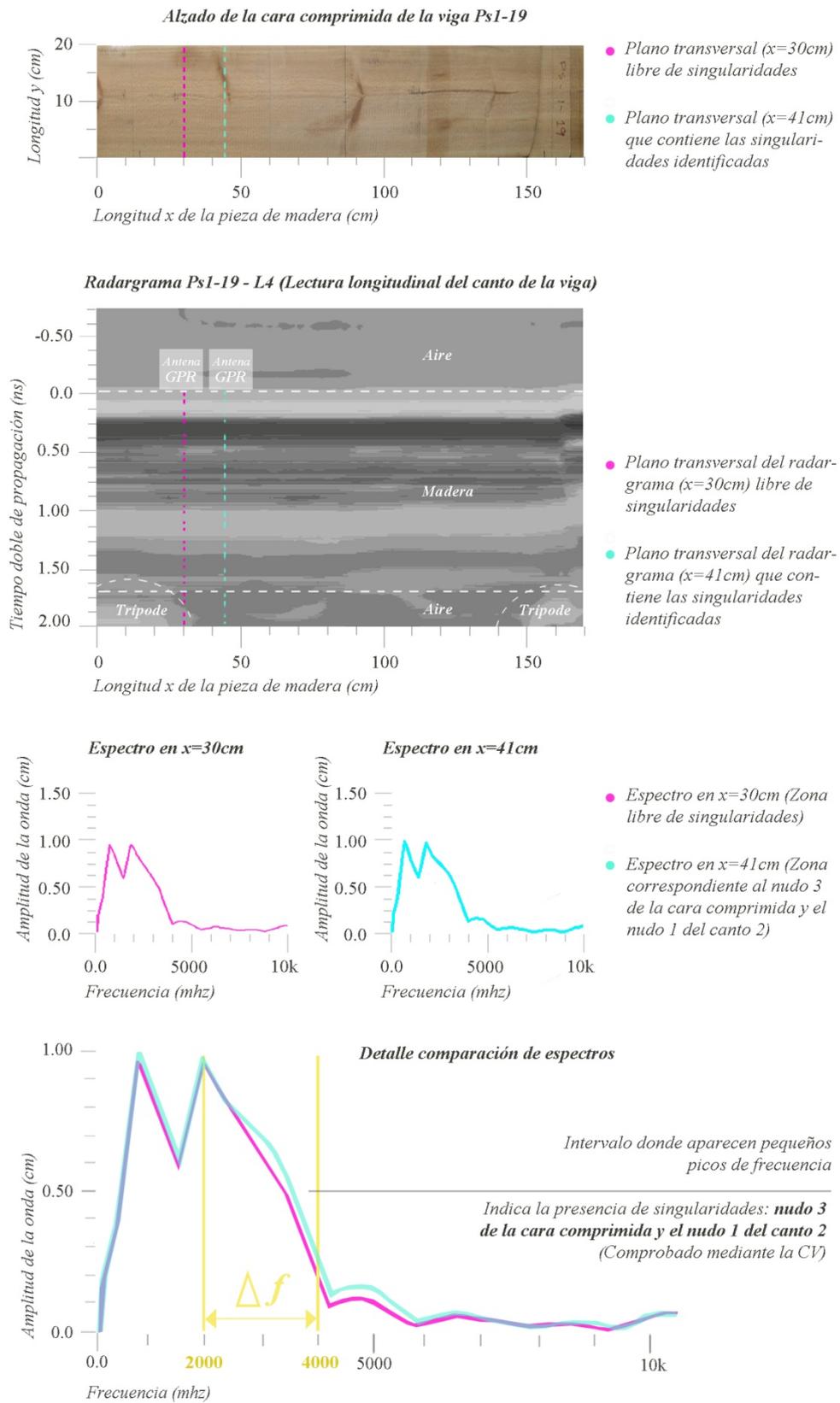


Figura 57. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=41\text{cm}$.

Viga Ps1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=52\text{cm}$

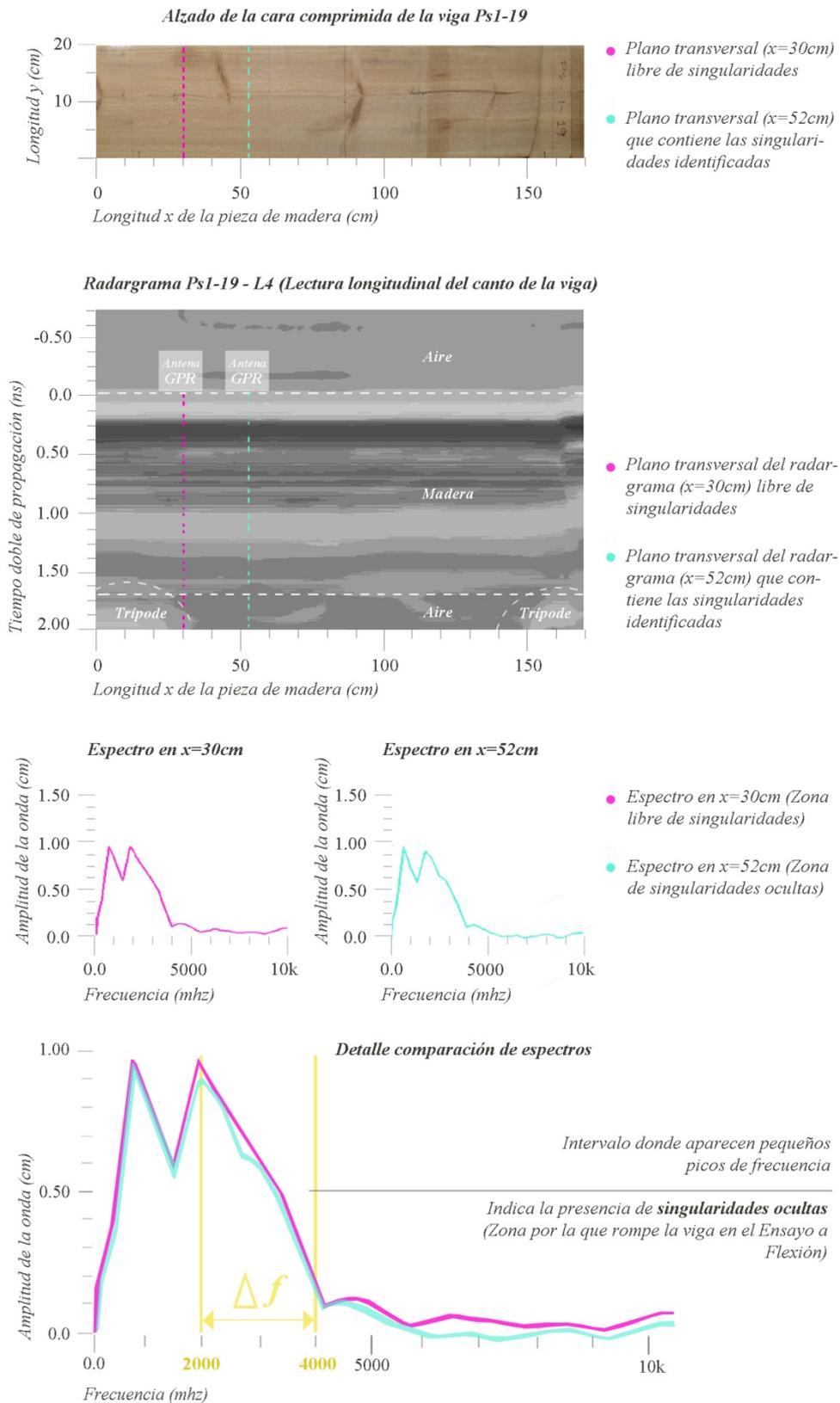


Figura 58. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=52\text{cm}$.

Viga Ps1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=88\text{cm}$

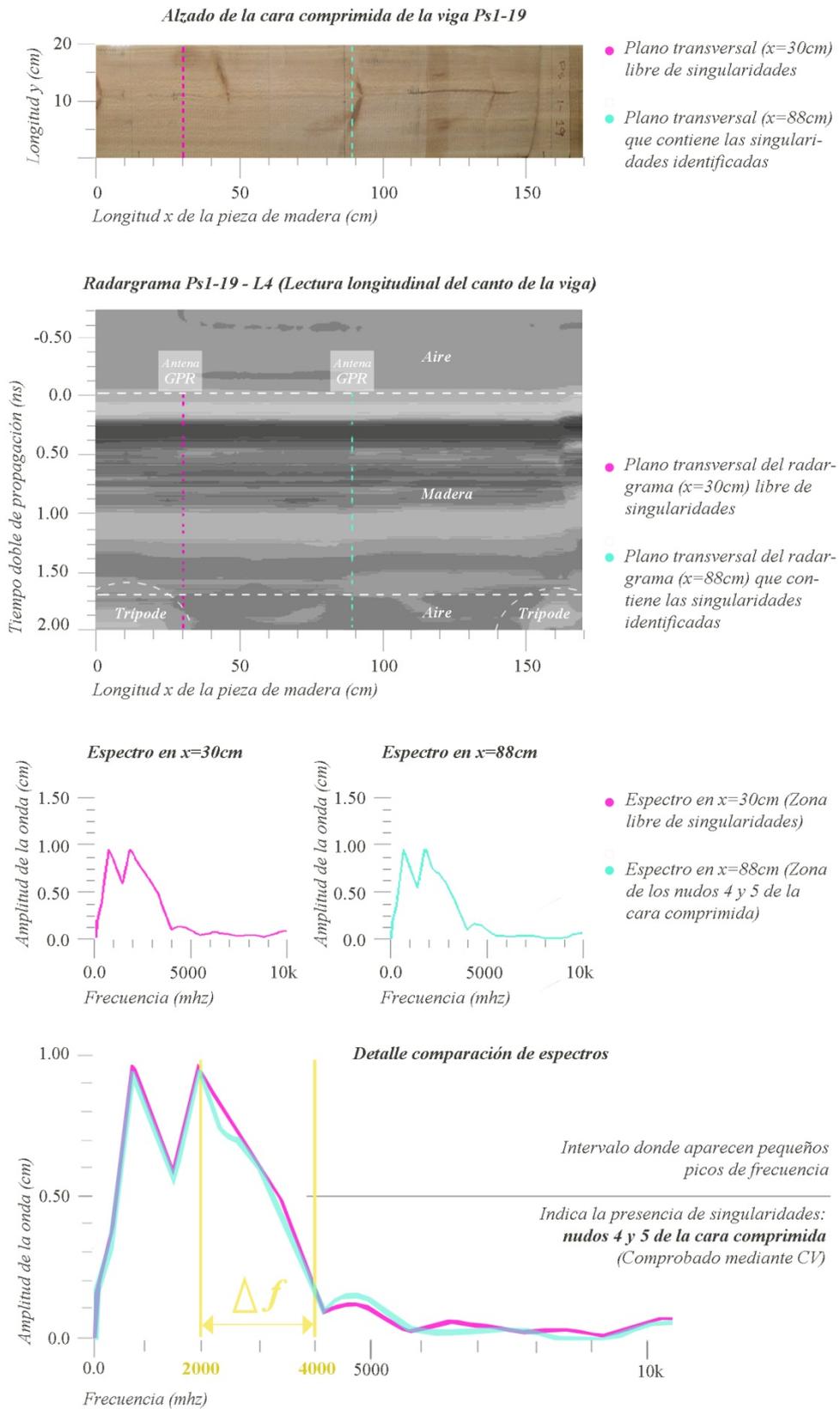


Figura 59. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=88\text{cm}$.

Viga Ps1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=101\text{cm}$

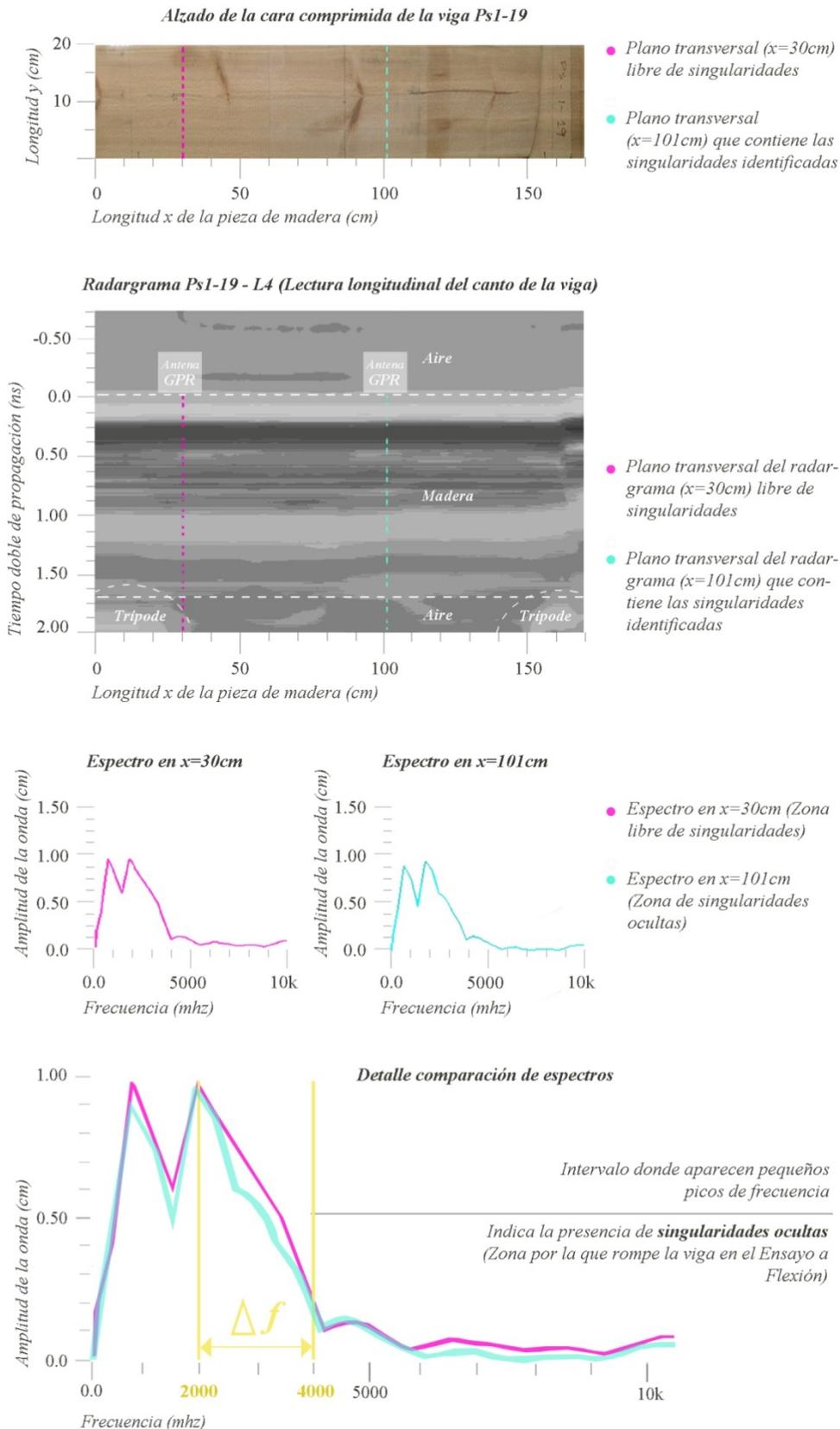


Figura 60. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=101\text{cm}$.

Viga Ps1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=126\text{cm}$

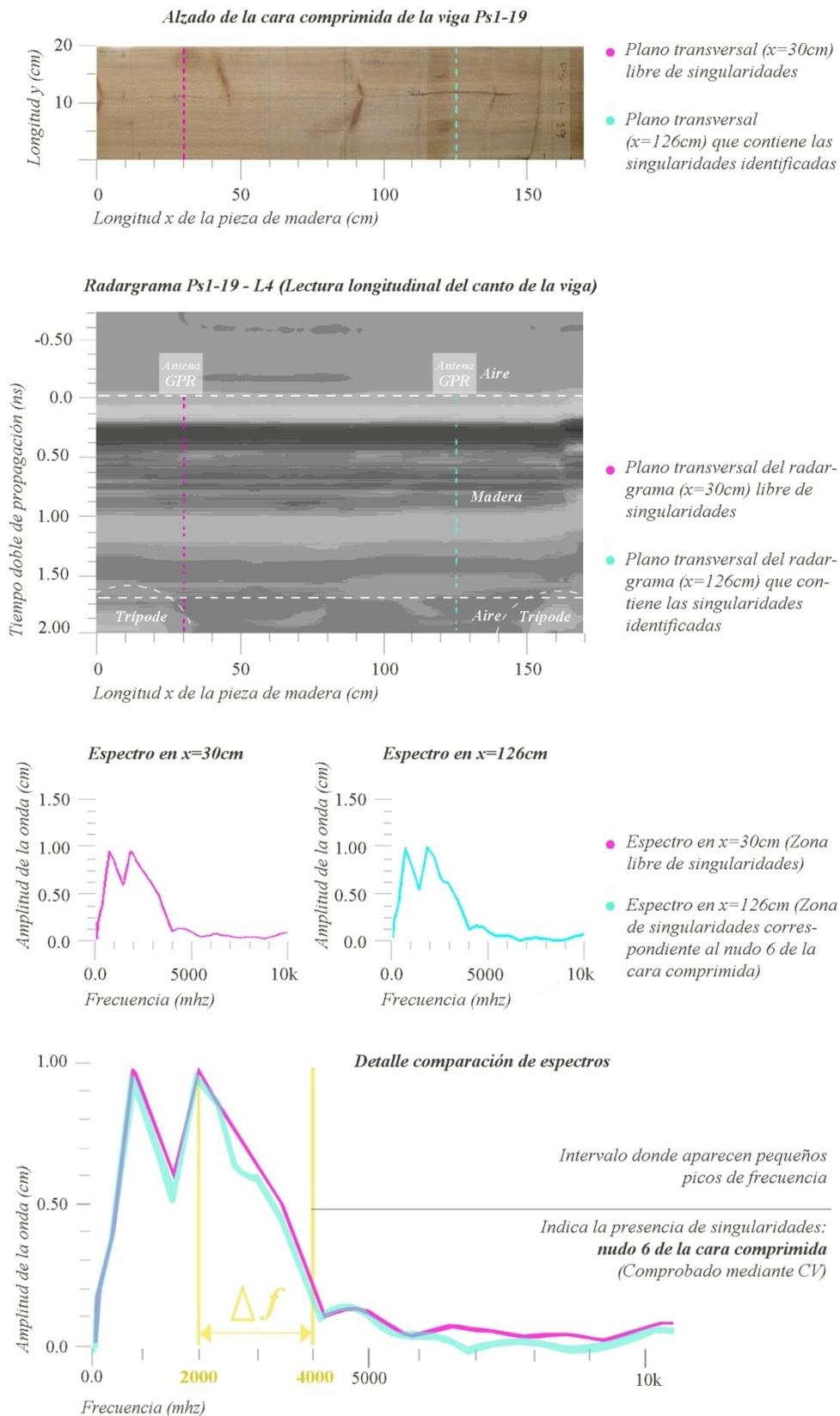


Figura 61. Viga PS1-19. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=126\text{cm}$.

Ejemplo 3

La superficie de la pieza PS2-4 presenta una singularidad oculta en la zona A, cerca del punto por el que rompe la viga en el Ensayo a Flexión en la zona B.

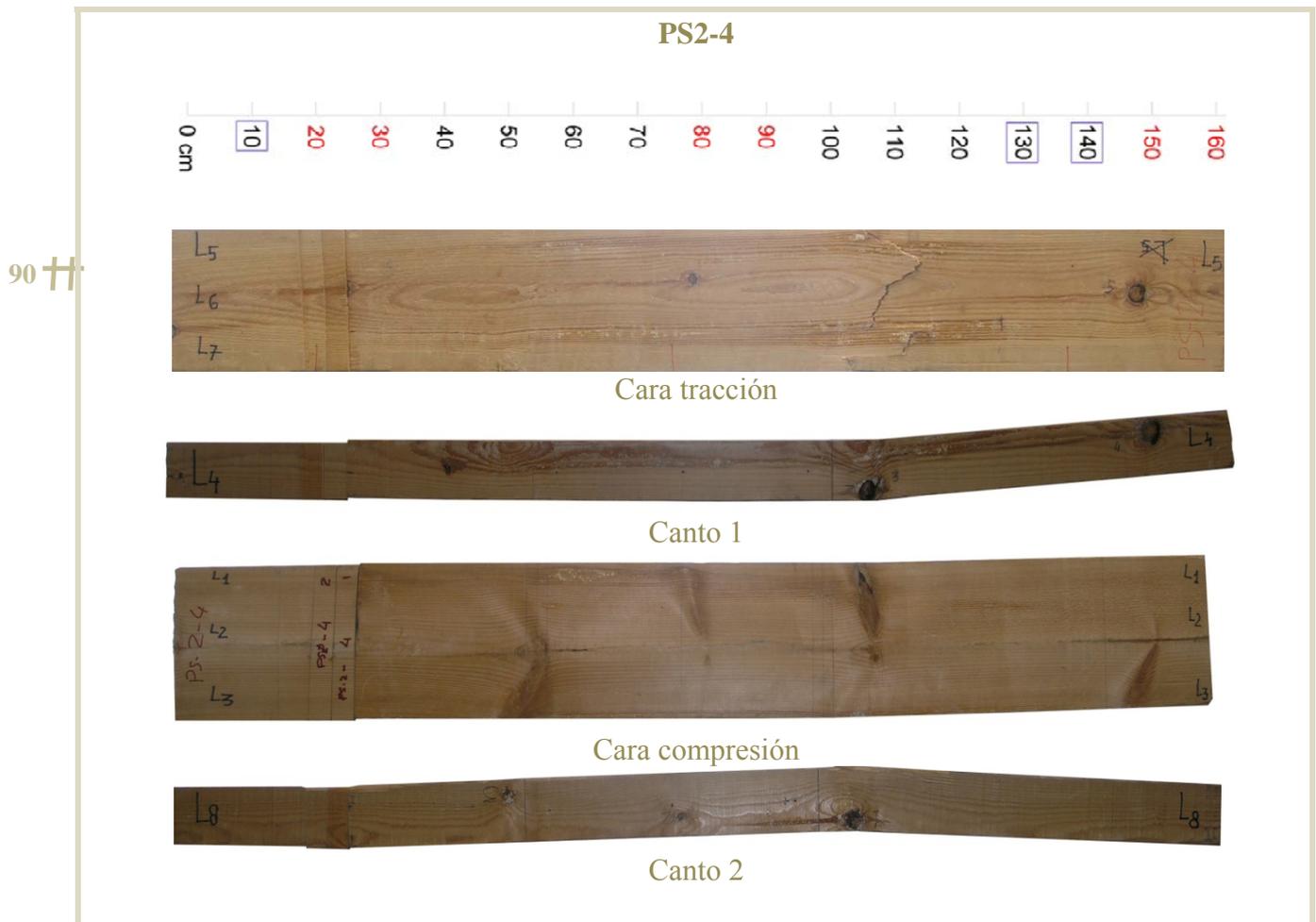


Figura 62. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS2-4.

Viga Ps2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=52\text{cm}$

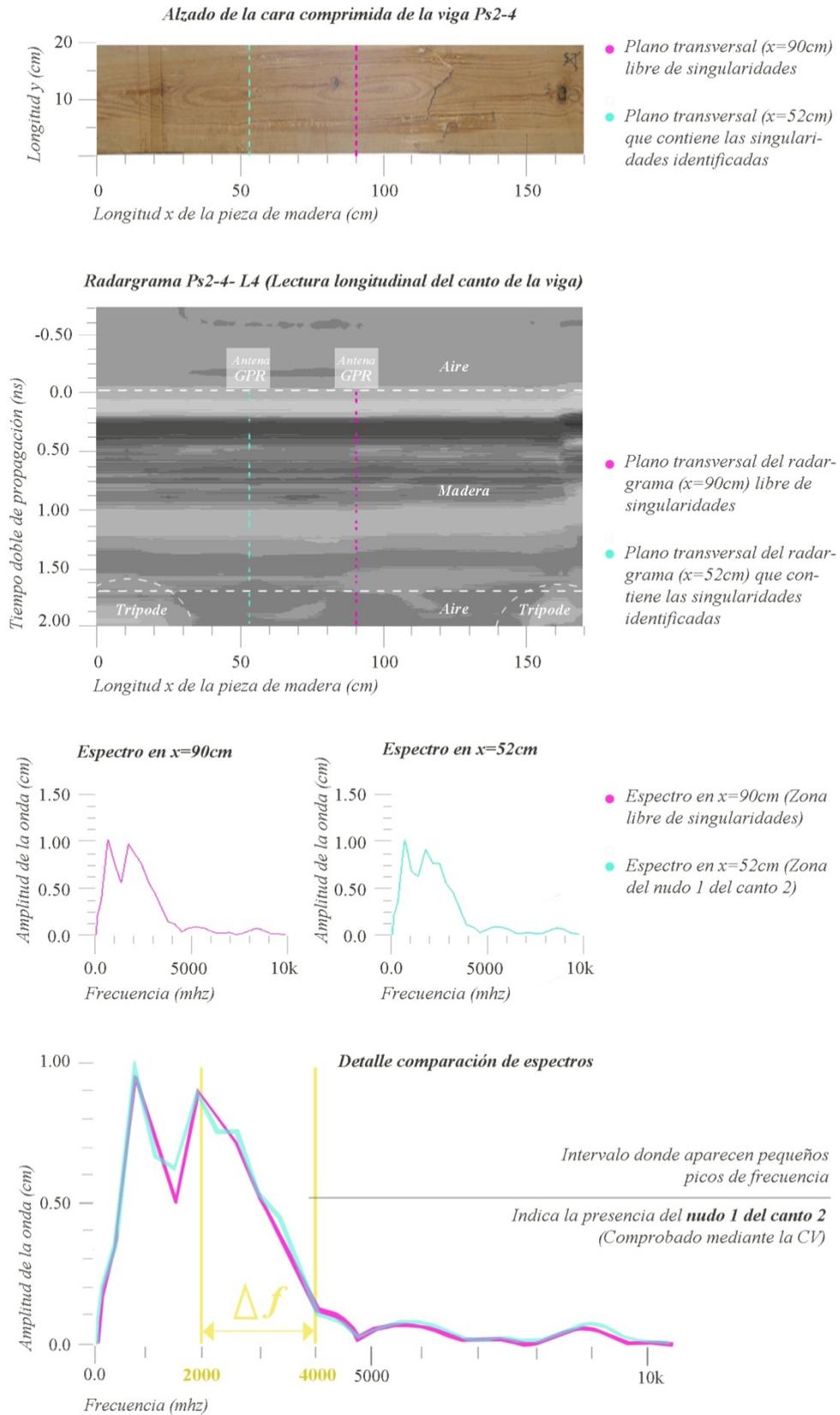


Figura 63. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=52\text{cm}$.

Viga Ps2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=72\text{cm}$

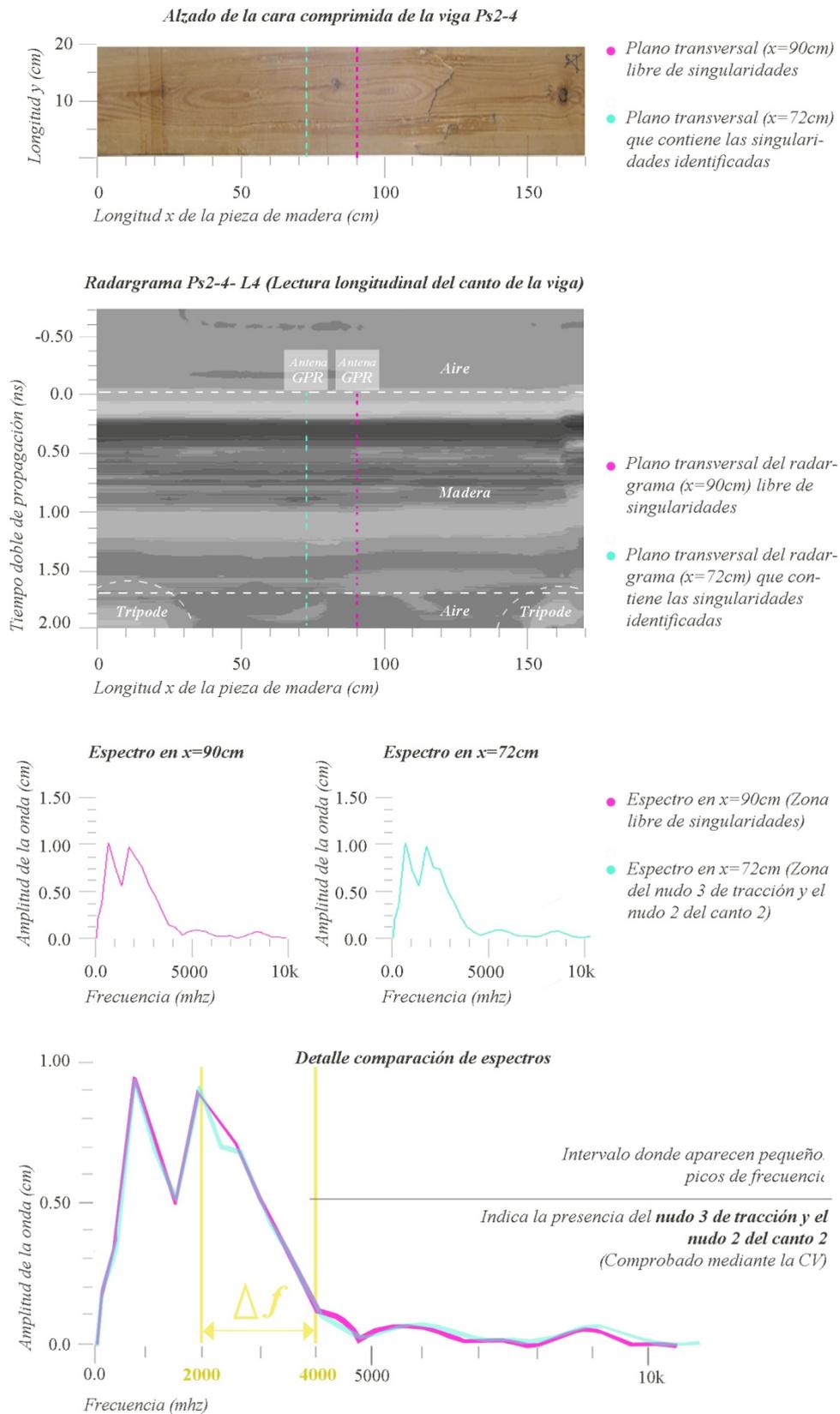


Figura 64. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=72\text{cm}$.

Viga Ps2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=96\text{cm}$

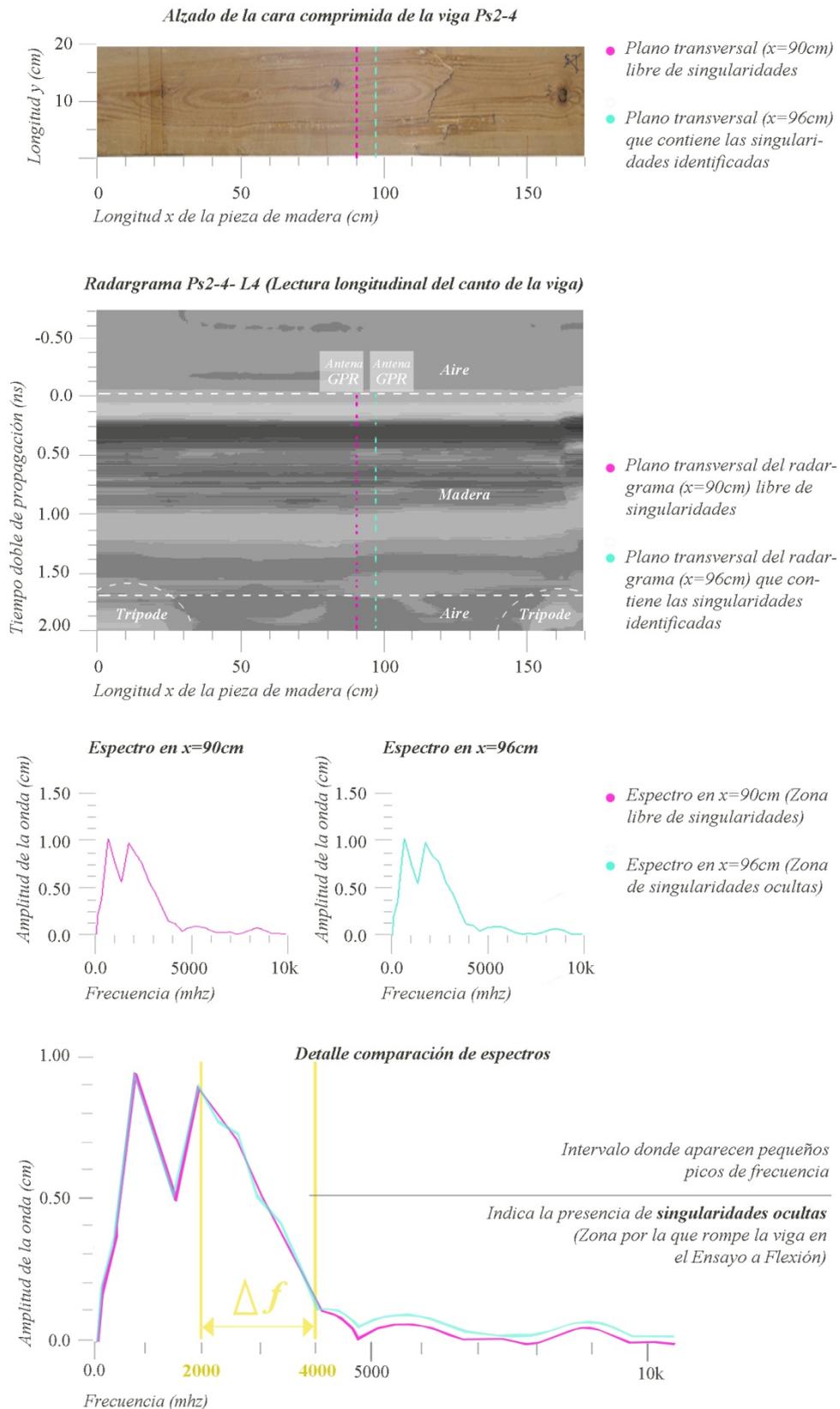


Figura 65. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=96\text{cm}$.

Viga Ps2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=108\text{cm}$

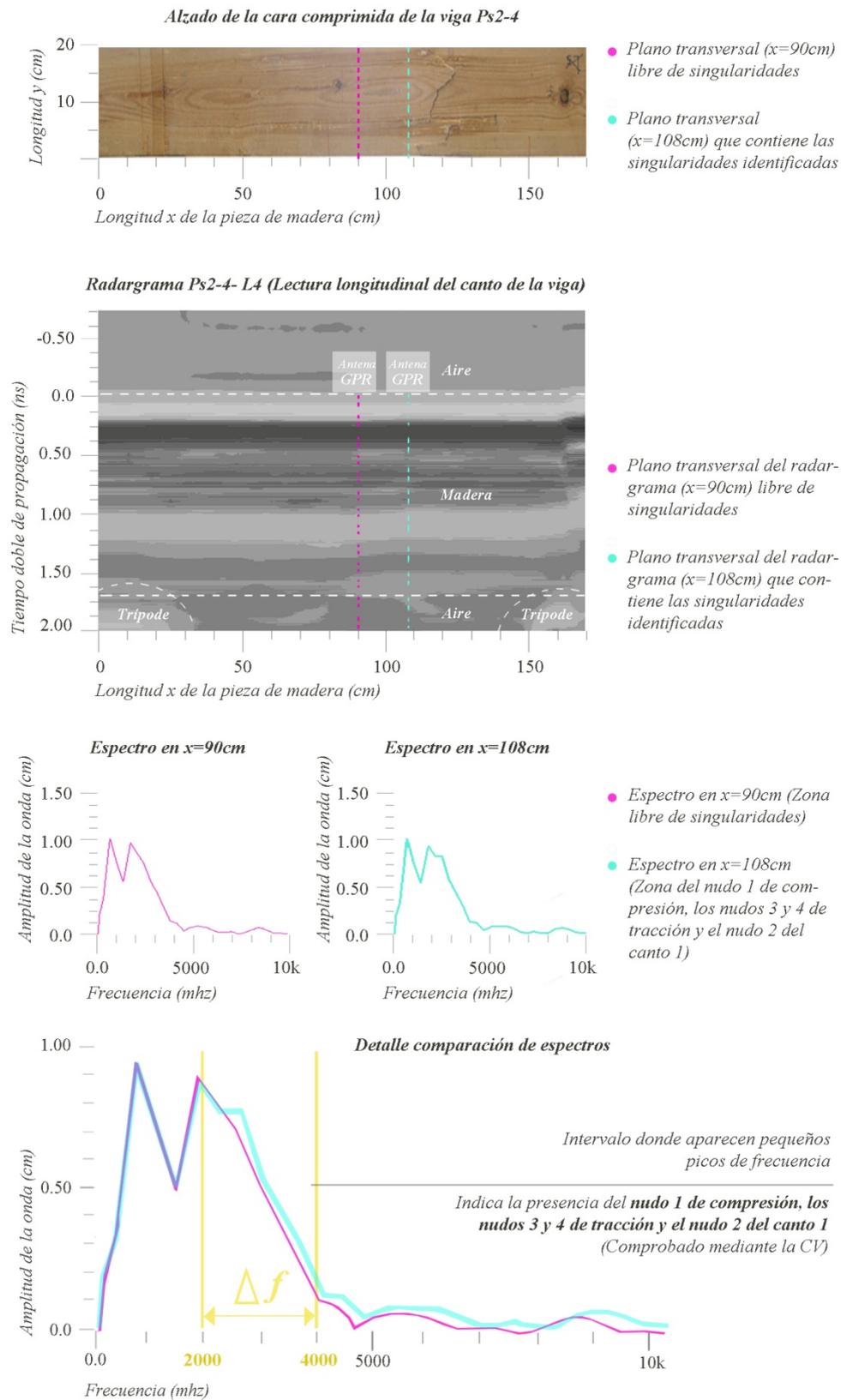


Figura 66. Viga PS2-4. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=108\text{cm}$.

Ejemplo 4

La superficie de la pieza PS2-22 no presenta ningún nudo en el punto de rotura en su cara de tracción, únicamente dos nudos de pequeño diámetro en los cantos. El GPR detecta singularidades ocultas en la zona de rotura.

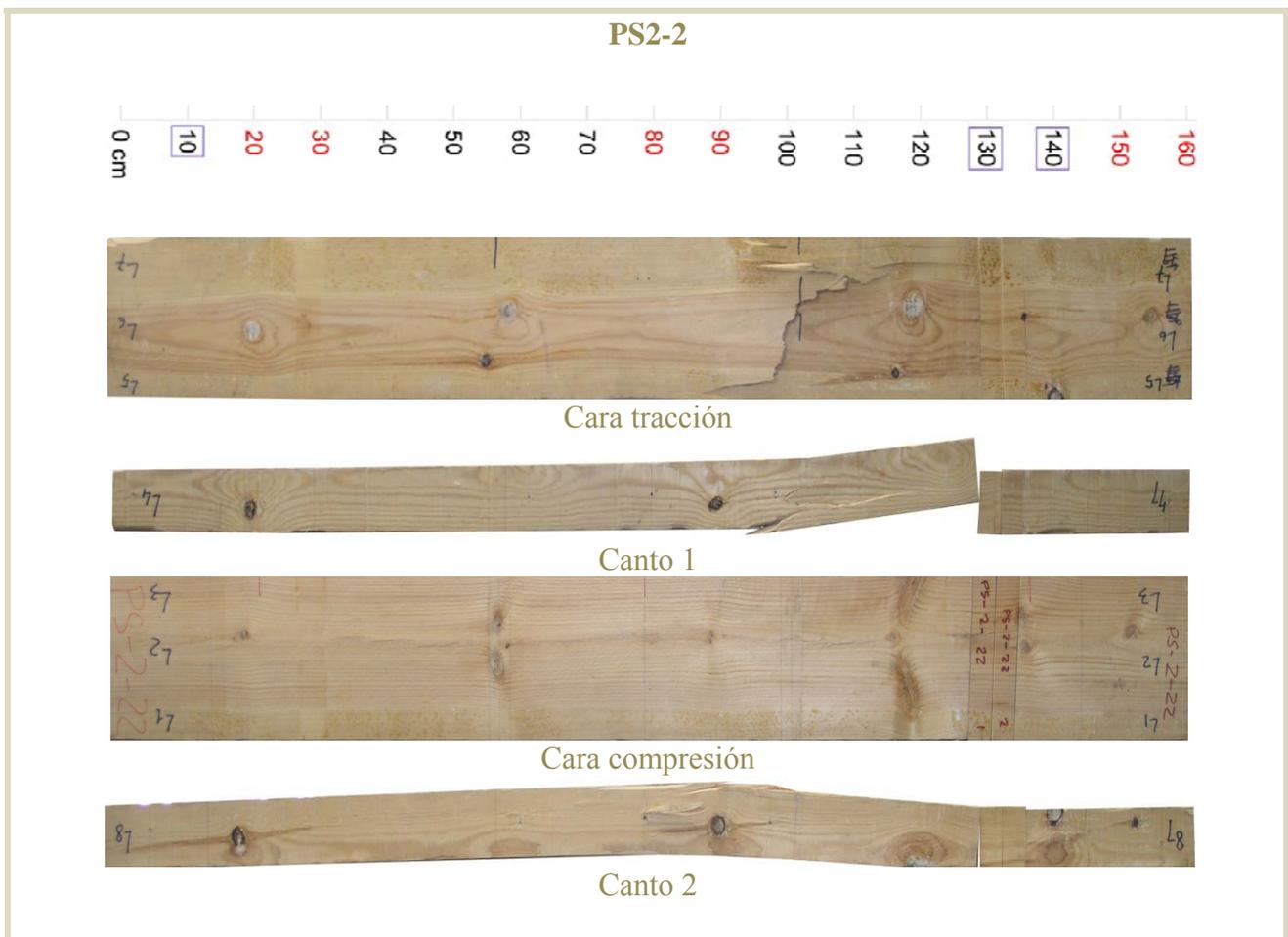


Figura 67. Imágenes de los alzados correspondientes a cada una de las caras de la pieza de madera PS2-22.

Viga Ps2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=36\text{cm}$

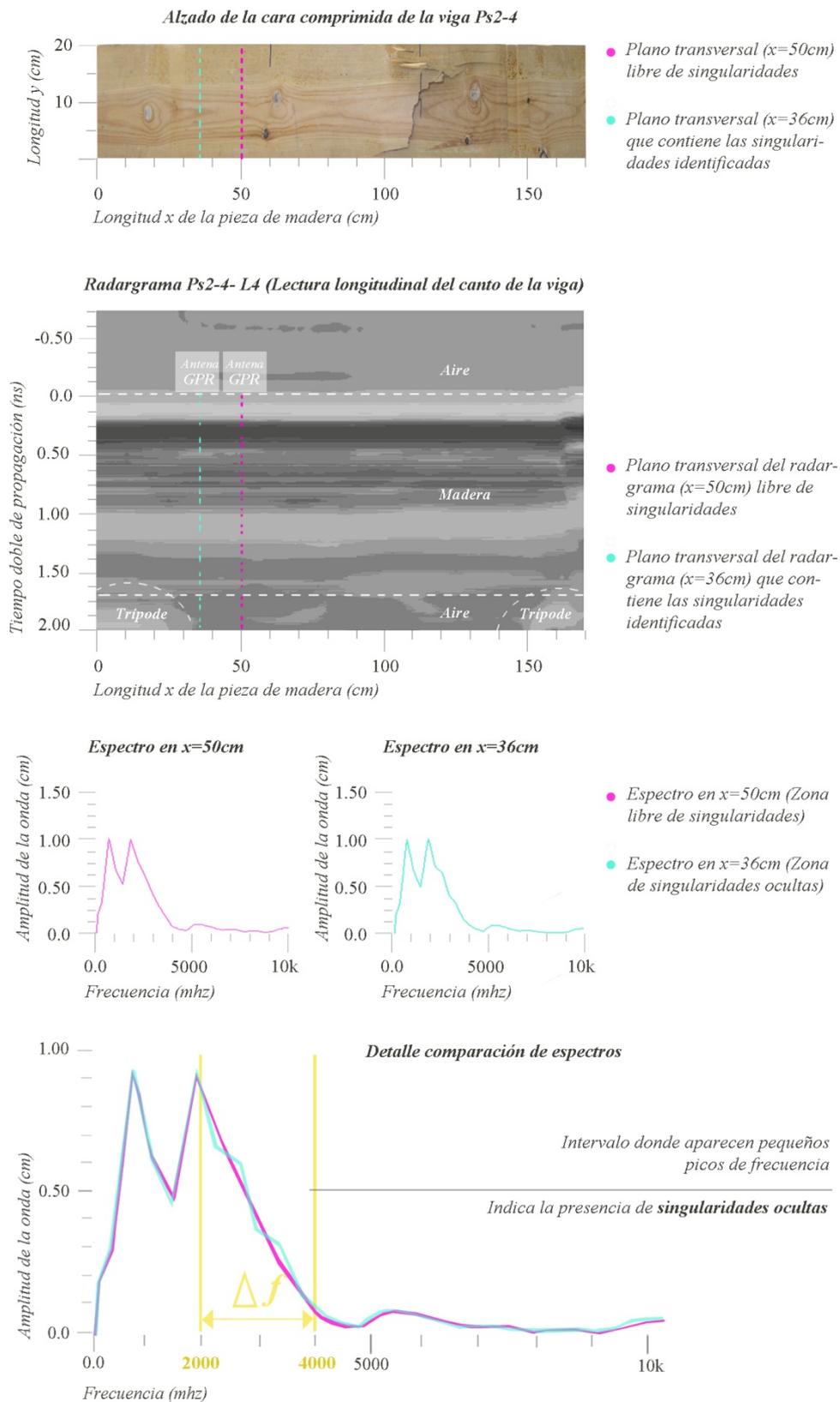


Figura 68. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=36\text{cm}$.

Viga Ps2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=62\text{cm}$

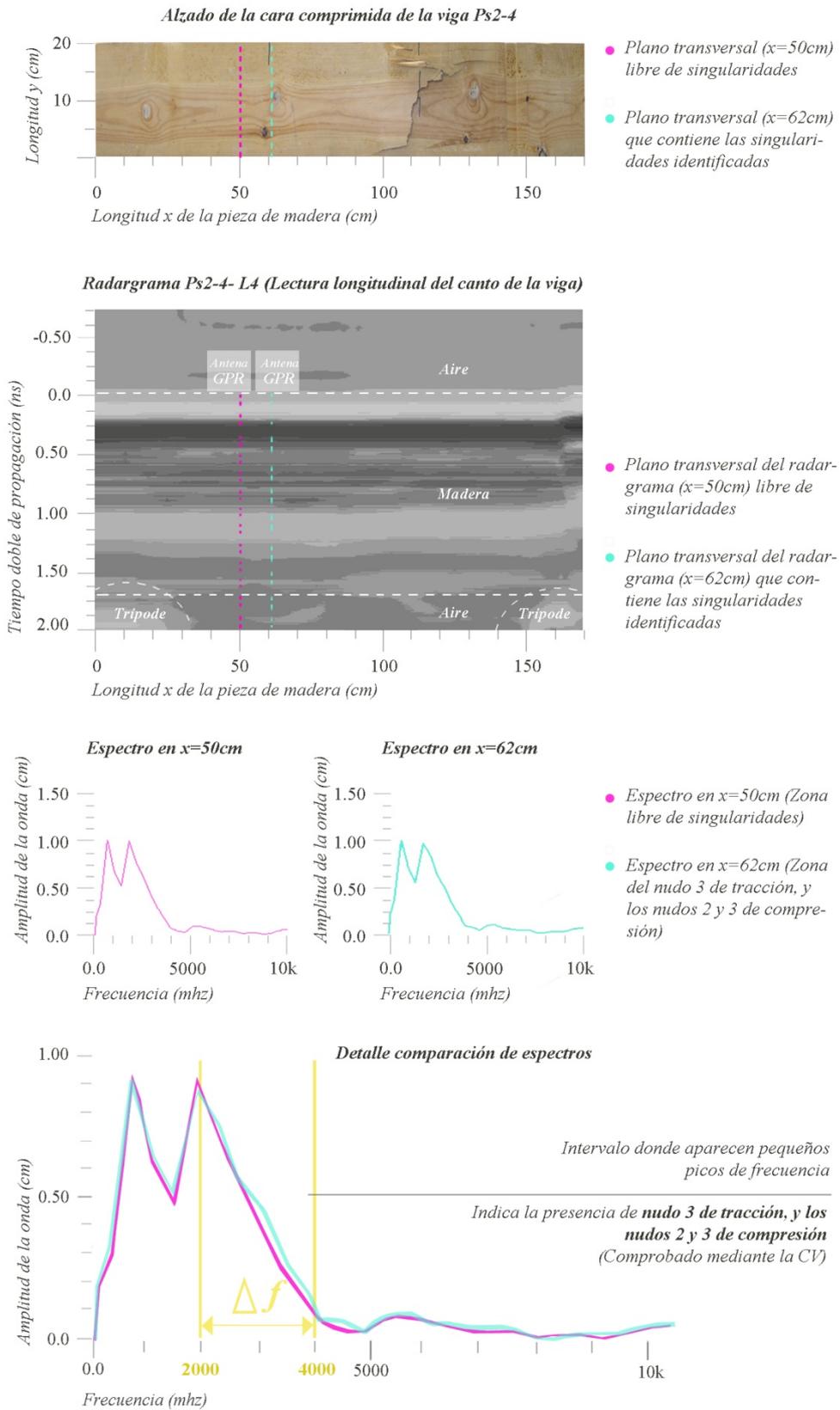


Figura 69. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=62\text{cm}$.

Viga Ps2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=88\text{cm}$

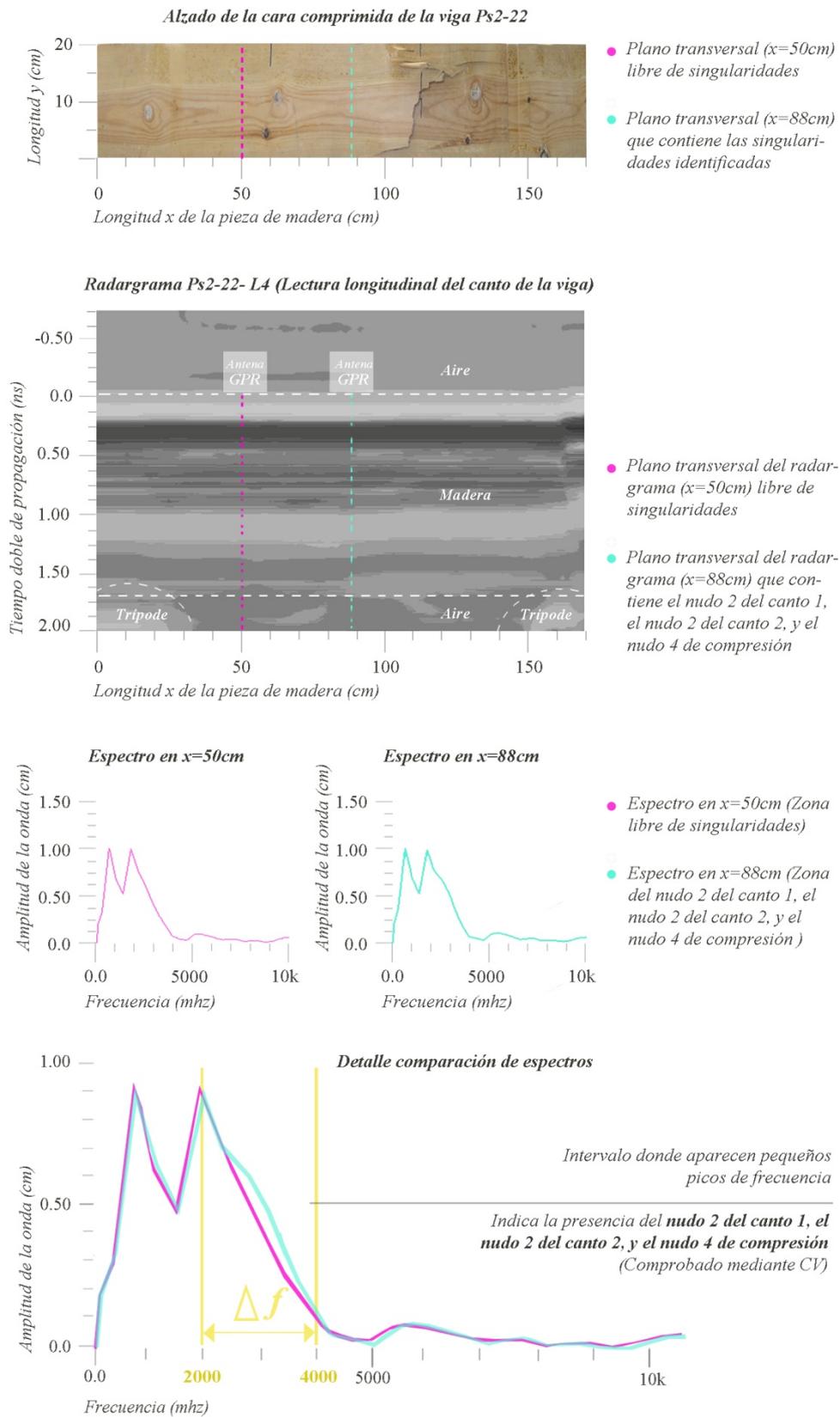


Figura 70. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=88\text{cm}$.

Viga Ps2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=99\text{cm}$

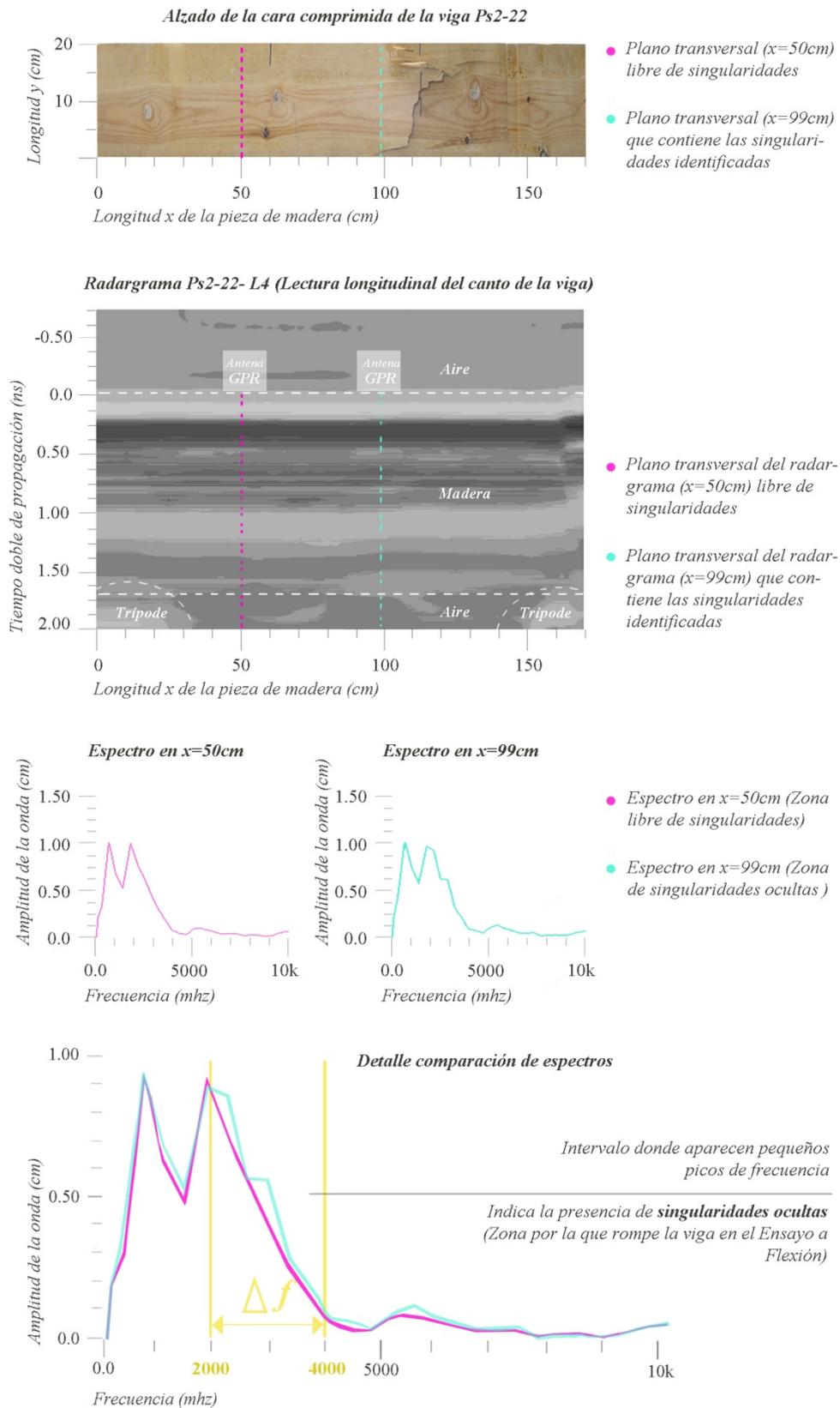


Figura 71. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=99\text{cm}$.

Viga Ps2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=115\text{cm}$

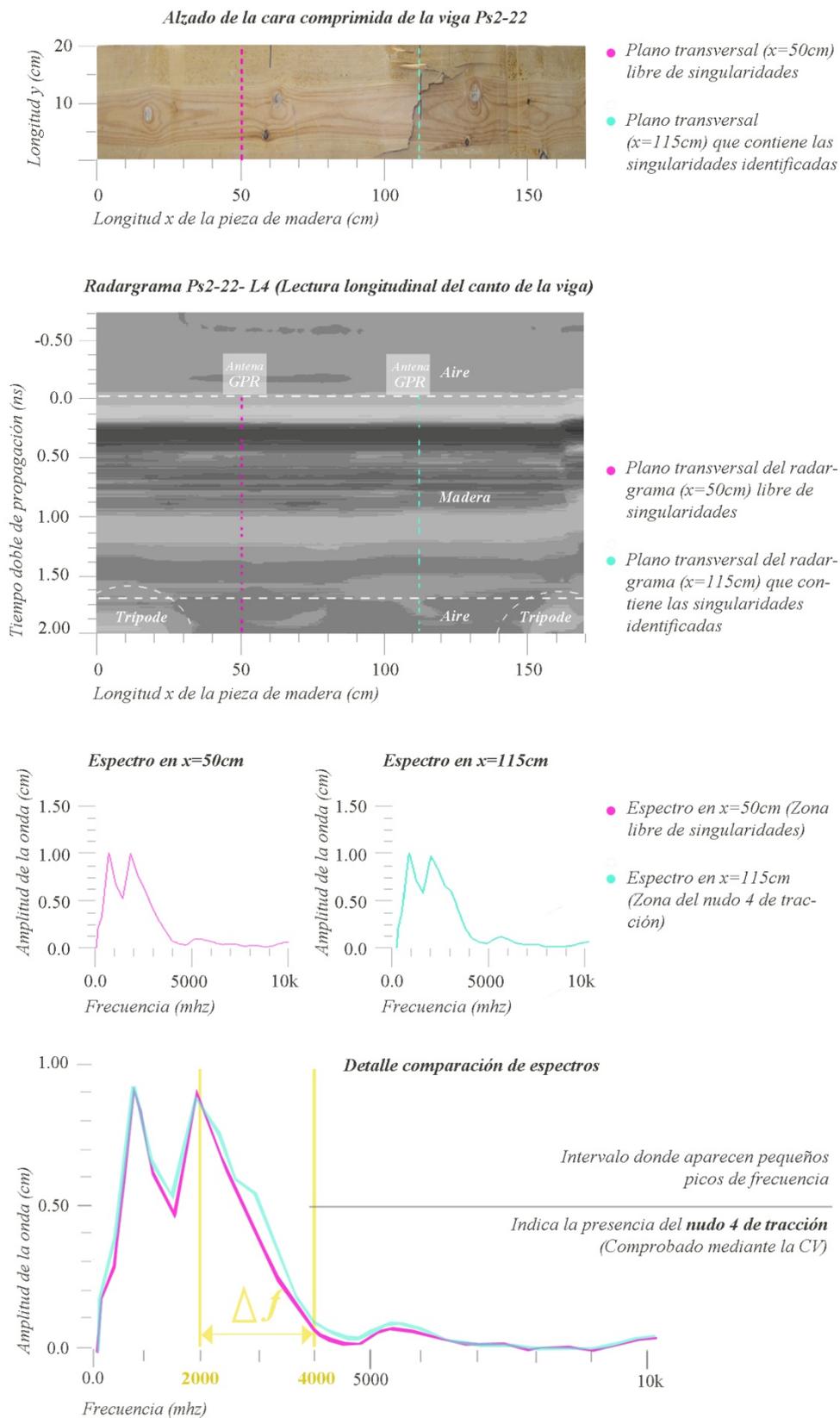


Figura 72. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=115\text{cm}$.

Viga Ps2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=118\text{cm}$

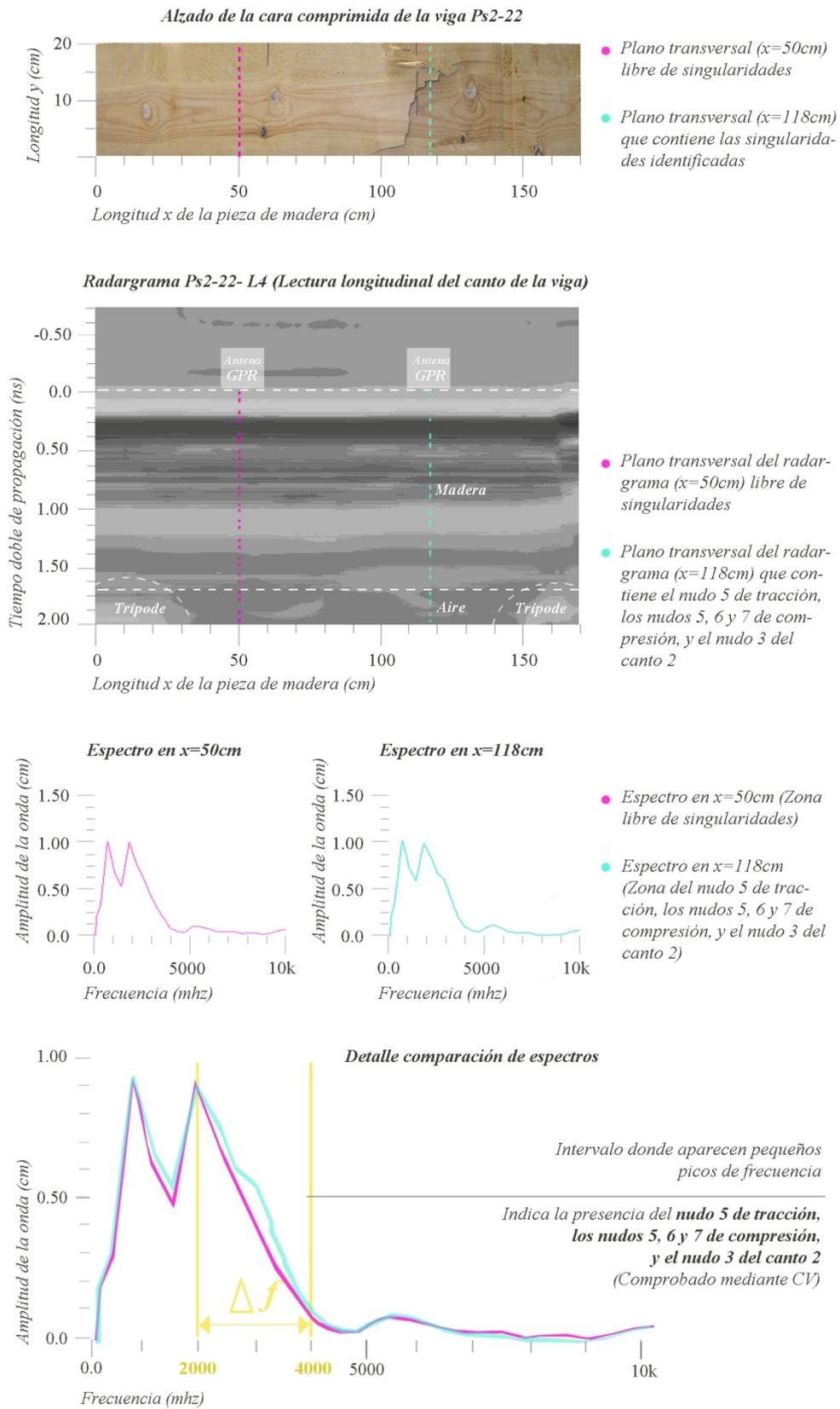
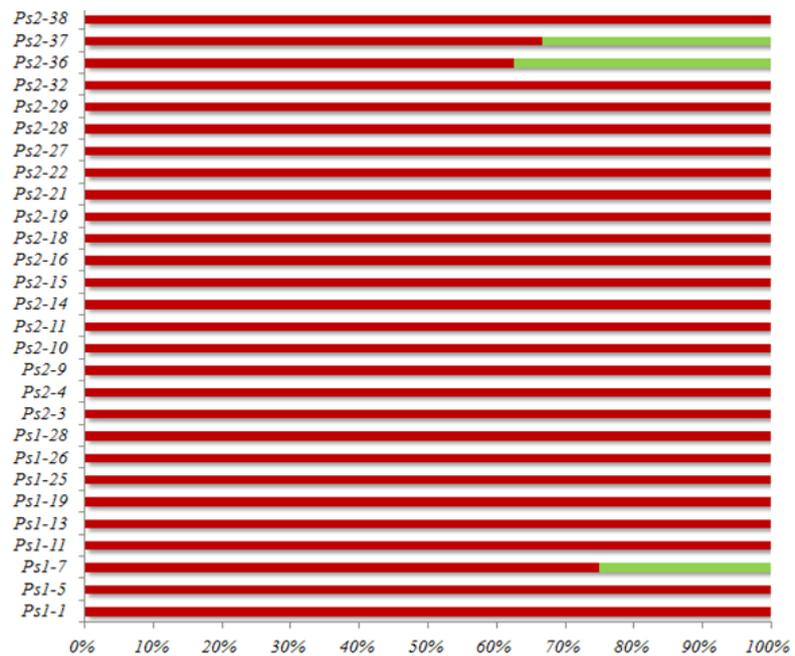


Figura 73. Viga PS2-22. Identificación de las singularidades mediante el análisis de los espectros: $x=118\text{cm}$.

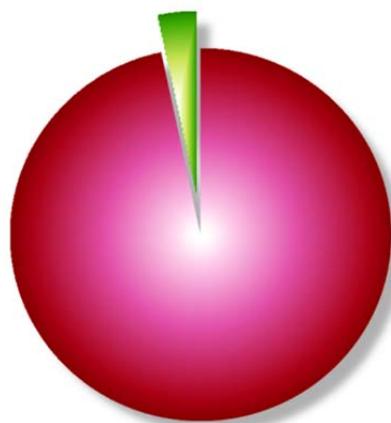
5.4. Fiabilidad y precisión

Los resultados obtenidos presentan un alto porcentaje de fiabilidad y precisión en la identificación de nudos y otros defectos mediante GPR .

- En identificación de nudos o bolsas de resina presentes en las superficies de las piezas, se ha detectado el 97,05% (gráfico 4).



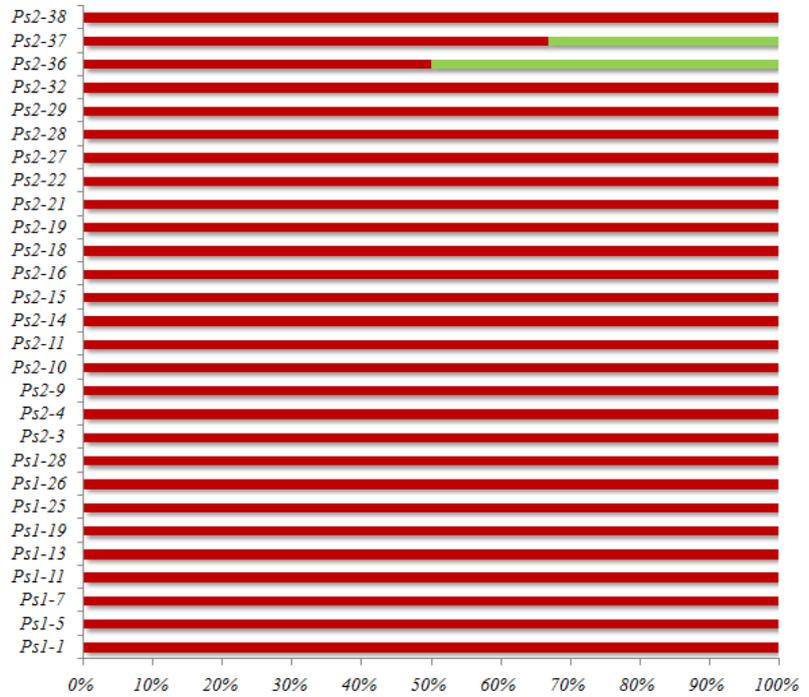
■ **NUDOS** % Nudos detectados presentes en la viga
 ■ **NUDOS** % Nudos no detectados presentes en la viga



● **Nudos identificados** 97,05 %
 ● **Nudos no identificados** 2,95 %

Gráfico 4. Estadística identificación de nudos o bolsas de resina presentes en las superficies de las piezas. Viga por viga (filas) y en total (bola).

- En identificación de nudos o bolsas de resina presentes en las superficies por donde rompe la viga, se ha detectado el 97,8% (gráfico 5) de nudos.



- NUDOS % Nudos detectados presentes en la viga por los que rompe la misma
- NUDOS % Nudos no detectados presentes en la viga por los que rompe la misma

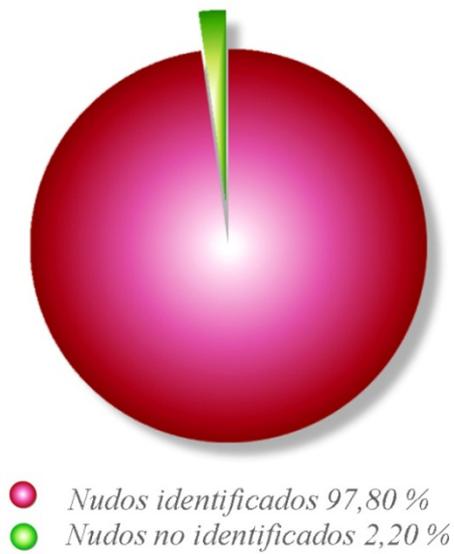
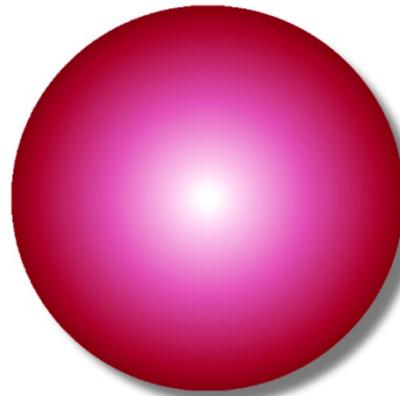
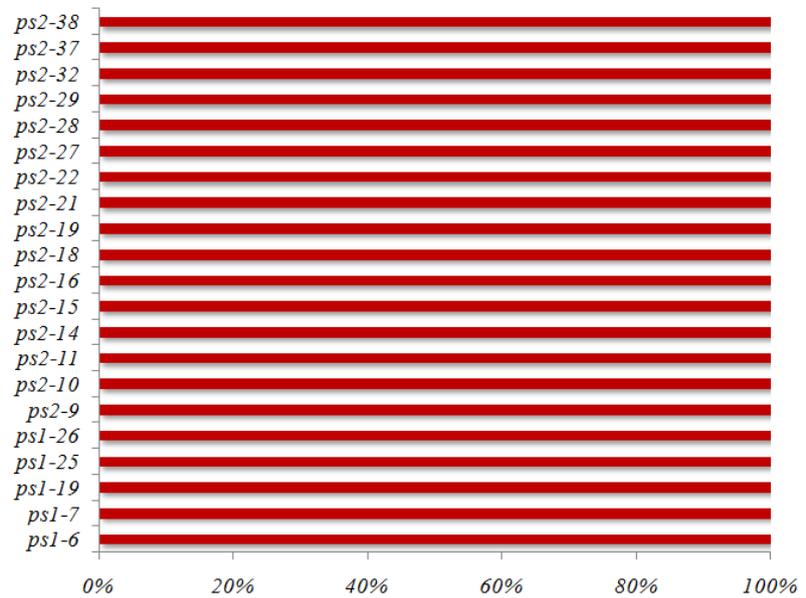


Gráfico 5. Estadística identificación de nudos o bolsas de resina presentes en las superficies por donde rompe la viga. Viga por viga (filas) y en total (bola).

- En identificación de irregularidades ocultas bajo la superficie, por las que posteriormente rompe la viga, se ha detectado el 100% (gráfico 6)



● Nudos identificados 100 %

Gráfico 6. Estadística identificación de irregularidades ocultas bajo la superficie, por las que posteriormente rompe la viga. Viga por viga (filas) y en total (bola).

Lo cual permite afirmar que es una herramienta efectiva en la identificación de singularidades en madera estructural.

Estadísticas. Identificación de nudos presentes en la viga

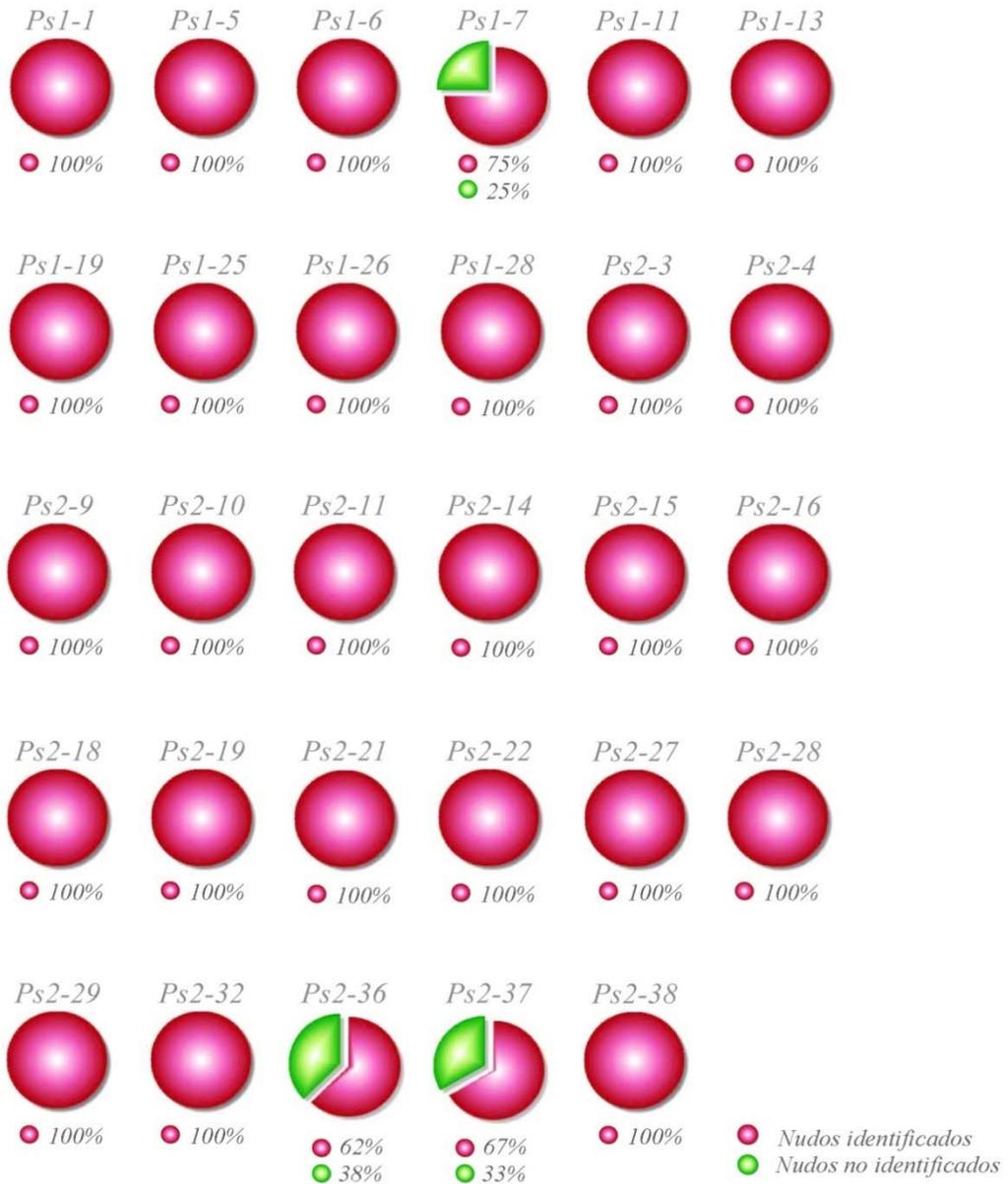


Gráfico 7. Porcentaje de identificación de nudos presentes en la viga.

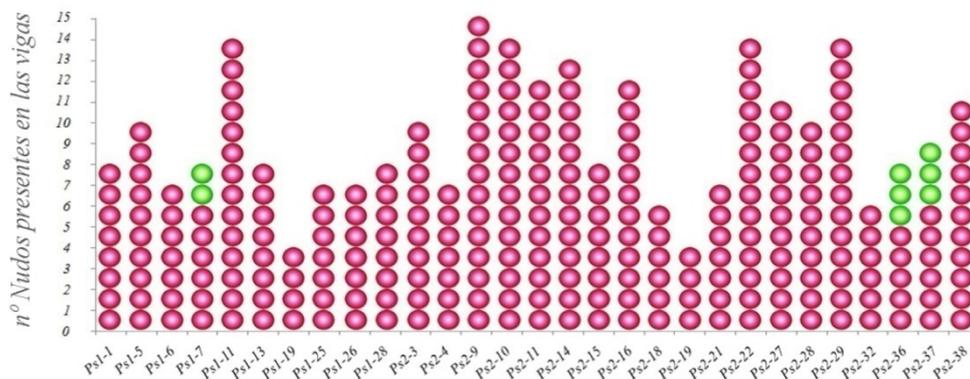


Gráfico 8. Número de nudos identificados.

Estadísticas. Identificación de nudos por los que rompe la viga

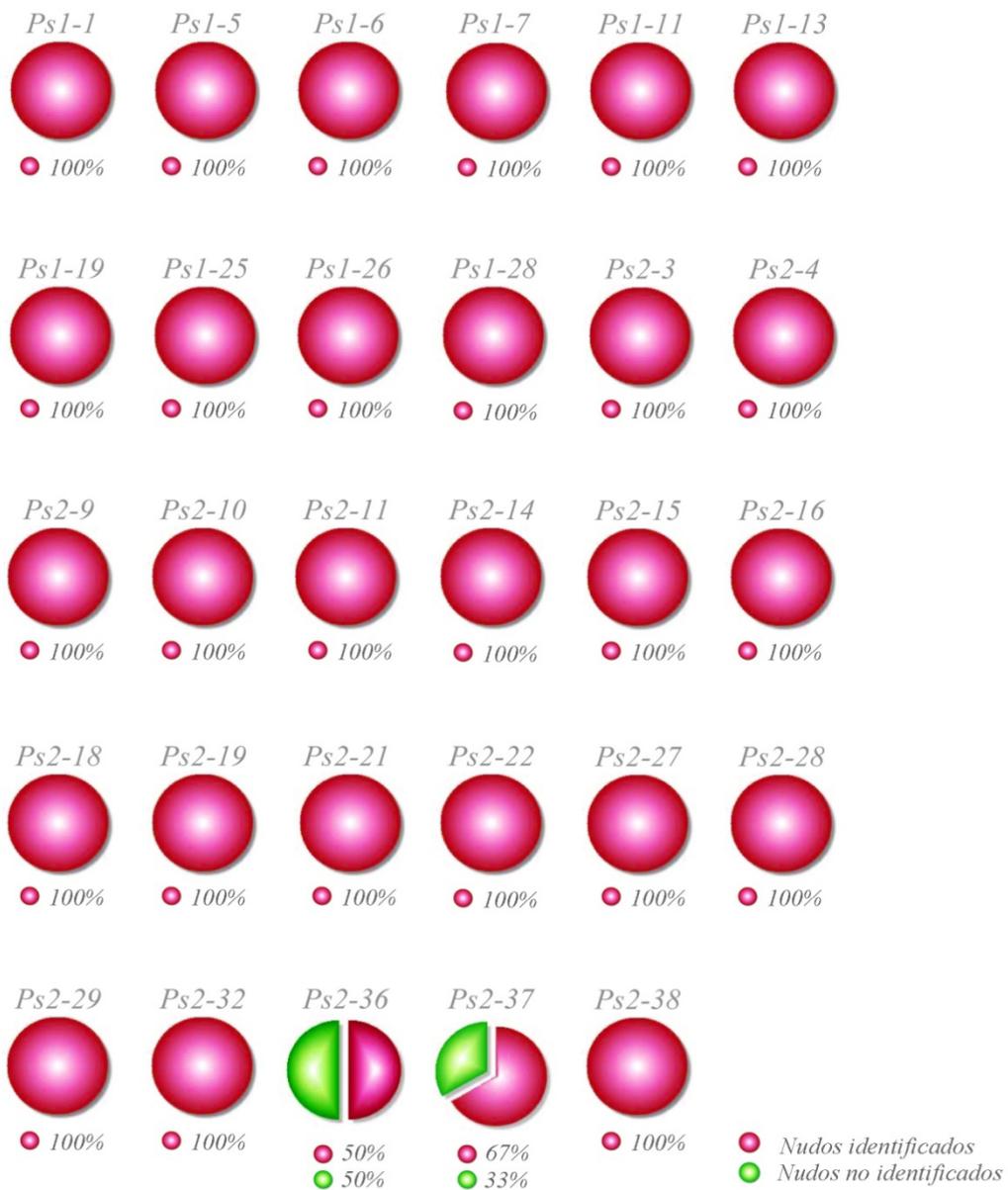


Gráfico 9. Porcentaje de identificación de nudos por los que rompe la viga.

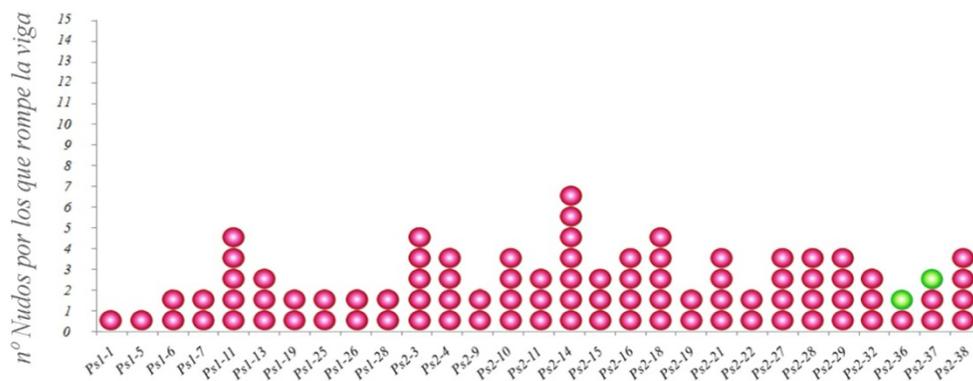
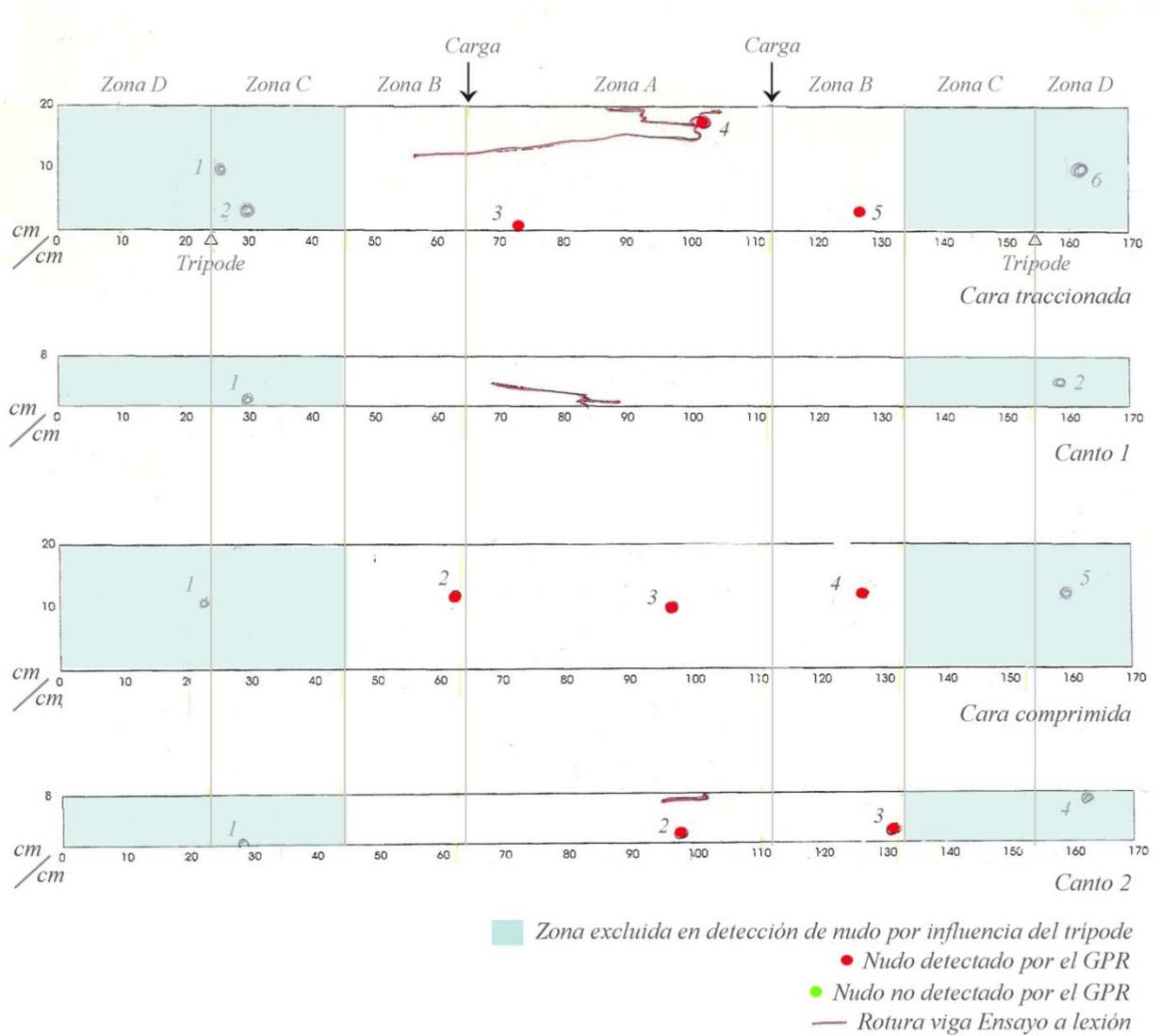


Gráfico 10. Número de nudos identificados por los que rompe la viga.

Identificación de nudos en la viga Ps1-1



107 ††

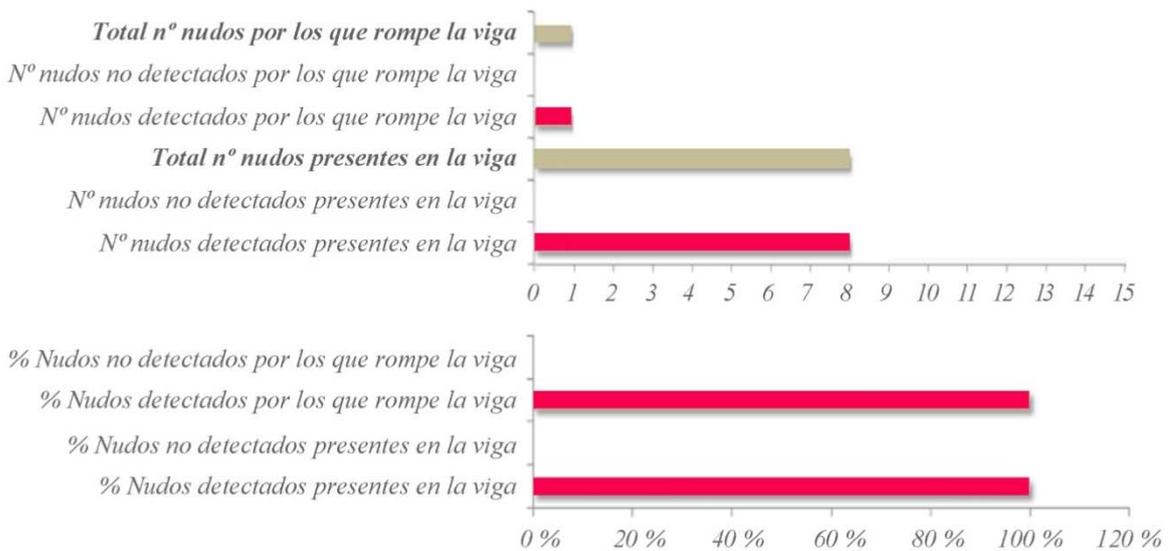


Gráfico 11. Identificación de nudos en la viga PS1-1. Clasificación visual y estadísticas.

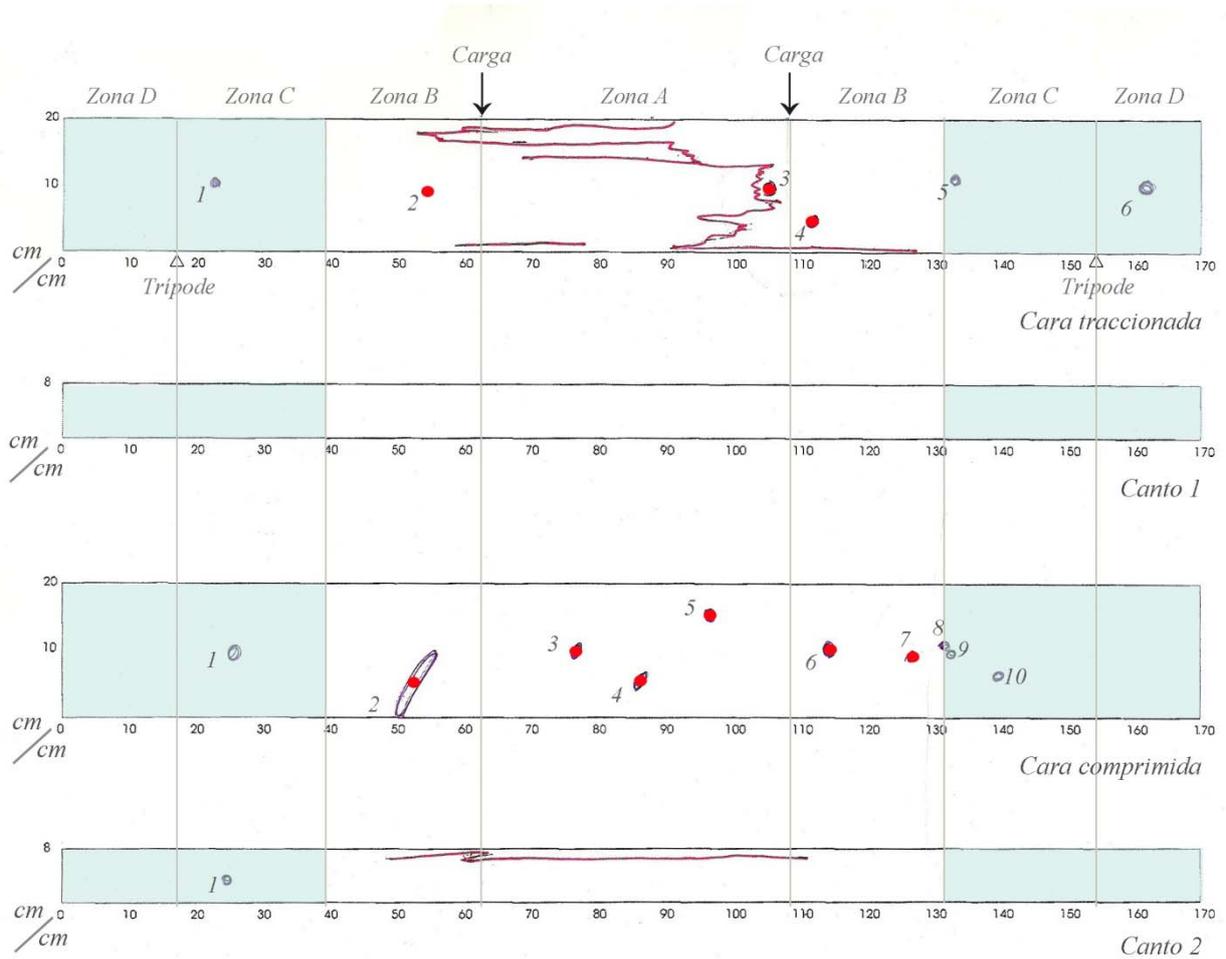
ps1-1	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
			2	no
	3			no
	4			sí
	5			no
Canto 1			6	no
			1	no
Cara Comp.			2	no
	2		1	no
	3			no
	4			no
Canto 2			5	no
			1	no
	2			no
	3			no
			4	no

Tabla 2. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-1.



Figura 74. Detalle del nudo de canto la viga PS1-1.

Identificación de nudos en la viga Ps1-5



109 †

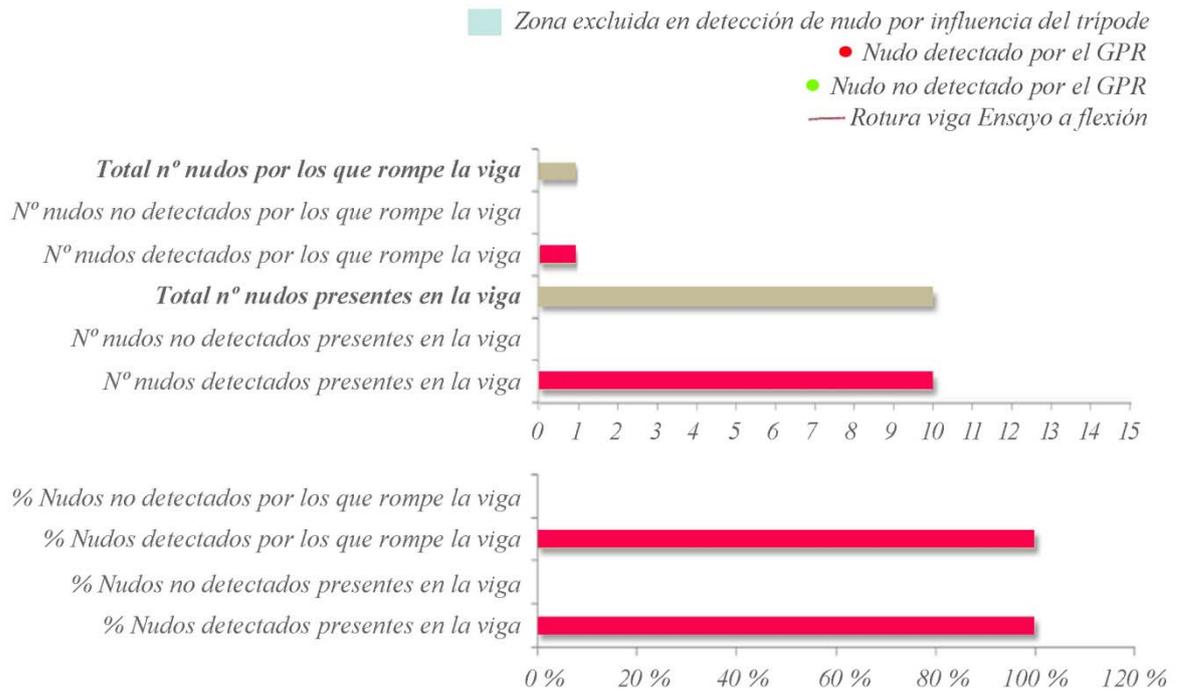


Gráfico 12. Identificación de nudos en la viga PS1-5. Clasificación visual y estadísticas.

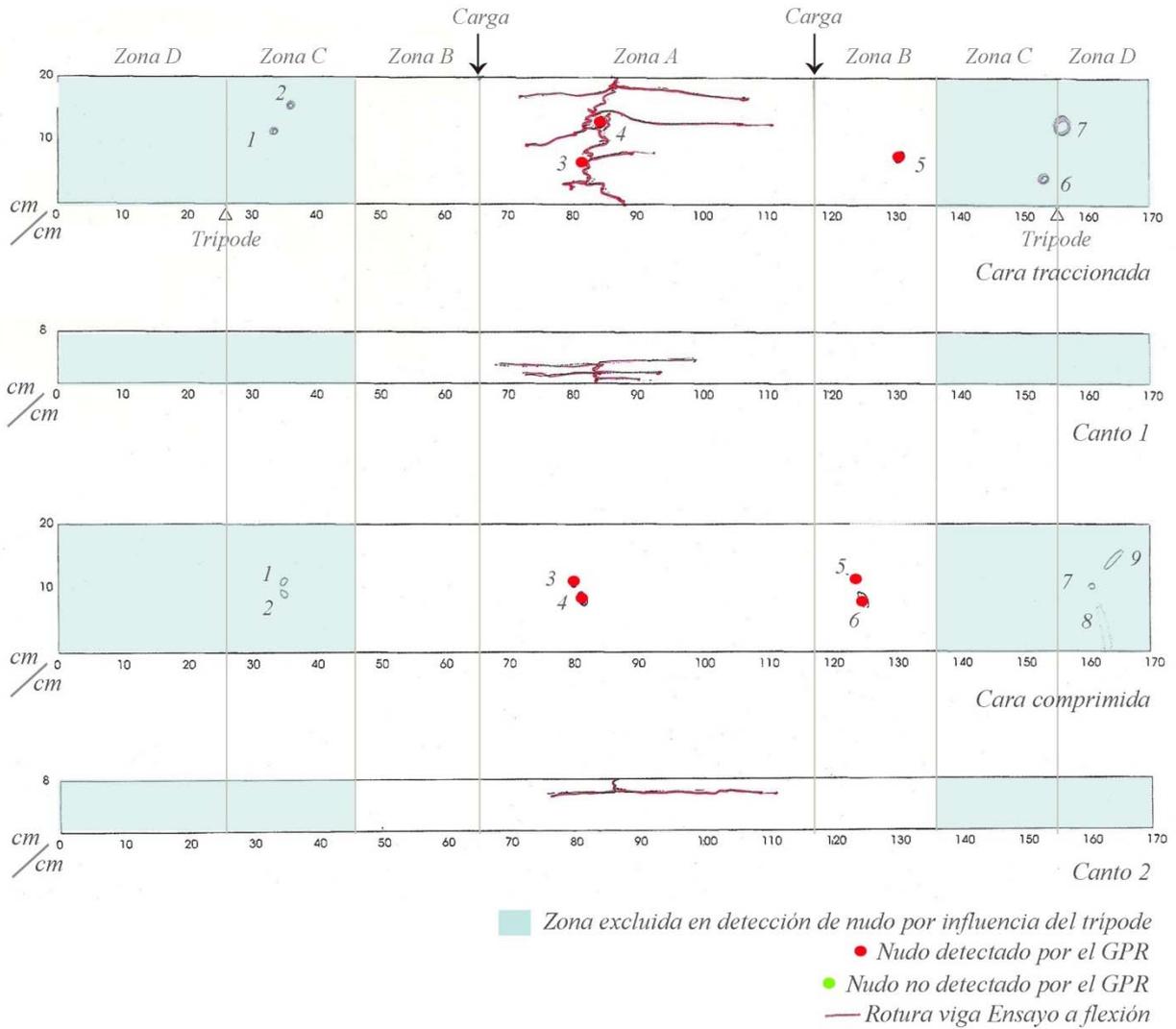
ps1-5	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.	2		1	no
	3			no
	4			sí
			5	no
Canto 1			6	no
				no
Cara Comp.			1	no
	2			no
	3			no
	4			no
	5			no
	6			no
	7			no
			8	no
	9		9	no
		10	no	
Canto 2			1	no

Tabla3. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-5.



Figura 75. Detalle de rotura por un nudo de la viga PS1-5.

Identificación de nudos en la viga Ps1-6



111 †

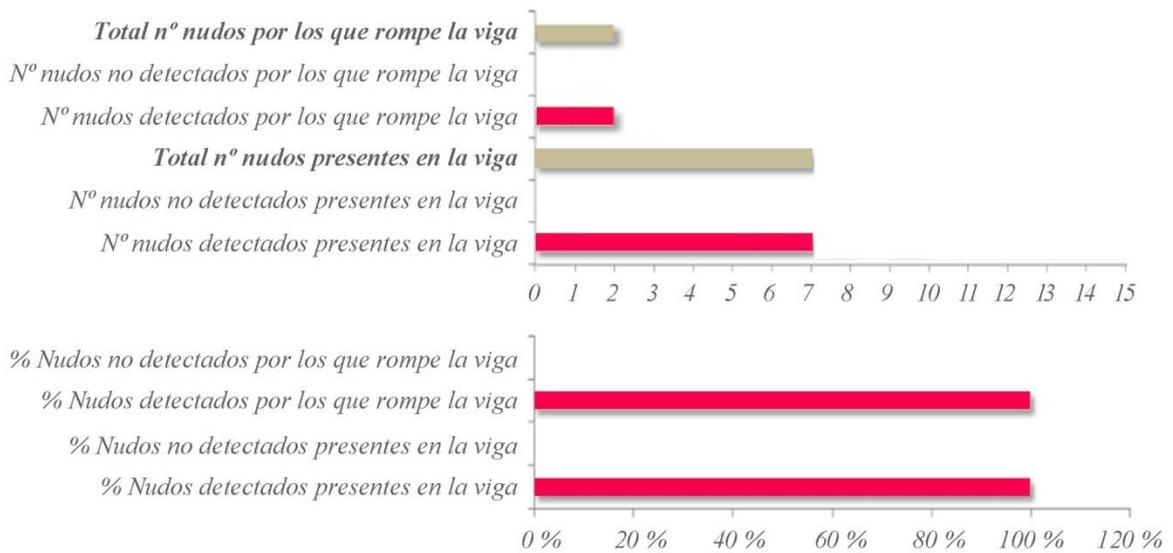


Gráfico 13. Identificación de nudos en la viga PS1-6. Clasificación visual y estadísticas.

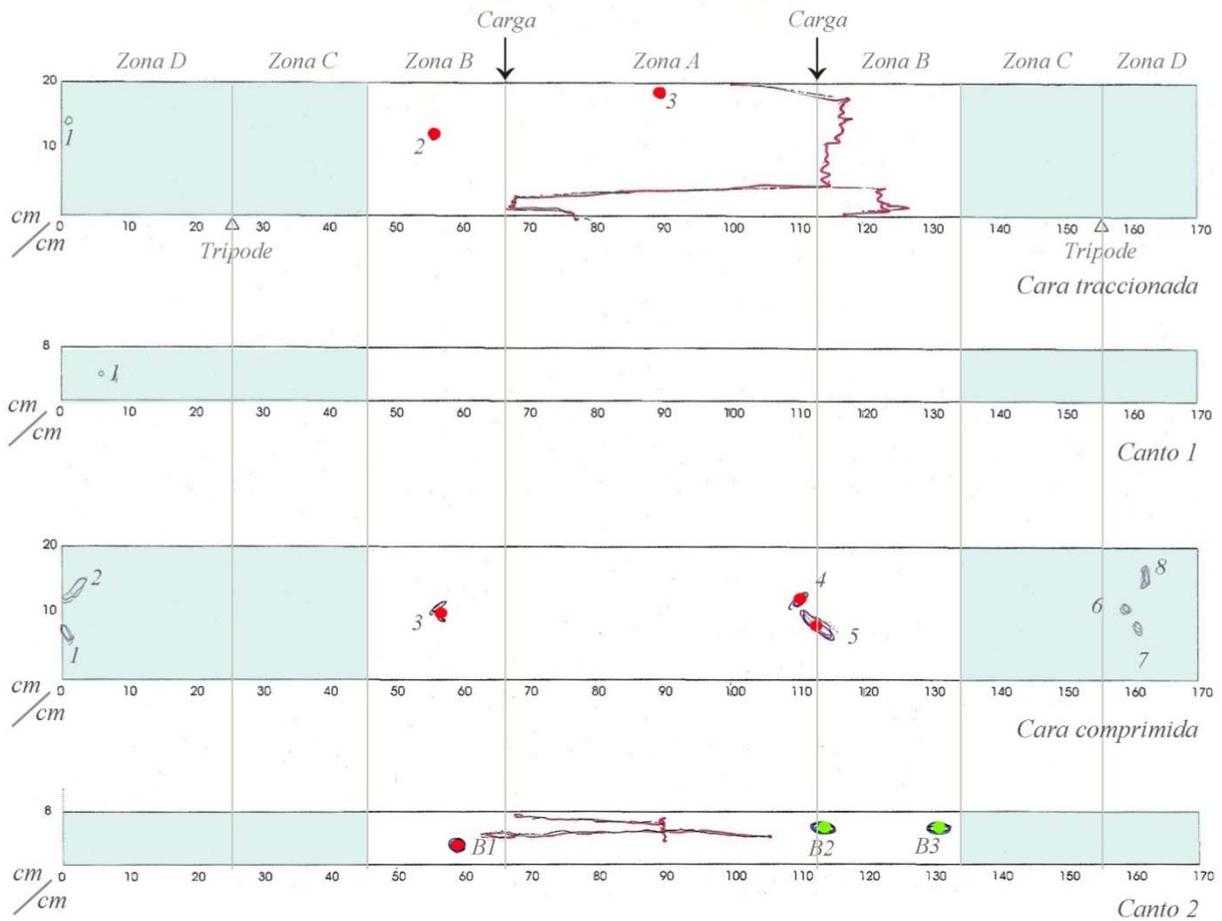
ps1-6				
Irregularidades ocultas detectadas			Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Detectado	No Detectado		
Cara Trac.			1	no
			2	no
	3			sí
	4			sí
	5			no
Canto 1			6	no
			7	no
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
	5			no
	6			no
			7	no
			8	no
			9	no
Canto 2				

Tabla 4. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-6.



Figura 76. Detalle de rotura por dos nudos de la viga PS1-6.

Identificación de nudos en la viga Ps1-7



113 †

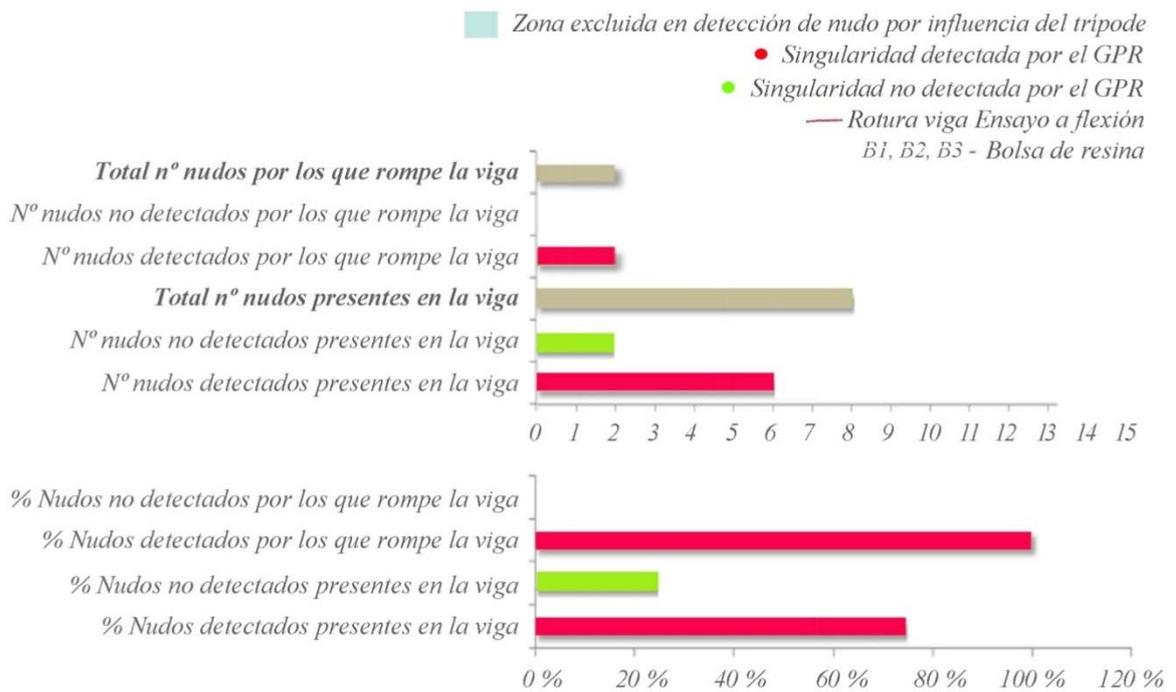


Gráfico 14. Identificación de nudos en la viga PS1-7. Clasificación visual y estadísticas.

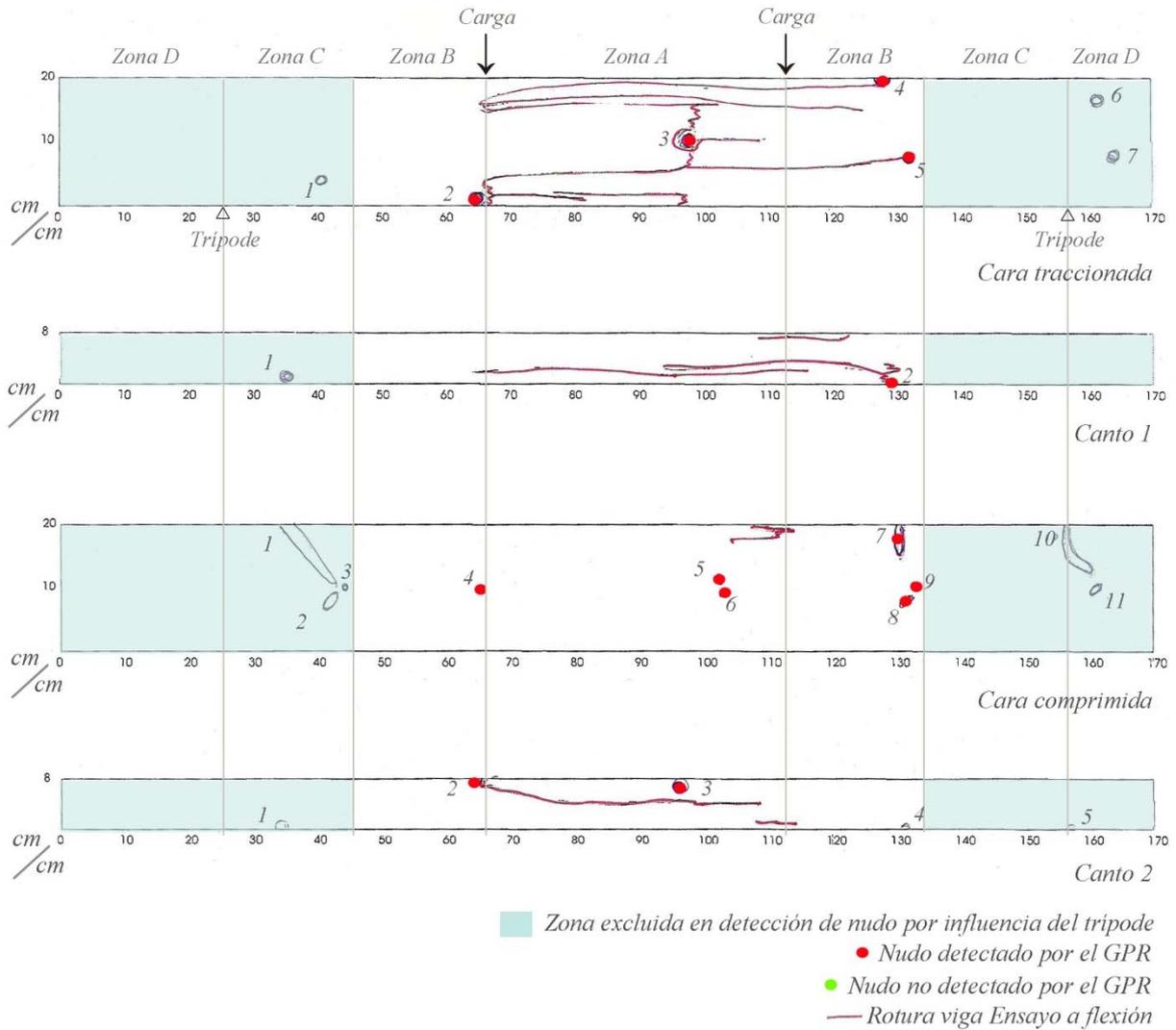
ps1-7				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.	2	3	1	no no no
Canto 1			1	no
Cara Comp.	3 4 55		1 2	no no no no no
			6 7 8	no no no
Canto 2	b1 b2	b3		no no no

Tabla 5. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-7.



Figura 77. Detalle de rotura de la viga PS1-7, por una zona sin imperfecciones en superficie.

Identificación de nudos en la viga Ps1-11



115 †

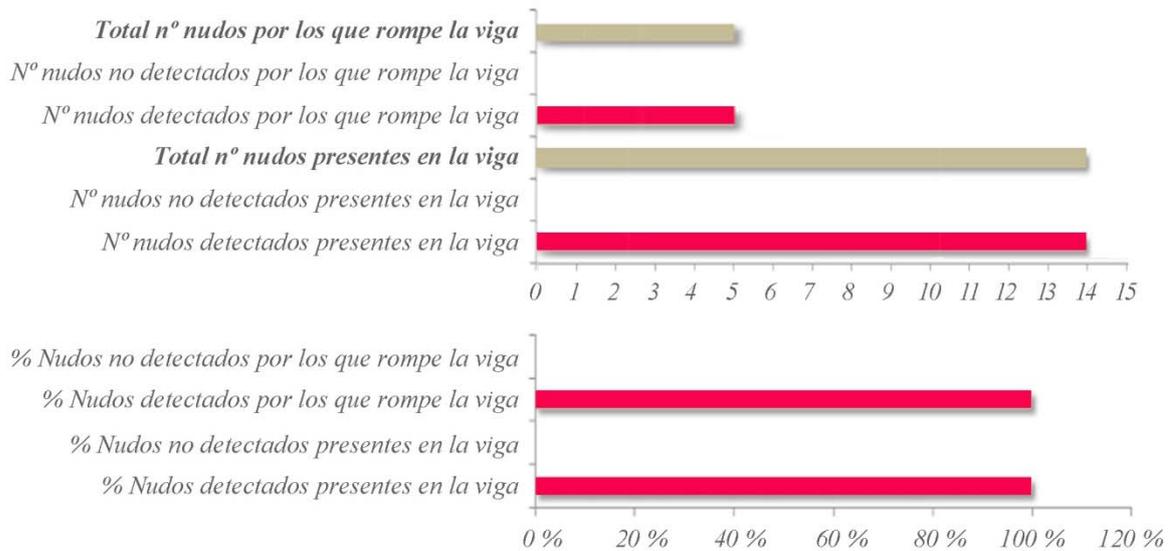


Gráfico 15. Identificación de nudos en la viga PS1-11. Clasificación visual y estadísticas.

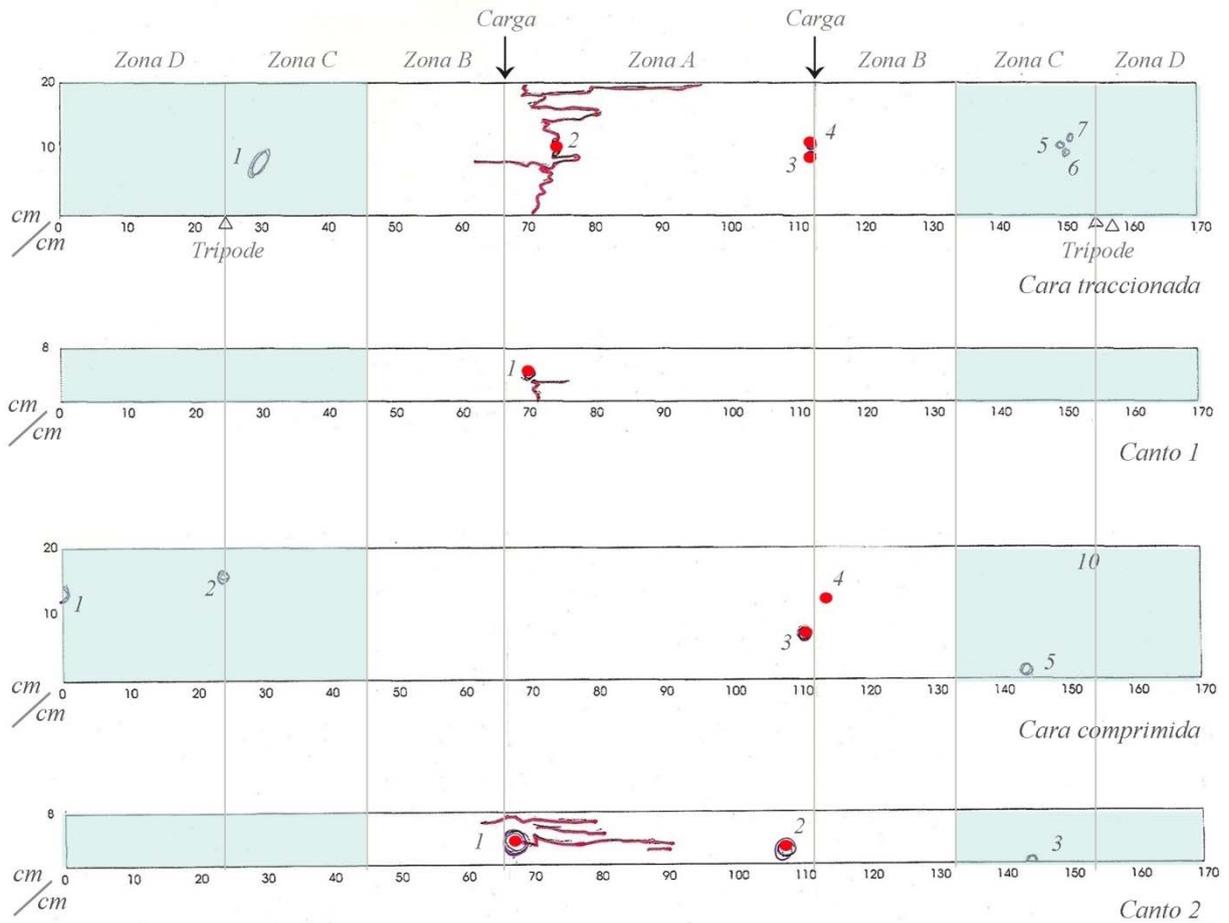
ps1-11	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
	2			sí
	3			sí
	4			no
	5			no
			6	no
			7	no
Canto 1			1	no
	2			sí
Cara Comp.			1	no
			2	no
			3	no
	4			no
	5			no
	6			no
	7			no
	8			no
	9			no
			10	no
			11	no
Canto 2			1	no
	2			sí
	3			sí
	4			no
			5	no

Tabla 6. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-11.



Figura 78. Detalle del nudo de canto la viga PS1-11.

Identificación de nudos en la viga Ps1-13



117 †

Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
• Nudo detectado por el GPR
• Nudo no detectado por el GPR
— Rotura viga Ensayo a flexión

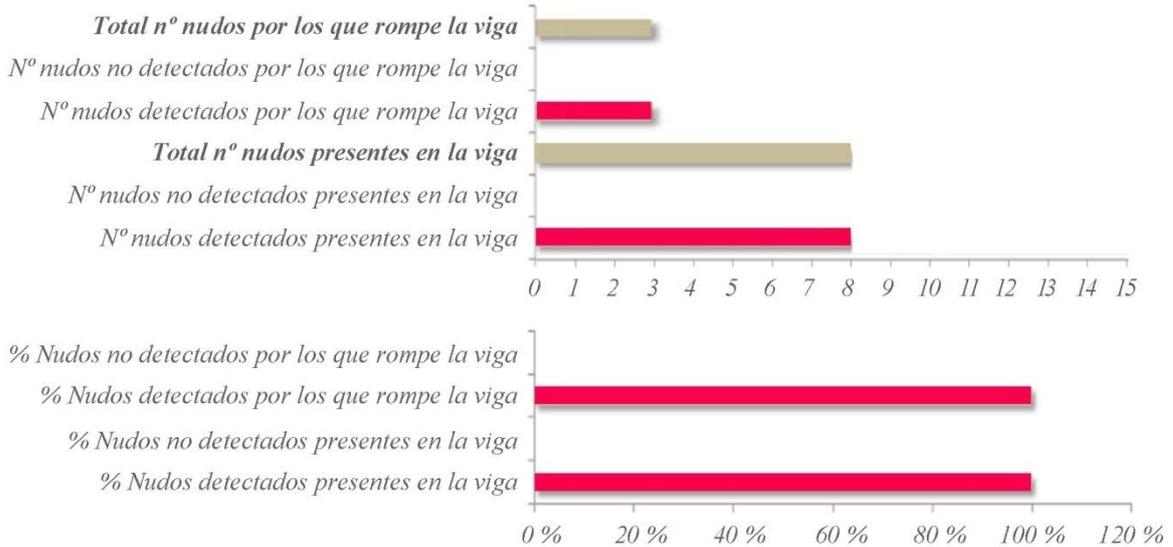


Gráfico 16. Identificación de nudos en la viga PS1-13. Clasificación visual y estadísticas

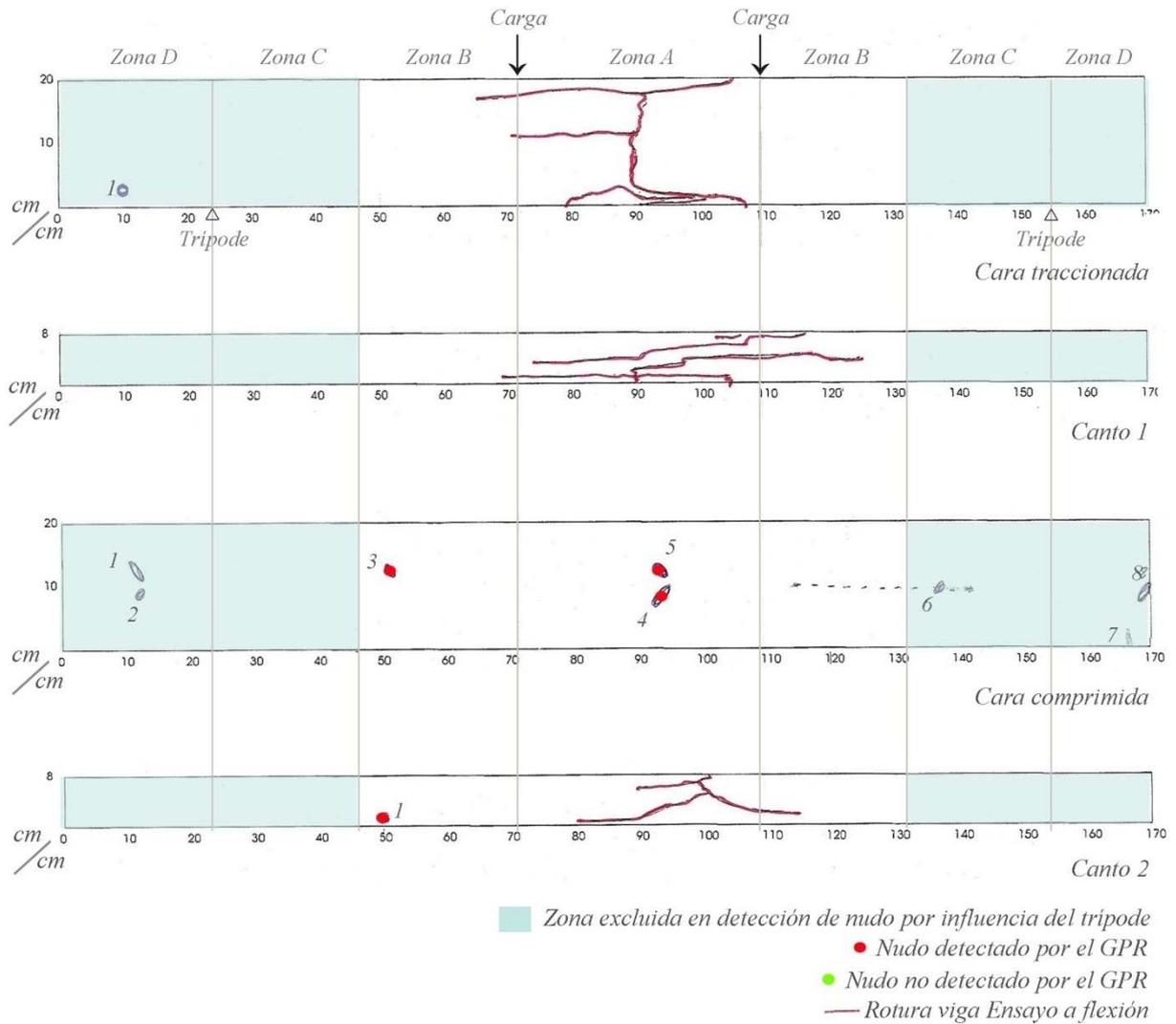
ps1-13	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
	2			sí
	3			no
	4			no
			5	no
			6	no
			7	no
Canto 1	1			sí
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
			5	no
Canto 2	1			sí
	2			no
			3	no

Tabla 7. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-13.



Figura 79. Detalle de la rotura de la viga PS1-13, por una zona libre de imperfecciones en superficie.

Identificación de nudos en la viga Ps1-19



119 †

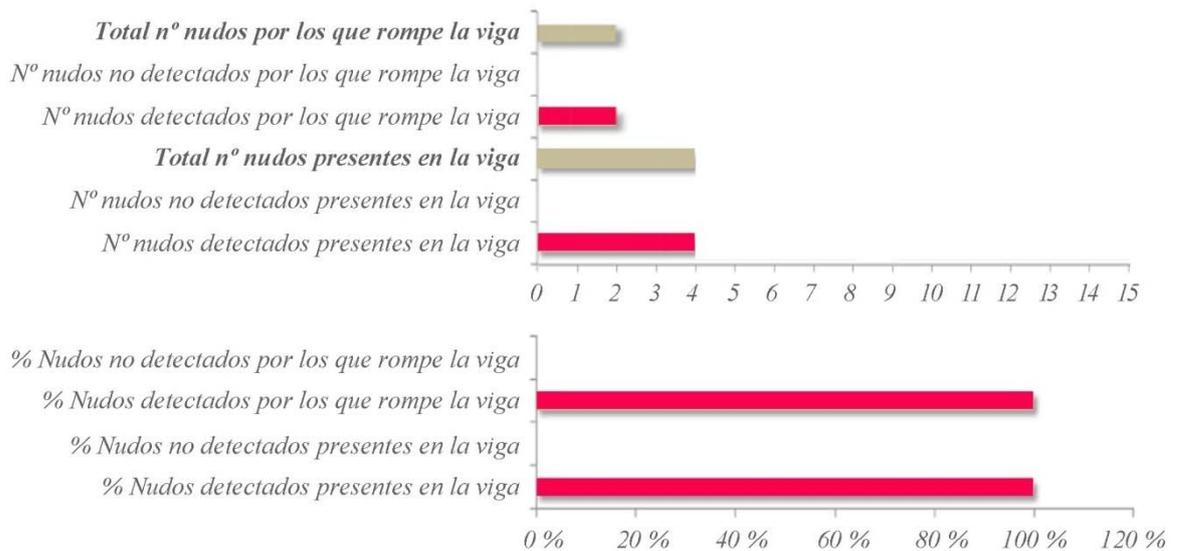


Gráfico 17. Identificación de nudos en la viga PS1-19. Clasificación visual y estadísticas.

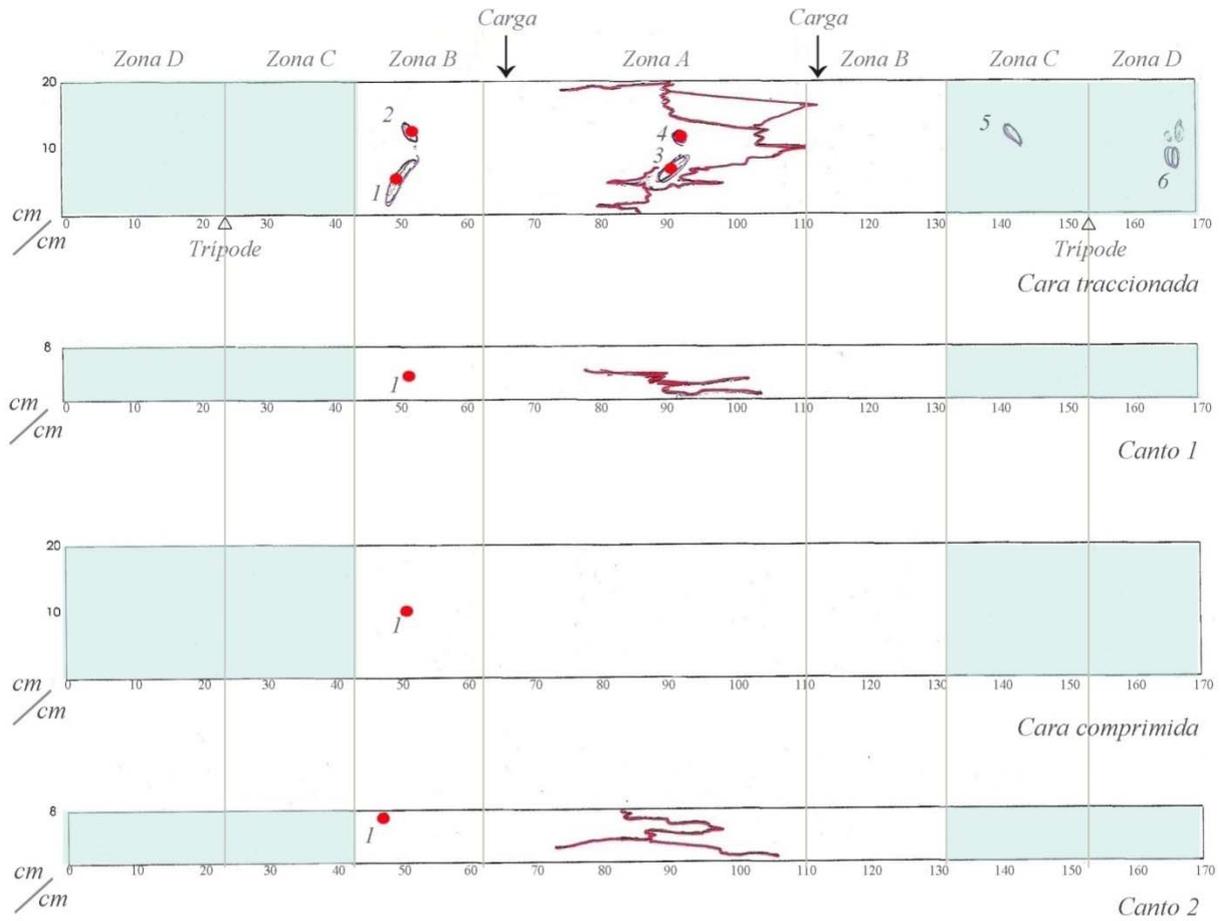
ps1-19				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
Canto 1				
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
	5			no
			6	no
			7	no
			8	no
Canto 2	1			no

Tabla 8. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-19.



Figura 80. Detalle de la rotura de la viga PS1-19, por una zona libre de imperfecciones en superficie.

Identificación de nudos en la viga Ps1-25



121 ††

- Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
- Nudo detectado por el GPR
- Nudo no detectado por el GPR
- Rotura viga Ensayo a flexión

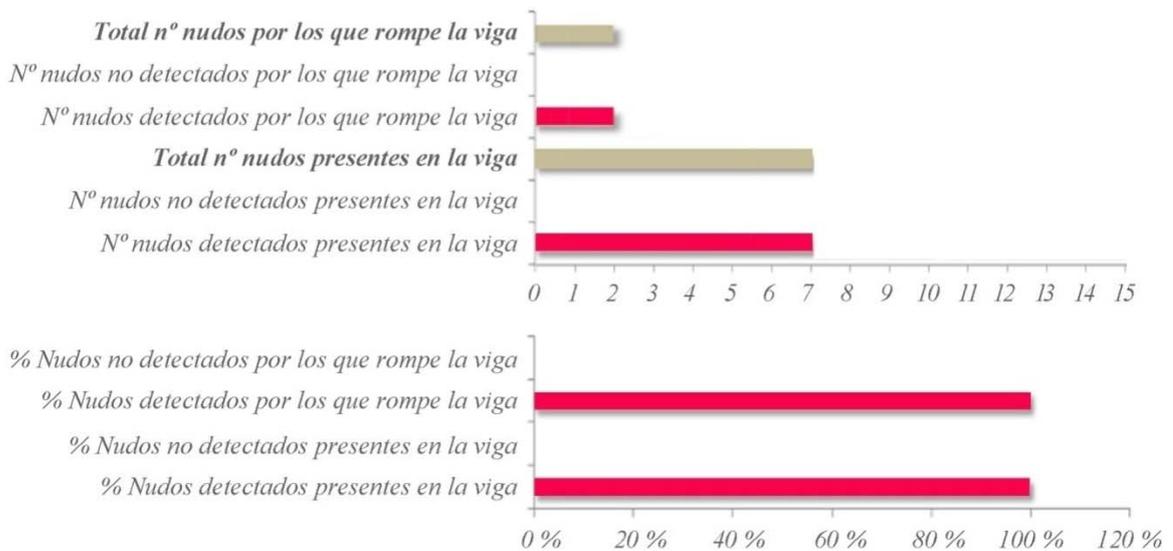


Gráfico 18. Identificación de nudos en la viga PS1-25. Clasificación visual y estadísticas.

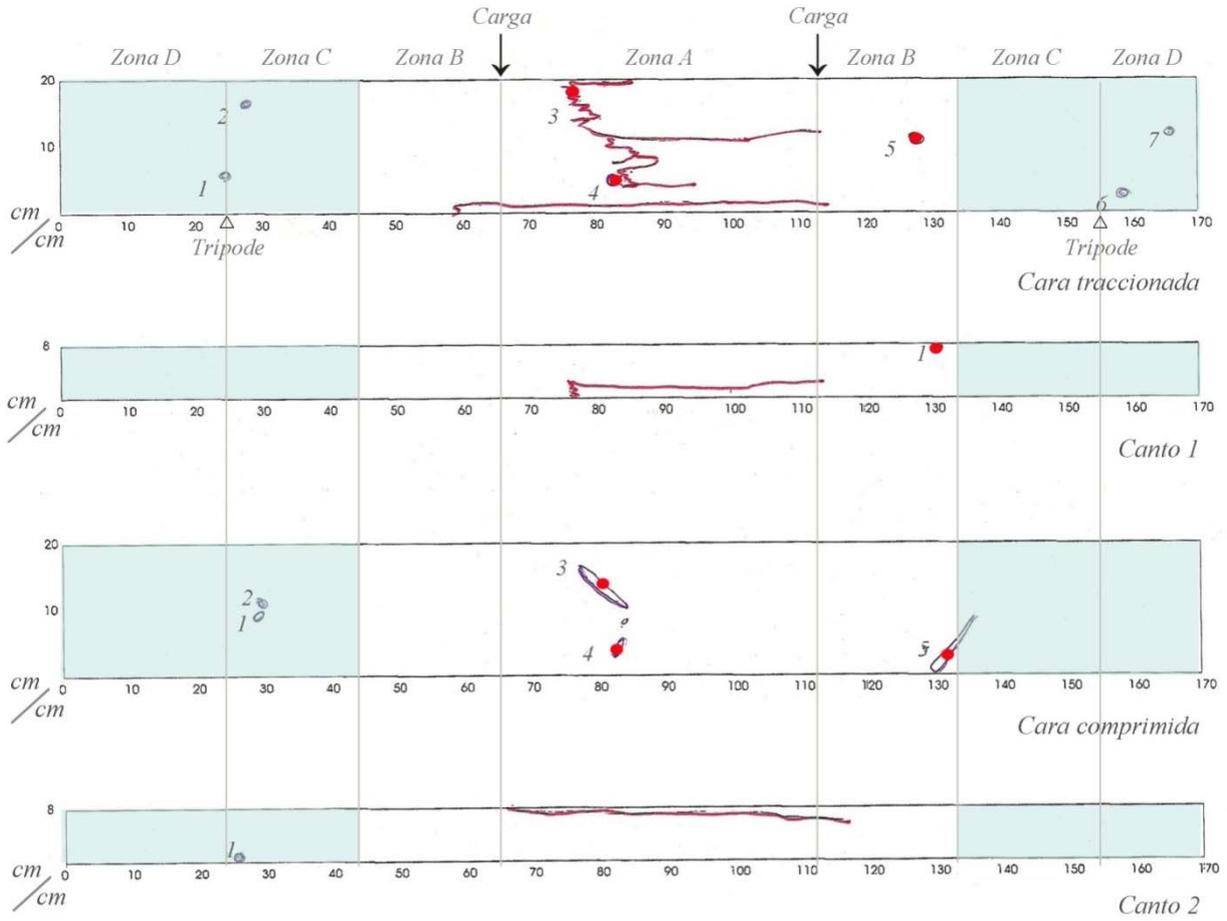
ps1-25				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.	1 2 3 4		5 6 7
Canto 1	1			no
Cara Comp.	1			no
Canto 2	1			no

Tabla 9. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-25.



Figura 81. Detalle de rotura de la viga PS1-25.

Identificación de nudos en la viga Ps1-26



Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
 Nudo detectado por el GPR
 Nudo no detectado por el GPR
 Rotura viga Ensayo a flexión

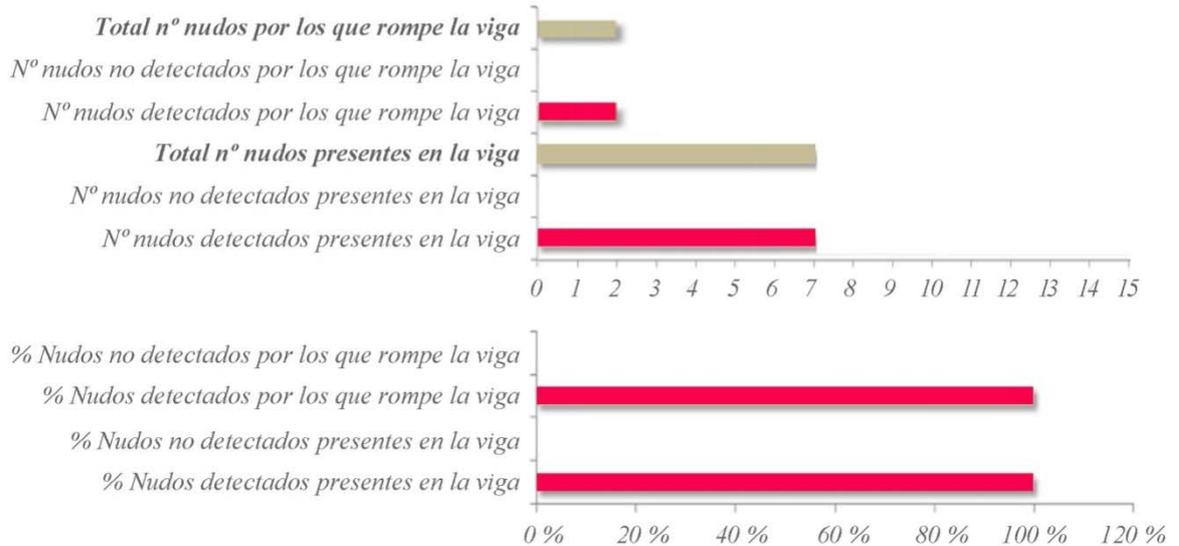


Gráfico 19. Identificación de nudos en la viga PS1-26. Clasificación visual y estadísticas.

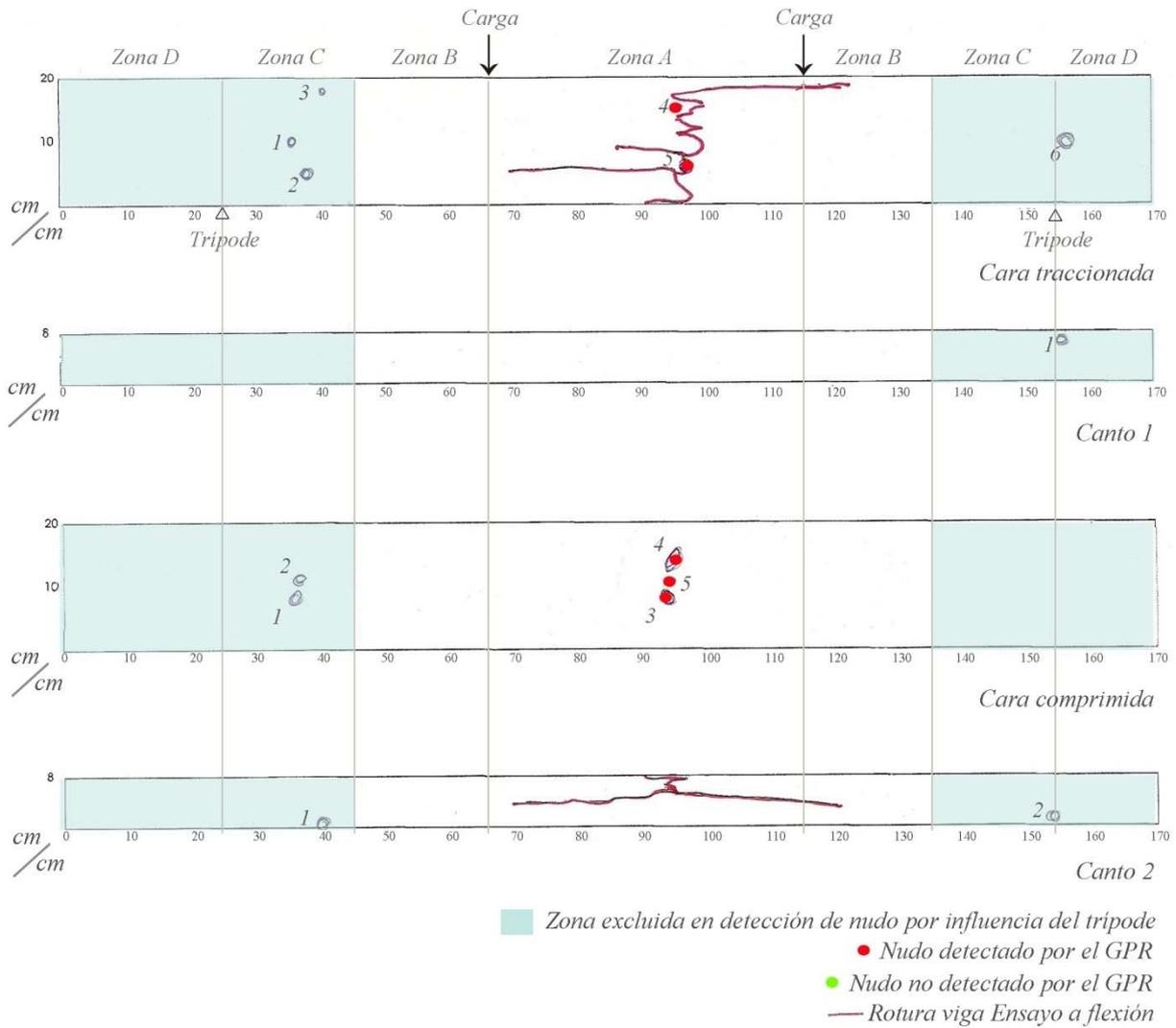
ps1-26				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.			1
			2	no
3				sí
4				sí
5				no
			6	no
			7	no
Canto 1	1			no
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
	5			no
Canto 2			1	no

Tabla 10. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-26.



Figura 82. Detalle del nudo de canto la viga PS1-26.

Identificación de nudos en la viga Ps1-28



125 †

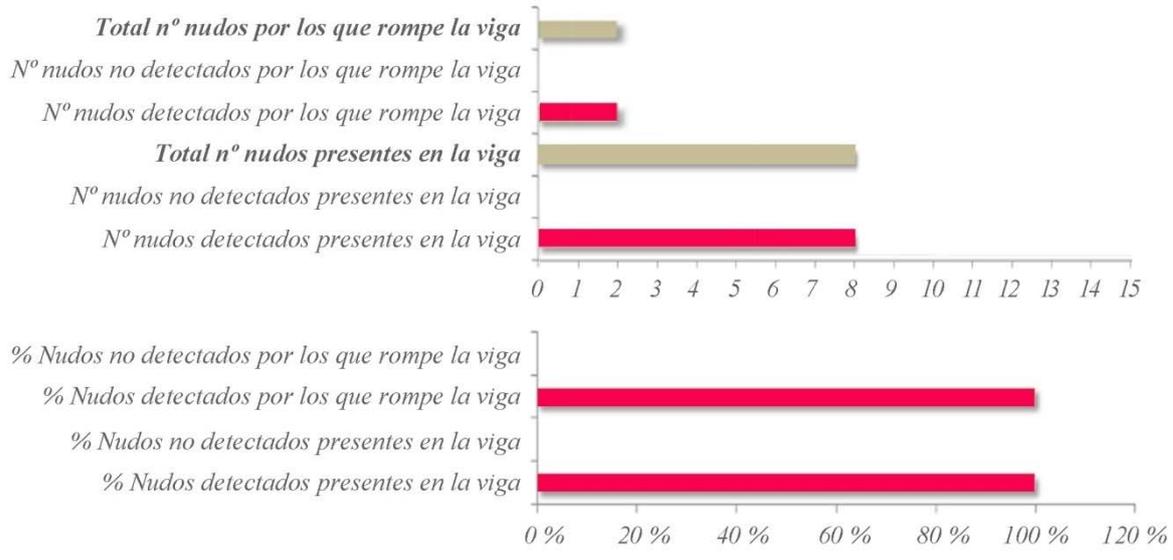


Gráfico 20. Identificación de nudos en la viga PS1-28. Clasificación visual y estadísticas.

ps1-28				
	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.	1			no
	2			no
	3			no
	4			sí
	5			sí
				6
Canto 1			1	no
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
	5			no
Canto 2			1	no
			2	no

Tabla 11. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS1-28.

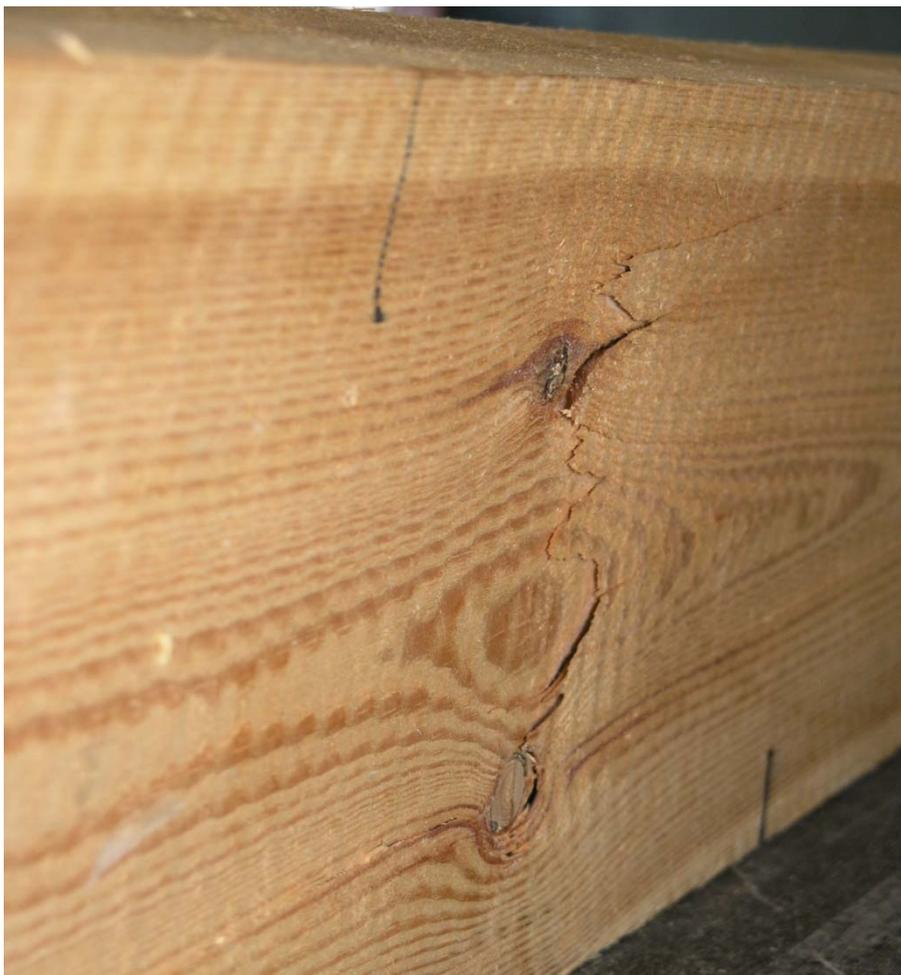
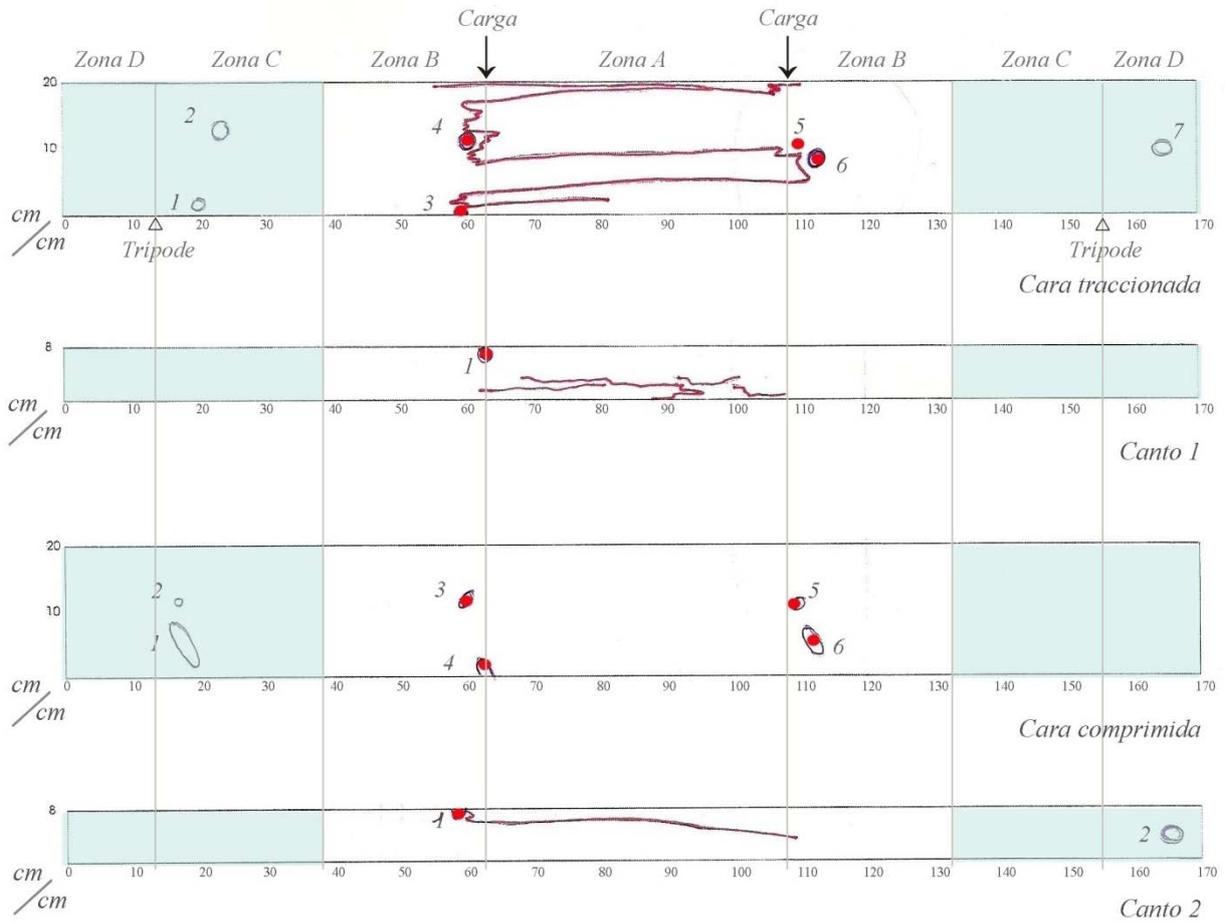


Figura 83. Detalle de rotura de la viga PS1-28.

Identificación de nudos en la viga Ps2-3



127 †

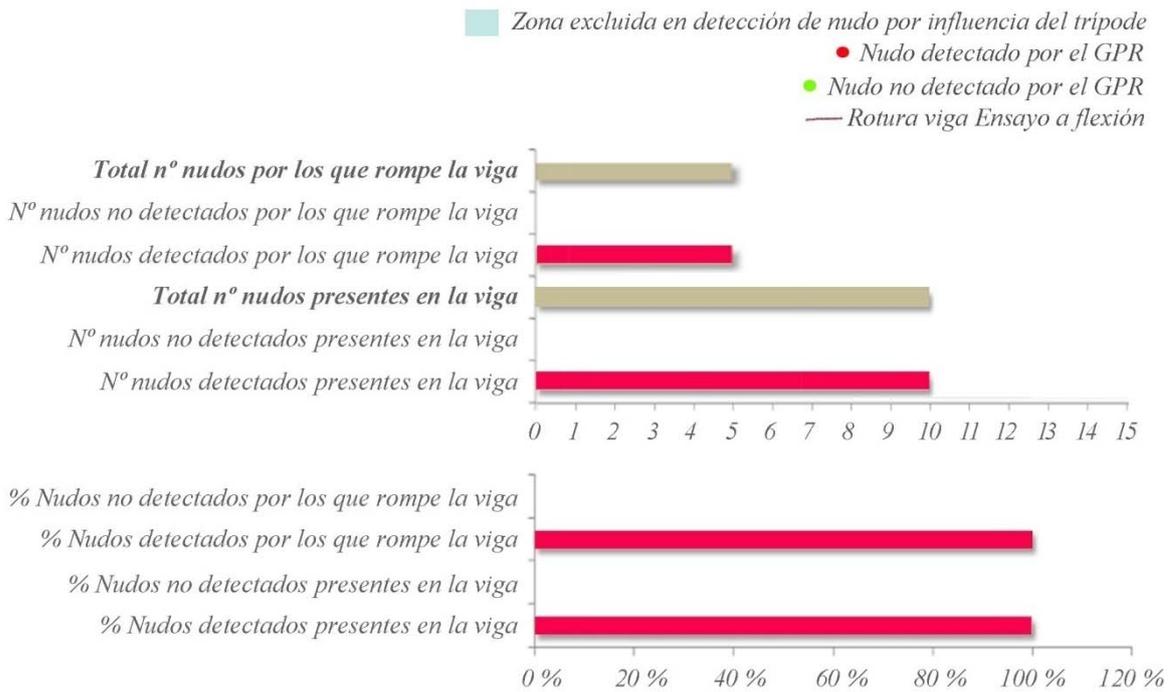


Gráfico 21. Identificación de nudos en la viga PS 2-3. Clasificación visual y estadísticas.

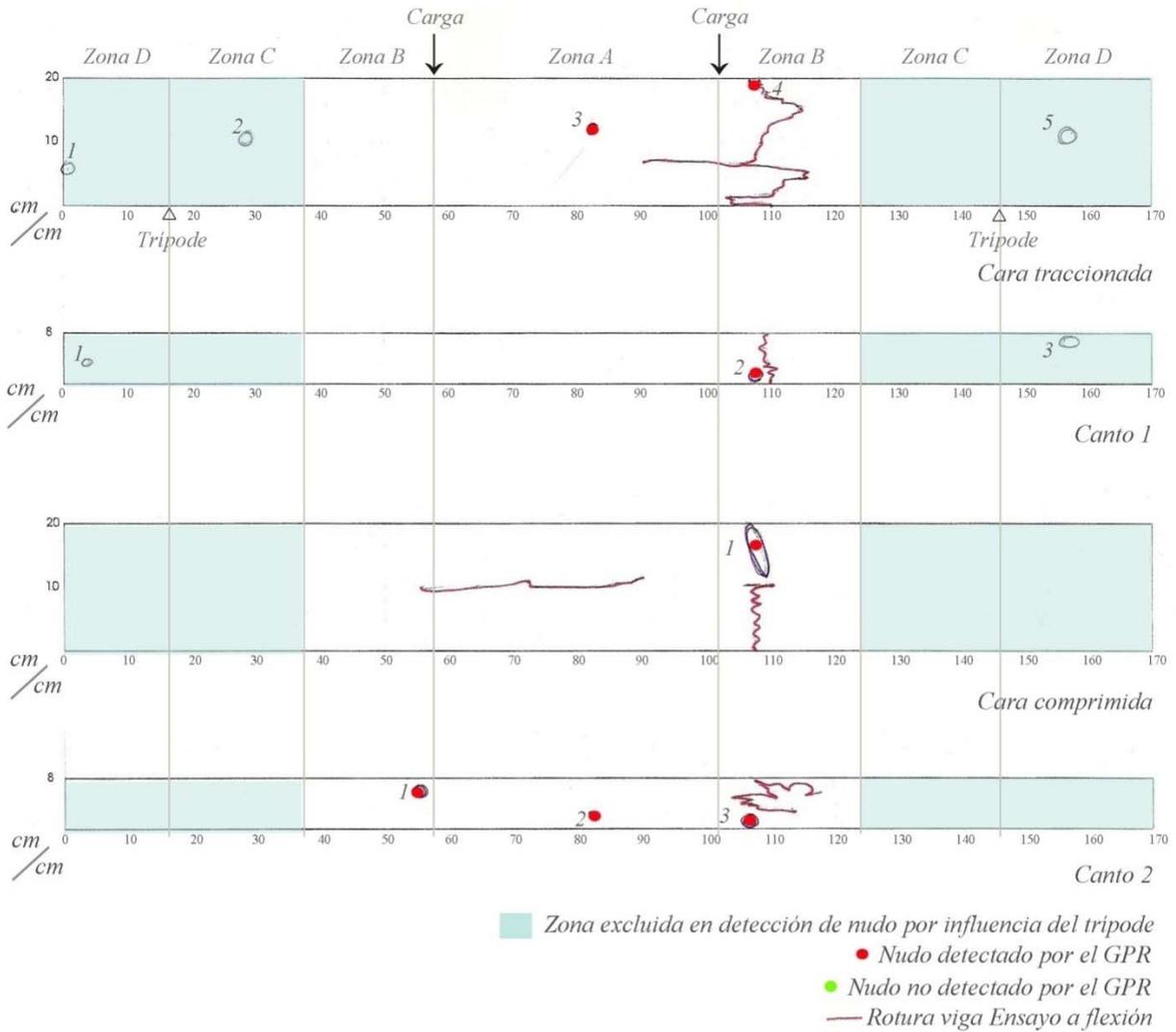
ps2-3	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
			2	no
	3			sí
	4			sí
	5			sí
	6			sí
Canto 1	1		7	no
				no
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
	5			no
	6			no
Canto 2	1			sí
			2	no

Tabla 12. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-3.



Figura 84. Detalle de rotura de la viga PS2-3.

Identificación de nudos en la viga Ps2-4



129 †

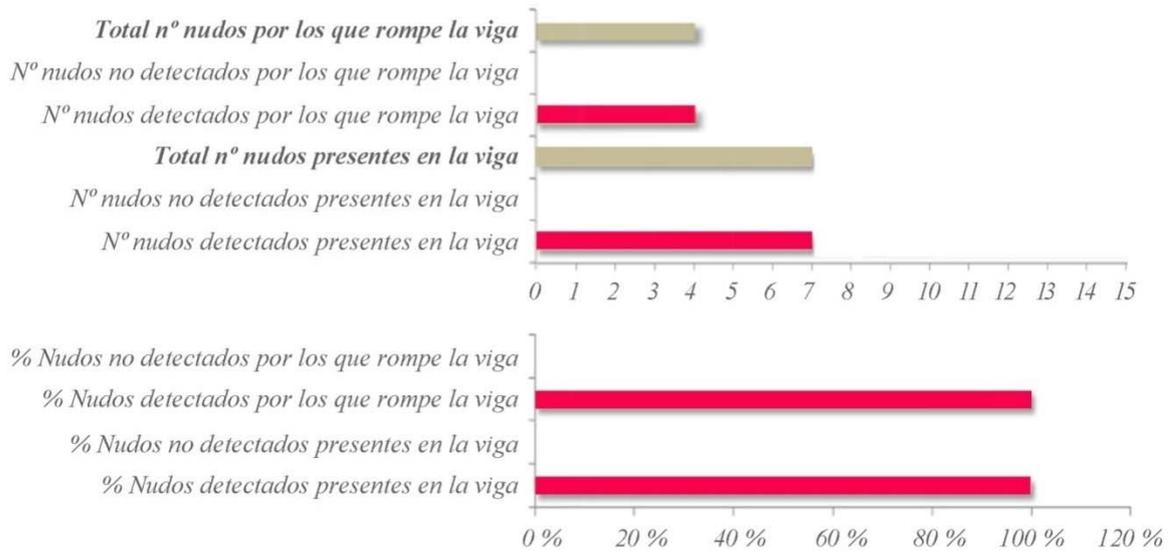


Gráfico 22. Identificación de nudos en la viga PS 2-4. Clasificación visual y estadísticas.

ps2-4	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
			2	no
	3			no
	4			sí
			5	no
Canto 1			1	no
	2			sí
			3	no
Cara Comp.	1			sí
Canto 2	1			no
	2			no
	3			sí

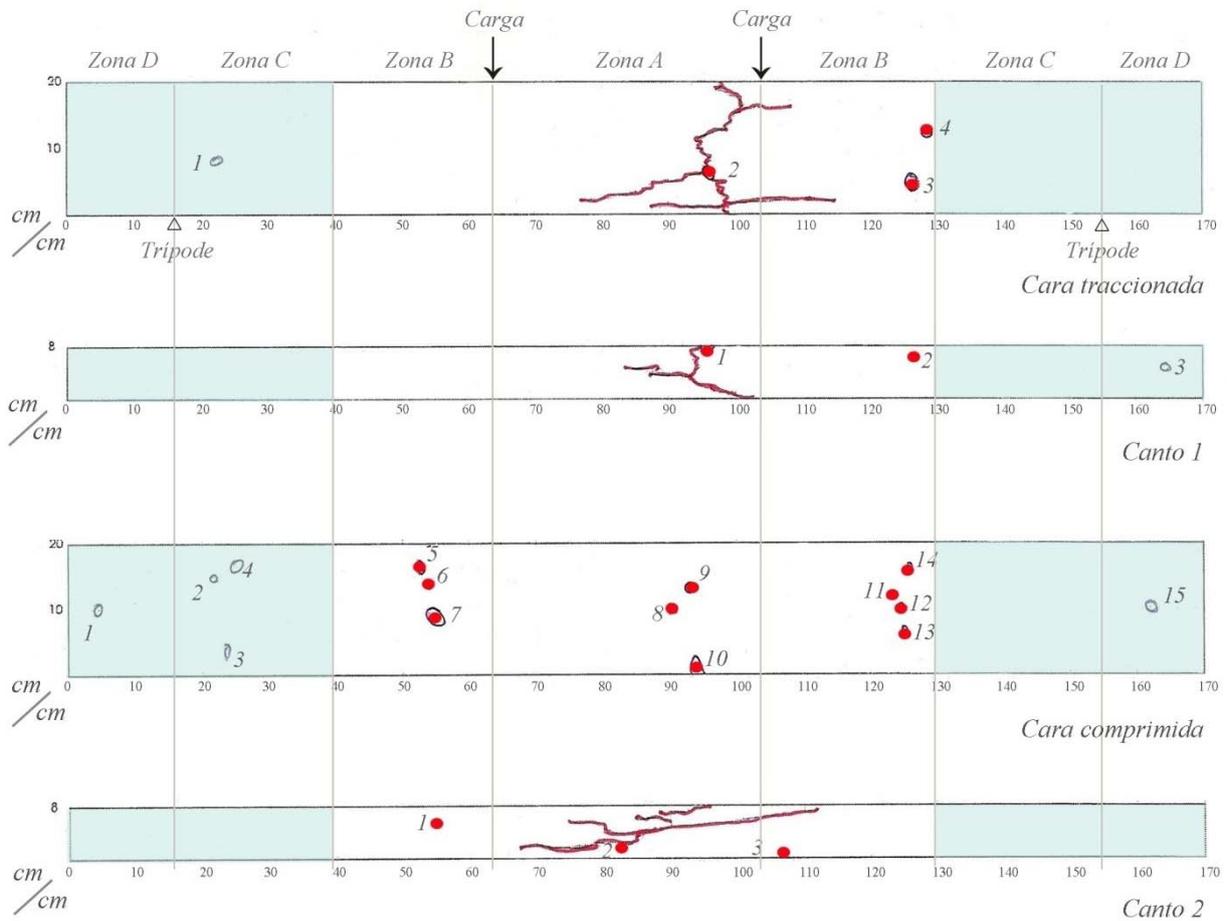
Tabla 13. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-4.

130 ††



Figura 85. Detalle de rotura de la viga PS2-4.

Identificación de nudos en la viga Ps2-9



131 †

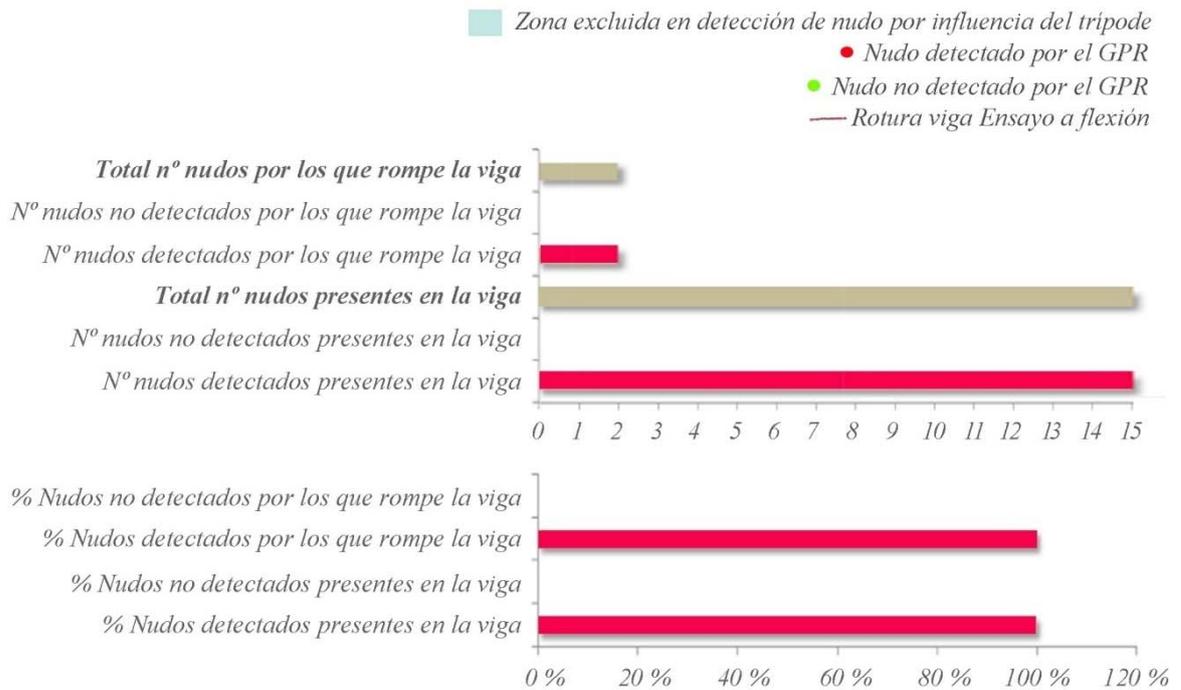


Gráfico 23. Identificación de nudos en la viga PS 2-9. Clasificación visual y estadísticas.

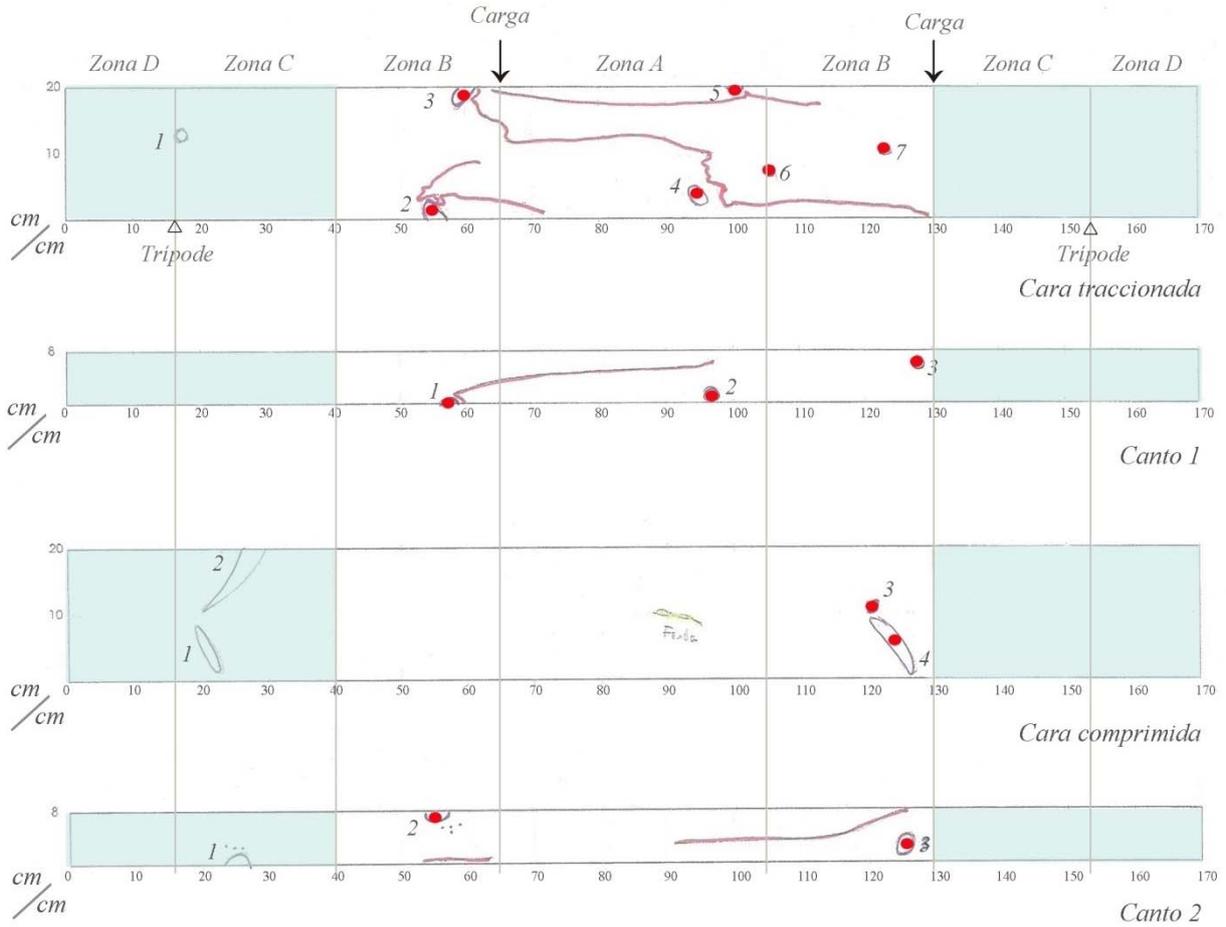
ps2-9				
Irregularidades ocultas detectadas				
	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.			1	no
	2			sí
	3			no
	4			
Canto 1	1			sí
	2			no
			3	no
Cara Comp.			1	no
			2	no
			3	no
			4	no
	5			no
	6			no
	7			no
	8			no
	9			no
	10			no
	11			no
	12			no
	13			no
	14			no
			15	no
Canto 2				

Tabla 14. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-9.



Figura 86. Detalle del nudo de canto la viga PS2-9.

Identificación de nudos en la viga Ps2-10



133 †

Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
• Nudo detectado por el GPR
• Nudo no detectado por el GPR
— Rotura viga Ensayo a flexión

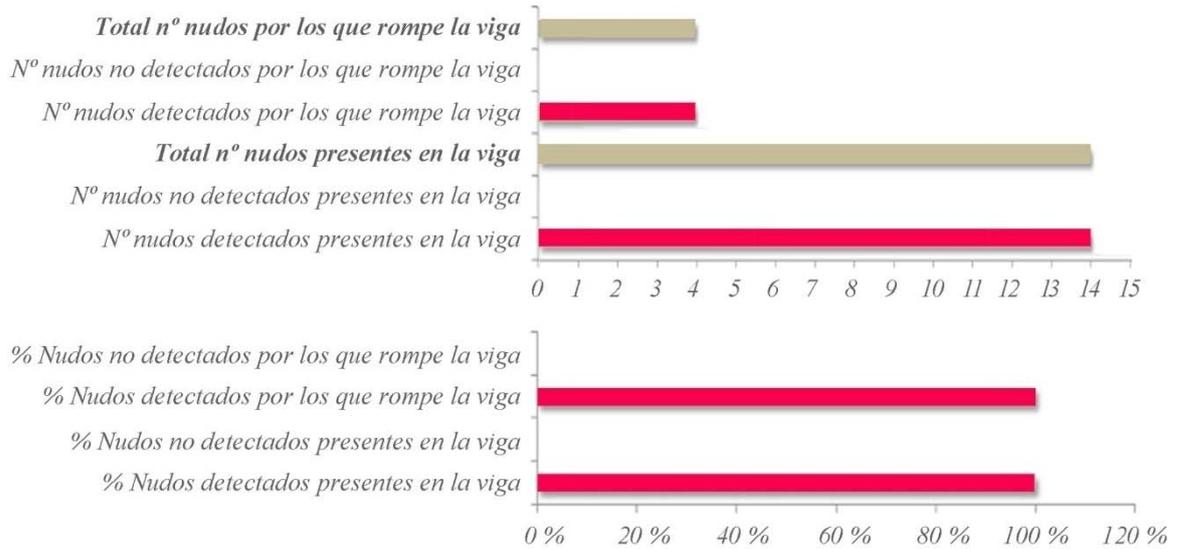


Gráfico 24. Identificación de nudos en la viga PS 2-10. Clasificación visual y estadísticas.

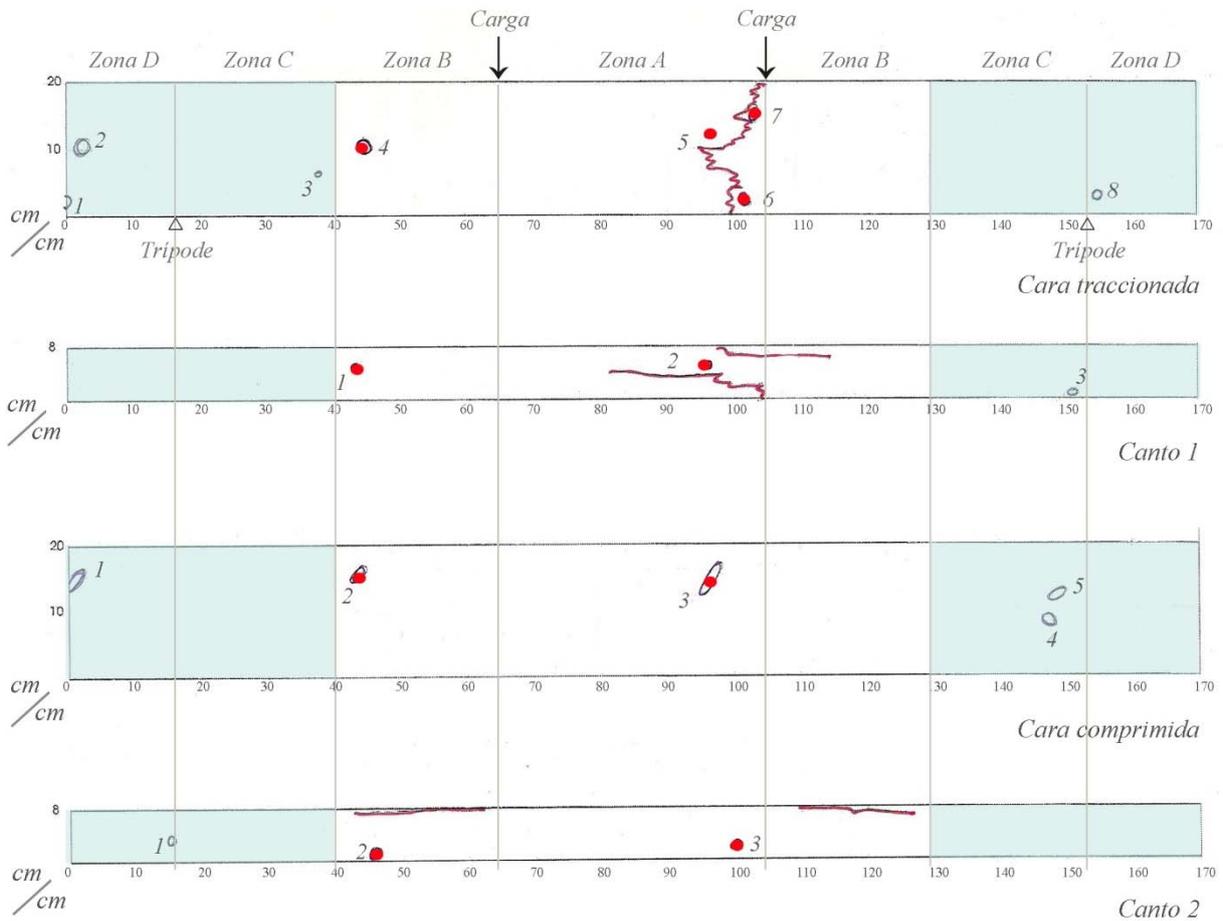
ps2-10				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.	1		
2				no
3				sí
4				sí
5				sí
6				no
7				no
Canto 1	1			sí
	2			no
	3			no
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
Canto 2			1	no
	2			no
	3			no

Tabla 15. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-10.



Figura 87. Detalle de rotura de la viga PS2-10.

Identificación de nudos en la viga Ps2-11



135 †

Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
 Nudo detectado por el GPR
 Nudo no detectado por el GPR
 Rotura viga Ensayo a flexión

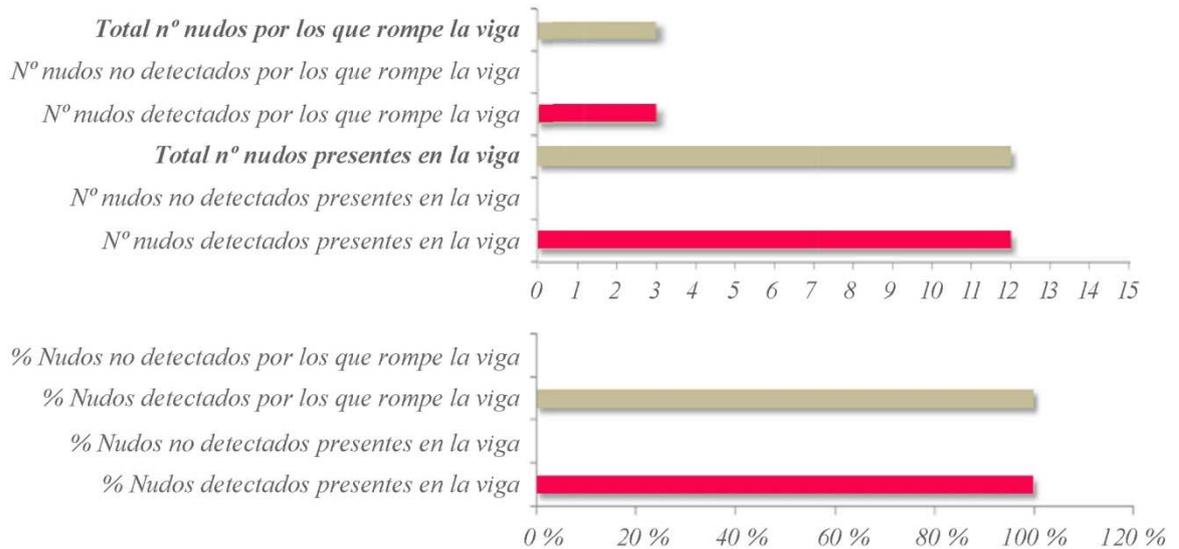


Gráfico 25. Identificación de nudos en la viga PS 2-11. Clasificación visual y estadísticas.

ps2-11				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.			1
			2	no
			3	no
4				no
5				sí
6				sí
7				sí
Canto 1			8	no
	1			
	2			no
Cara Comp.			3	sí
			1	no
	2			no
	3			no
	4		4	no
5		5	no	
Canto 2			1	no
	2			no
	3			no

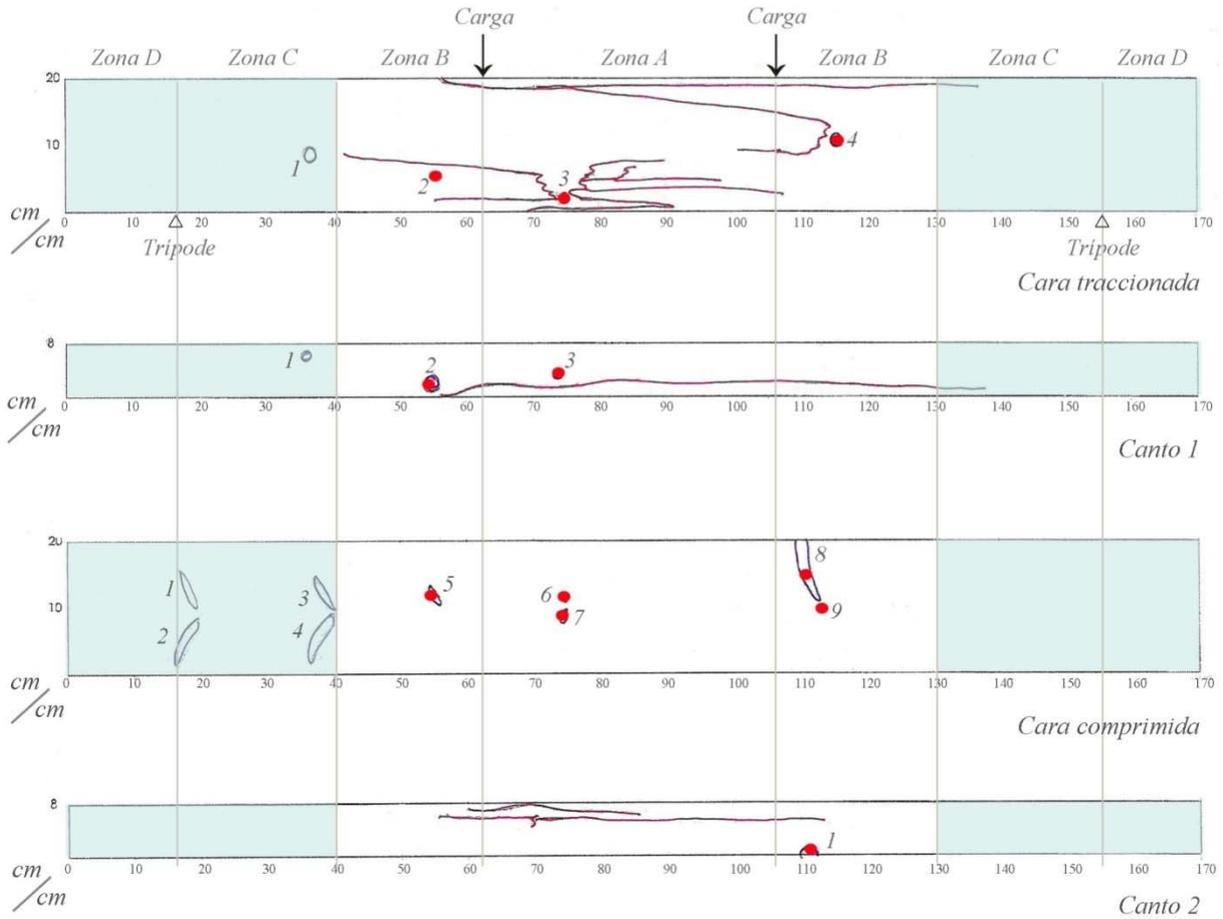
136 †

Tabla 16. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-11.



Figura 88. Detalle del nudo de canto la viga PS2-11.

Identificación de nudos en la viga Ps2-14



137 ††

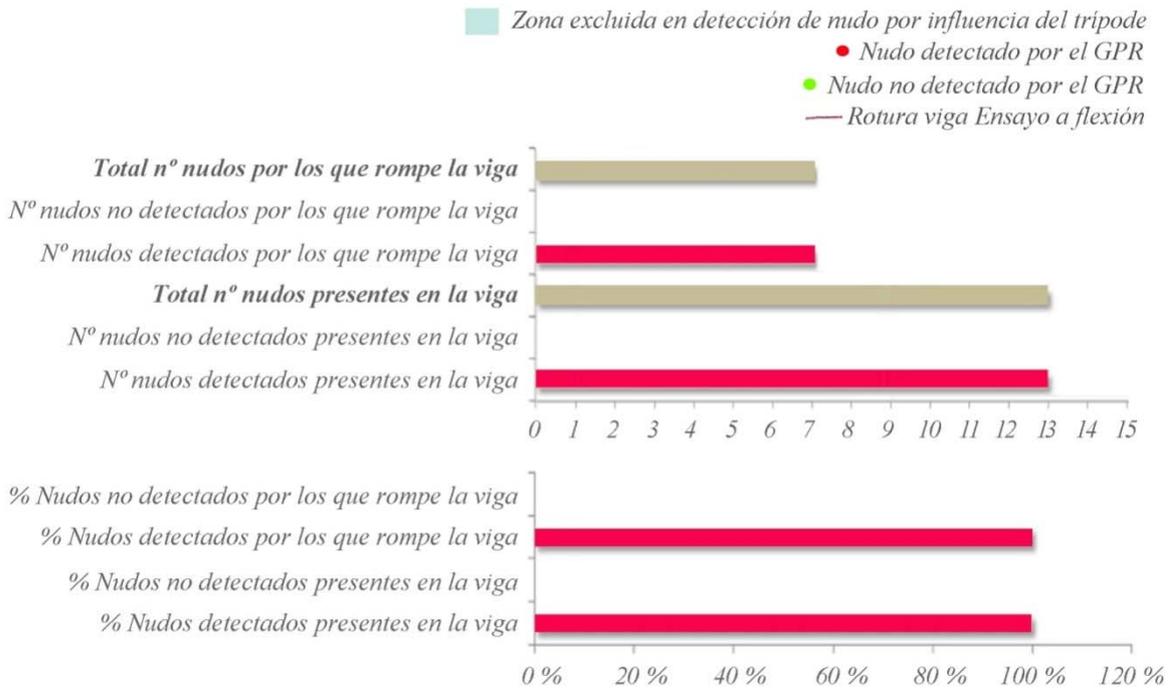


Gráfico 26. Identificación de nudos en la viga PS 2-14. Clasificación visual y estadísticas.

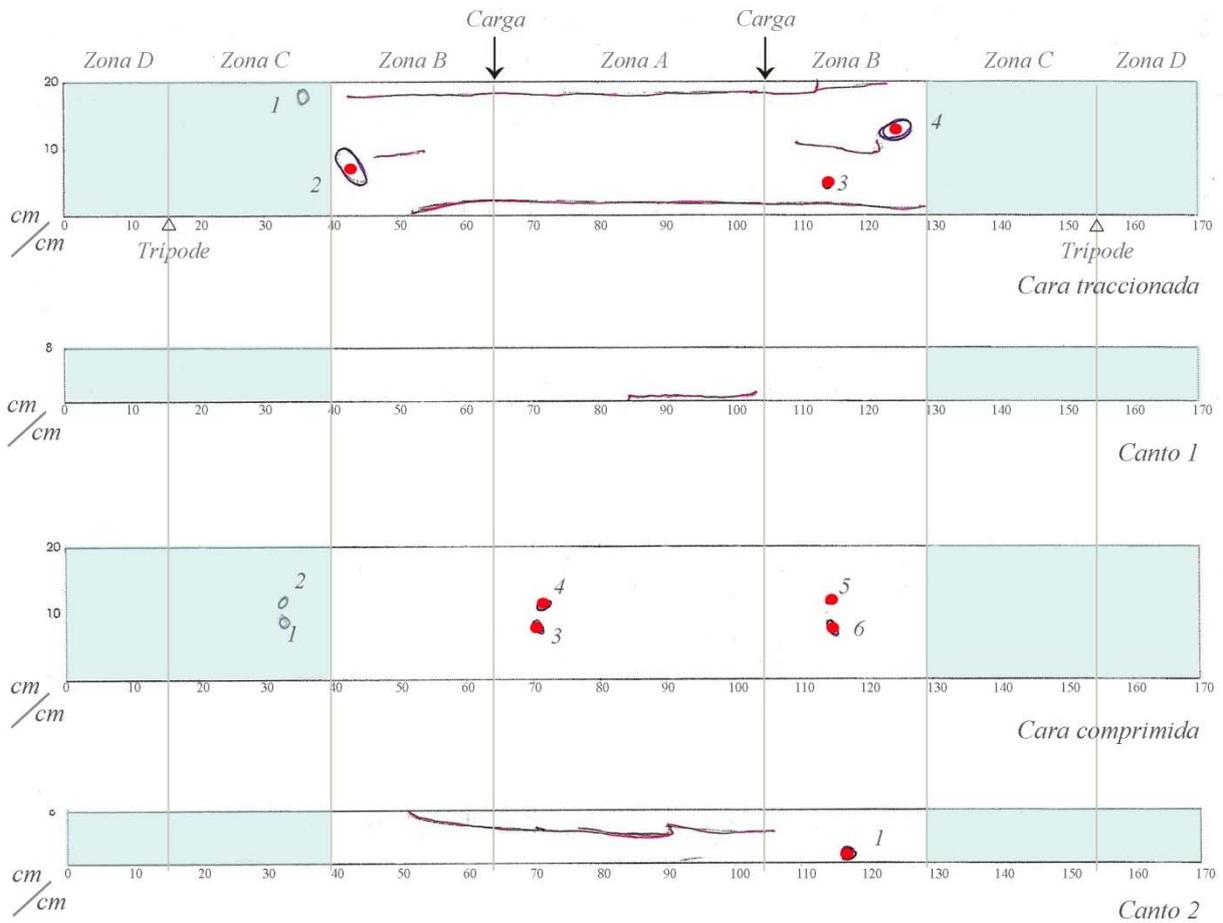
ps2-14				
Irregularidades ocultas detectadas			Zona excluida en detección	
	Detectado	No Detectado		Rompe por nudo
Cara Trac.	1		1	sí
	2			sí
	3			sí
	4			sí
Canto 1	1		1	sí
	2			sí
	3			sí
Cara Comp.			1	no
			2	no
			3	no
			4	no
	5			no
	6			no
	7			no
	8			no
	9			no
Canto 2	1			no

Tabla 17. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-14.



Figura 89. Detalle de rotura de la viga PS2-14.

Identificación de nudos en la viga Ps2-15



139 †

- Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
- Nudo detectado por el GPR
- Nudo no detectado por el GPR
- Rotura viga Ensayo a flexión

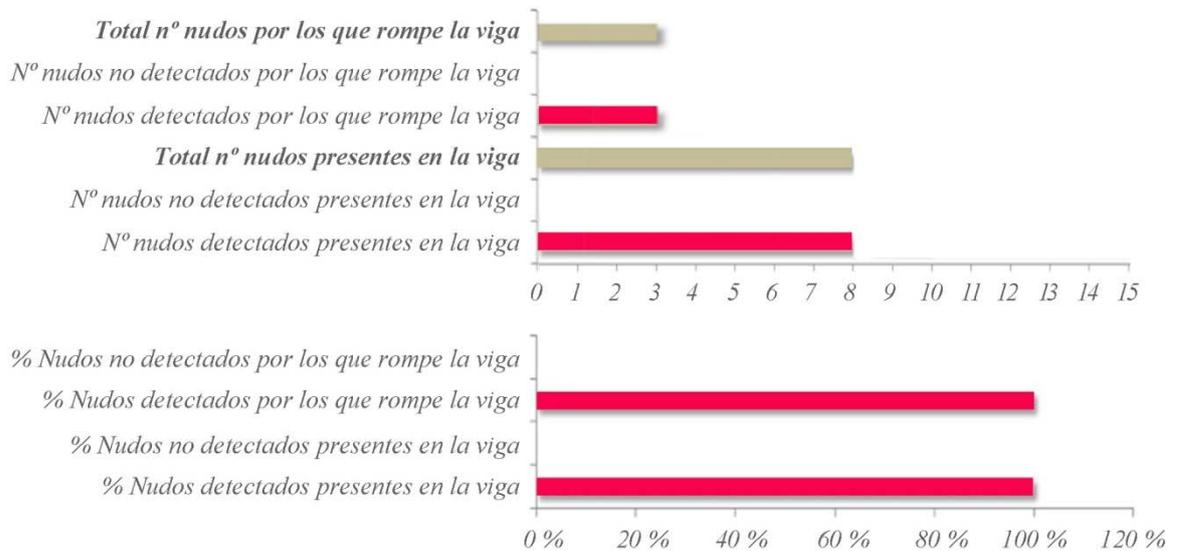


Gráfico 27. Identificación de nudos en la viga PS 2-15. Clasificación visual y estadísticas.

ps2-15				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.	2 3 4		1	sí sí sí sí
Canto 1				
Cara Comp.	3 4 5 6		1 2	no no no no no
Canto 2	1			no

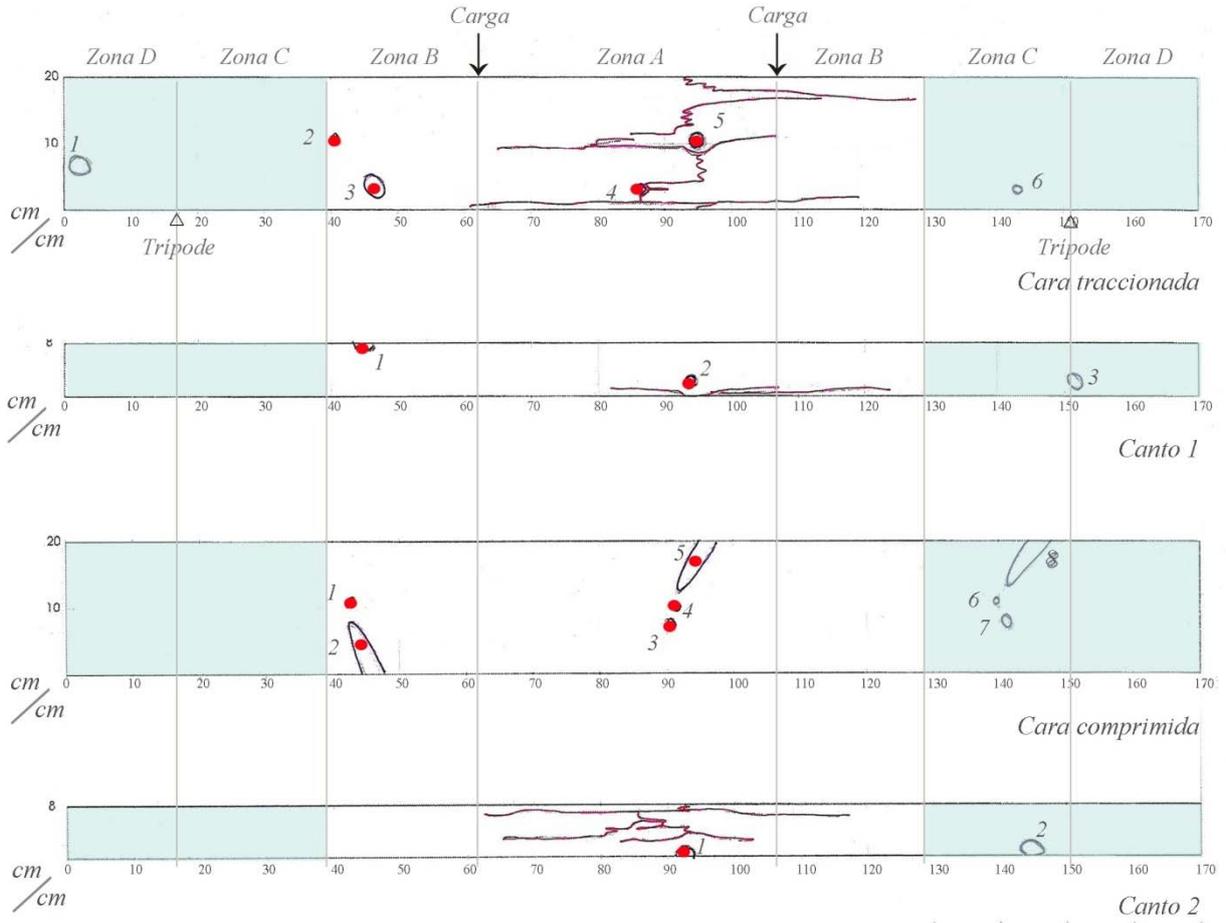
Tabla 18. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-15.

140 ††



Figura 90. Detalle de rotura de la viga PS2-15.

Identificación de nudos en la viga Ps2-16



- Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
- Nudo detectado por el GPR
- Nudo no detectado por el GPR
- Rotura viga Ensayo a flexión

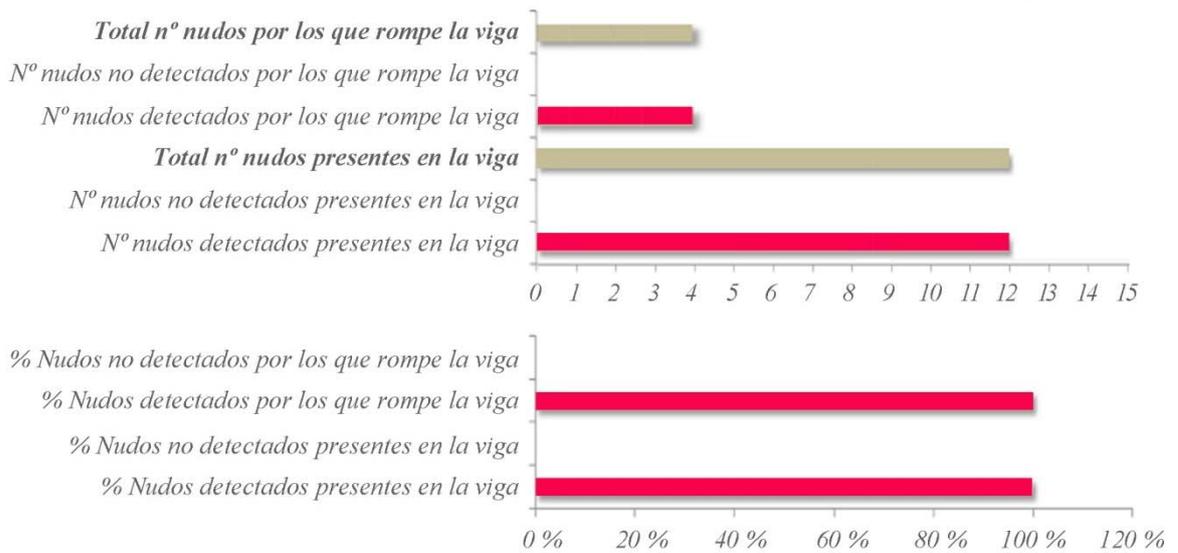


Gráfico 28. Identificación de nudos en la viga PS 2-16. Clasificación visual y estadísticas.

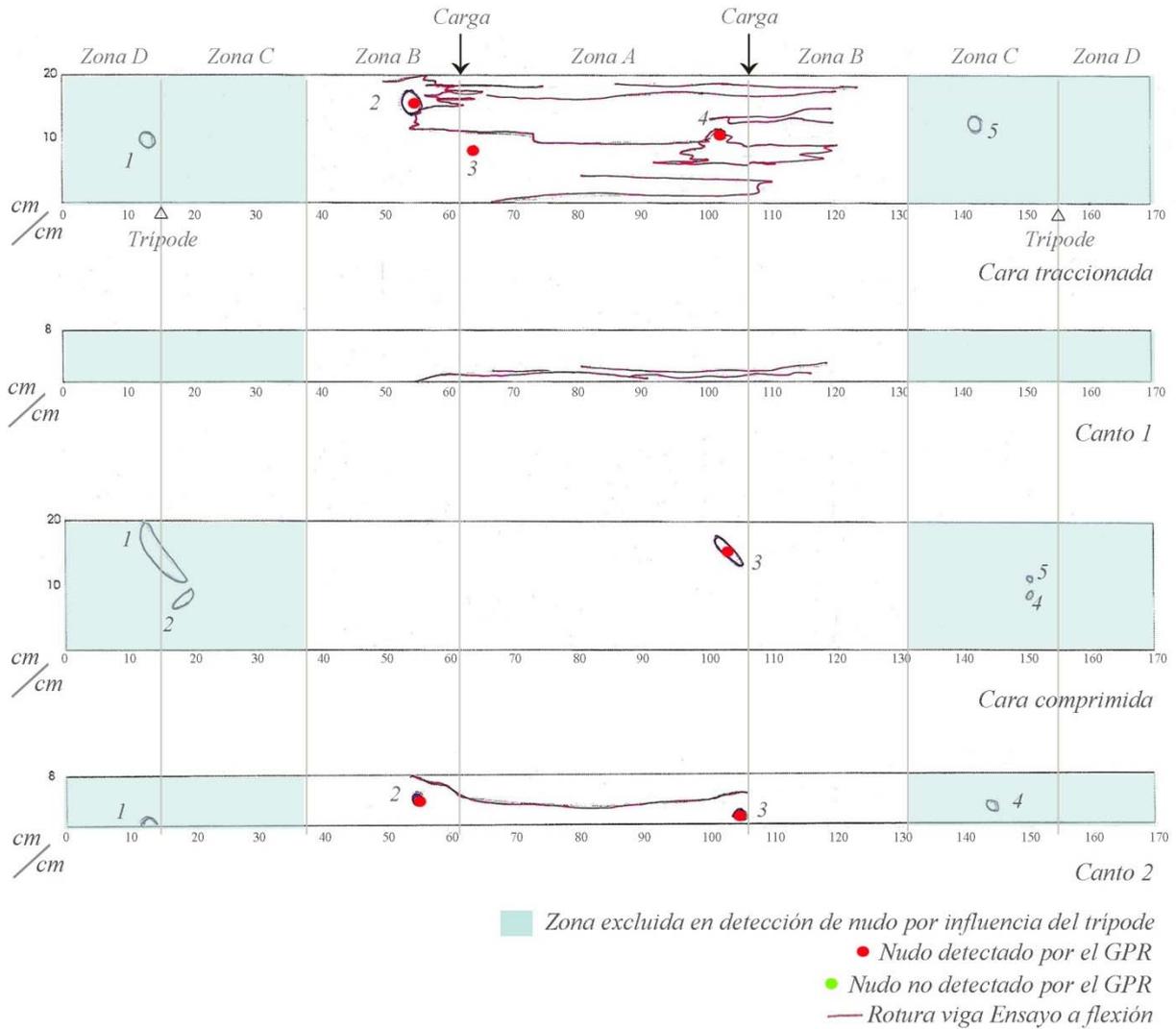
ps2-16				
Irregularidades ocultas detectadas			Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Detectado	No Detectado		
Cara Trac.			1	no
	2			no
	3			no
	4			sí
	5			sí
Canto 1			6	no
	1			no
	2			sí
Cara Comp.			3	no
	1			no
	2			no
	3			no
	4			no
	5			no
			6	no
			7	no
		8	no	
Canto 2	1			sí
			2	no

Tabla 19. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-16.



Figura 91. Detalle del nudo de canto la viga PS2-16.

Identificación de nudos en la viga Ps2-18



143 †

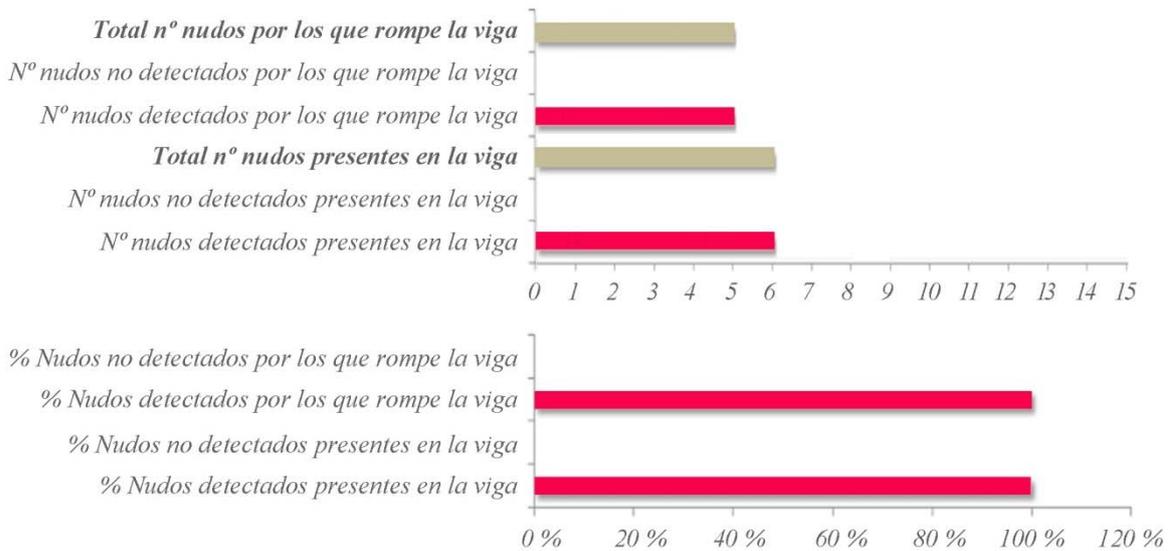


Gráfico 29. Identificación de nudos en la viga PS 2-18. Clasificación visual y estadísticas.

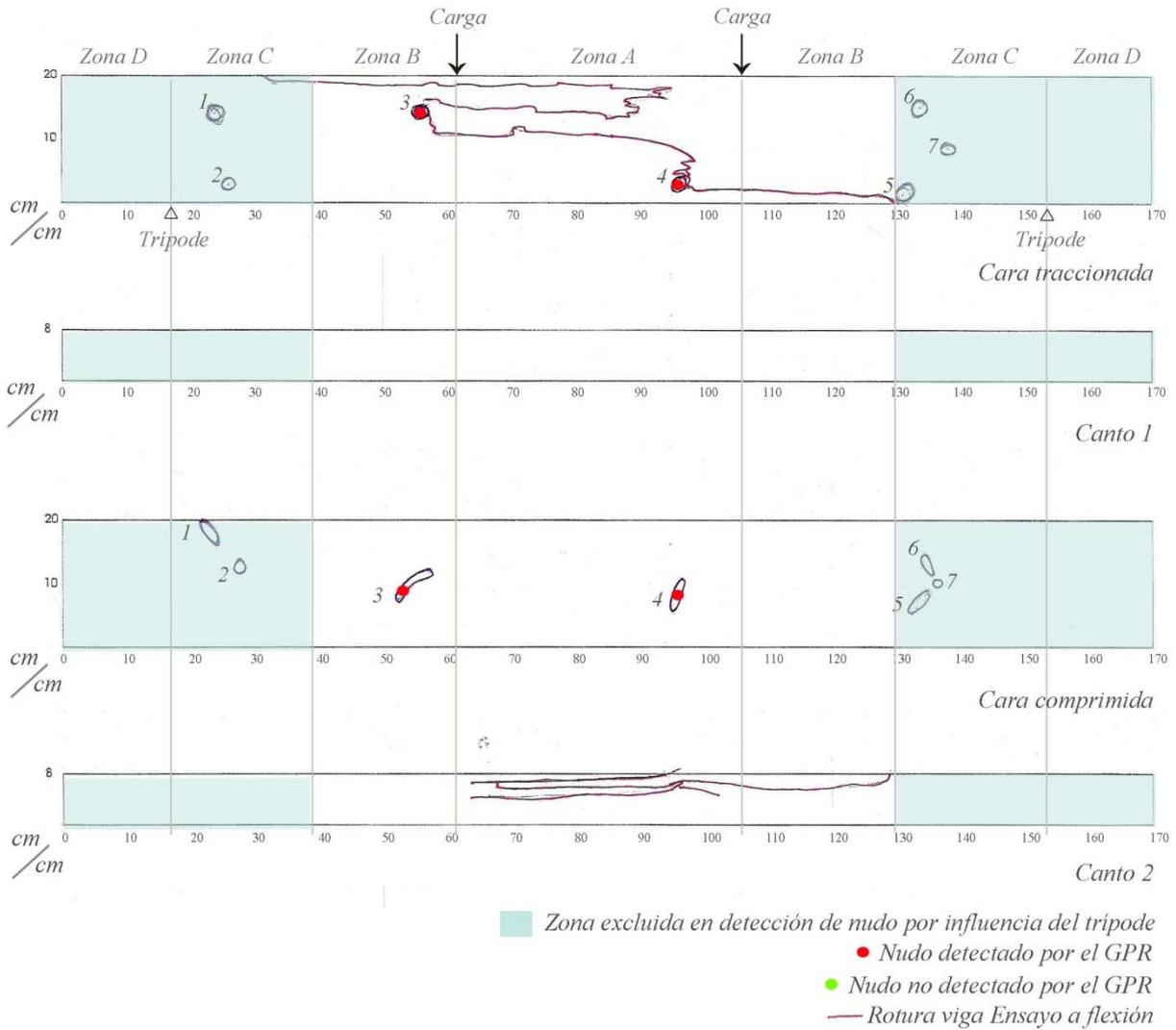
ps2-18					
Irregularidades ocultas detectadas			Zona excluida en detección	Rompe por nudo	
	Detectado	No Detectado			
Cara Trac.			1	no	
	2			sí	
	3			sí	
	4			sí	
Canto 1			5	no	
			1	no	
	Cara Comp.			2	no
		3		4	no
			5	no	
Canto 2			1	no	
	2			sí	
	3			sí	
			4	no	

Tabla 20. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-18.



Figura 92. Detalle de rotura de la viga PS2-18.

Identificación de nudos en la viga Ps2-19



145 †

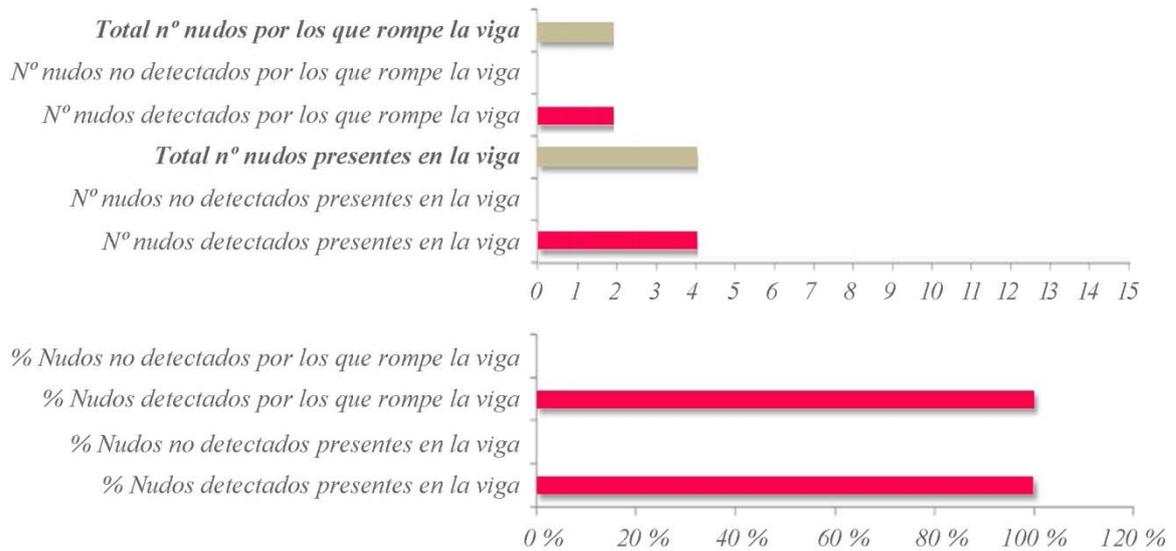


Gráfico 30. Identificación de nudos en la viga PS 2-19. Clasificación visual y estadísticas.

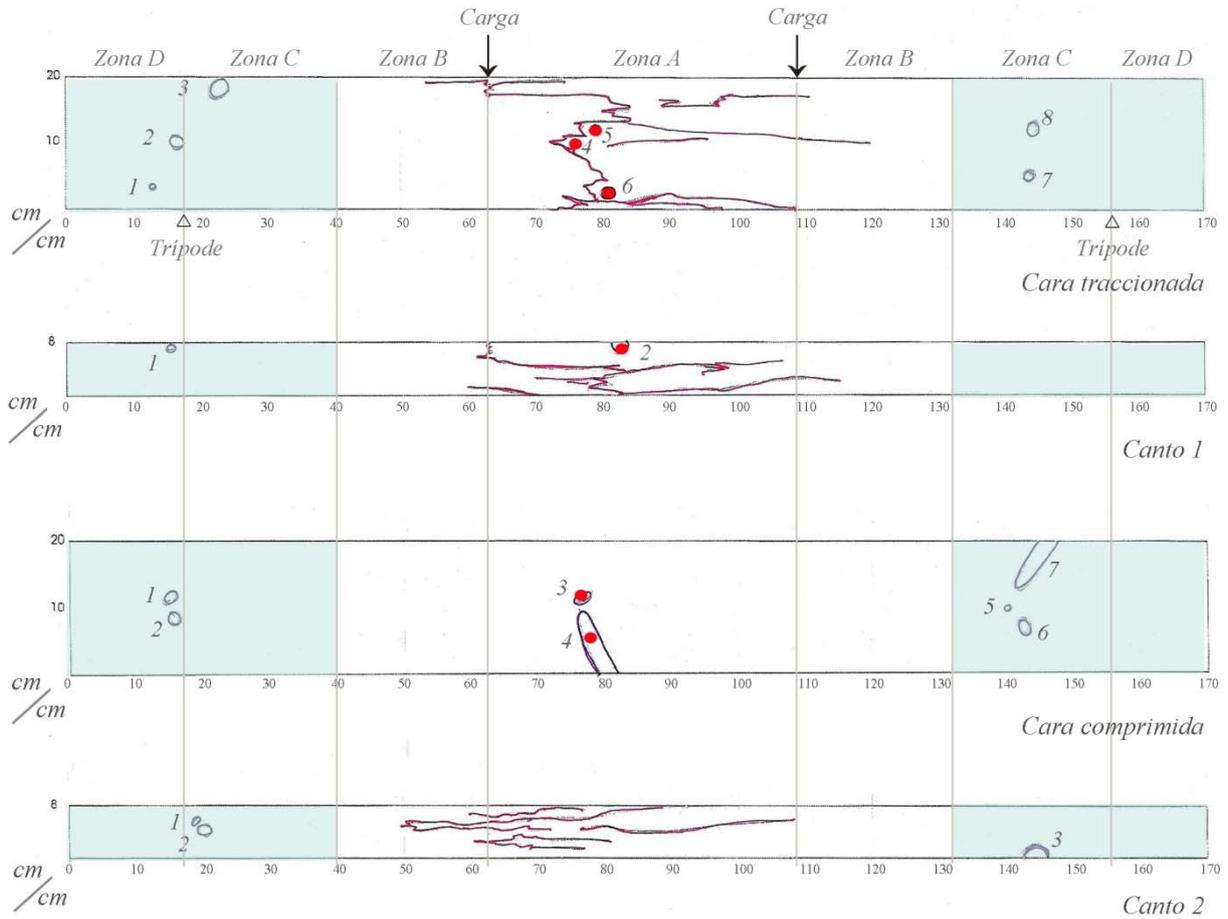
ps2-19				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.			1
			2	no
3				sí
4				sí
			5	sí
			6	no
			7	no
Canto 1				
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
			5	no
			6	no
			7	no
Canto 2				

Tabla 21. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-19.



Figura 93. Detalle de rotura de la viga PS2-19.

Identificación de nudos en la viga Ps2-21



147 ††

- Zona excluida en detección de nudo por influencia del tripode
- Nudo detectado por el GPR
- Nudo no detectado por el GPR
- Rotura viga Ensayo a flexión

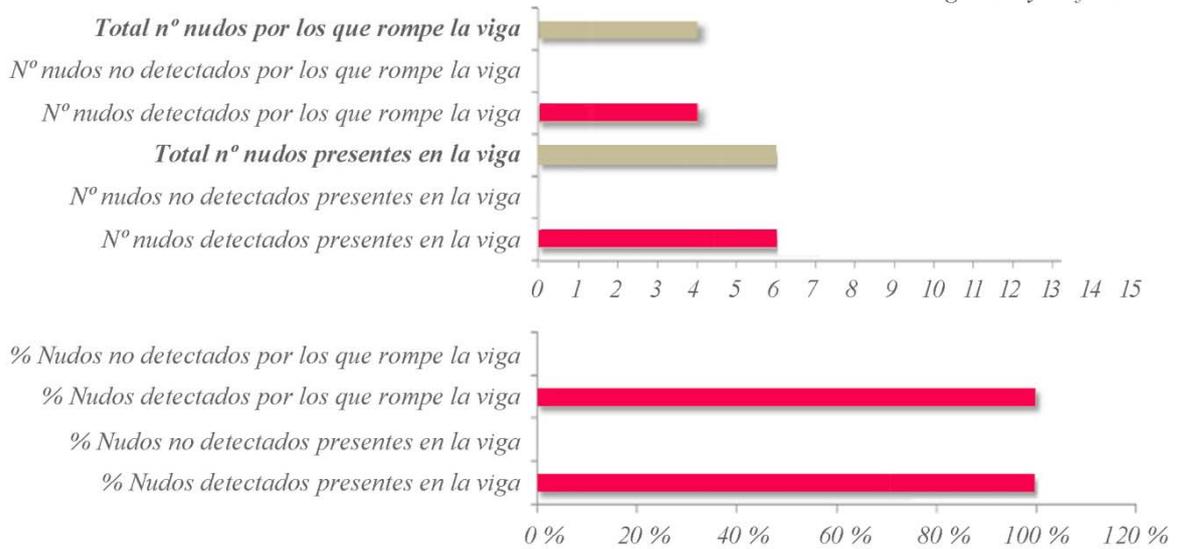


Gráfico 31. Identificación de nudos en la viga PS 2-21. Clasificación visual y estadísticas.

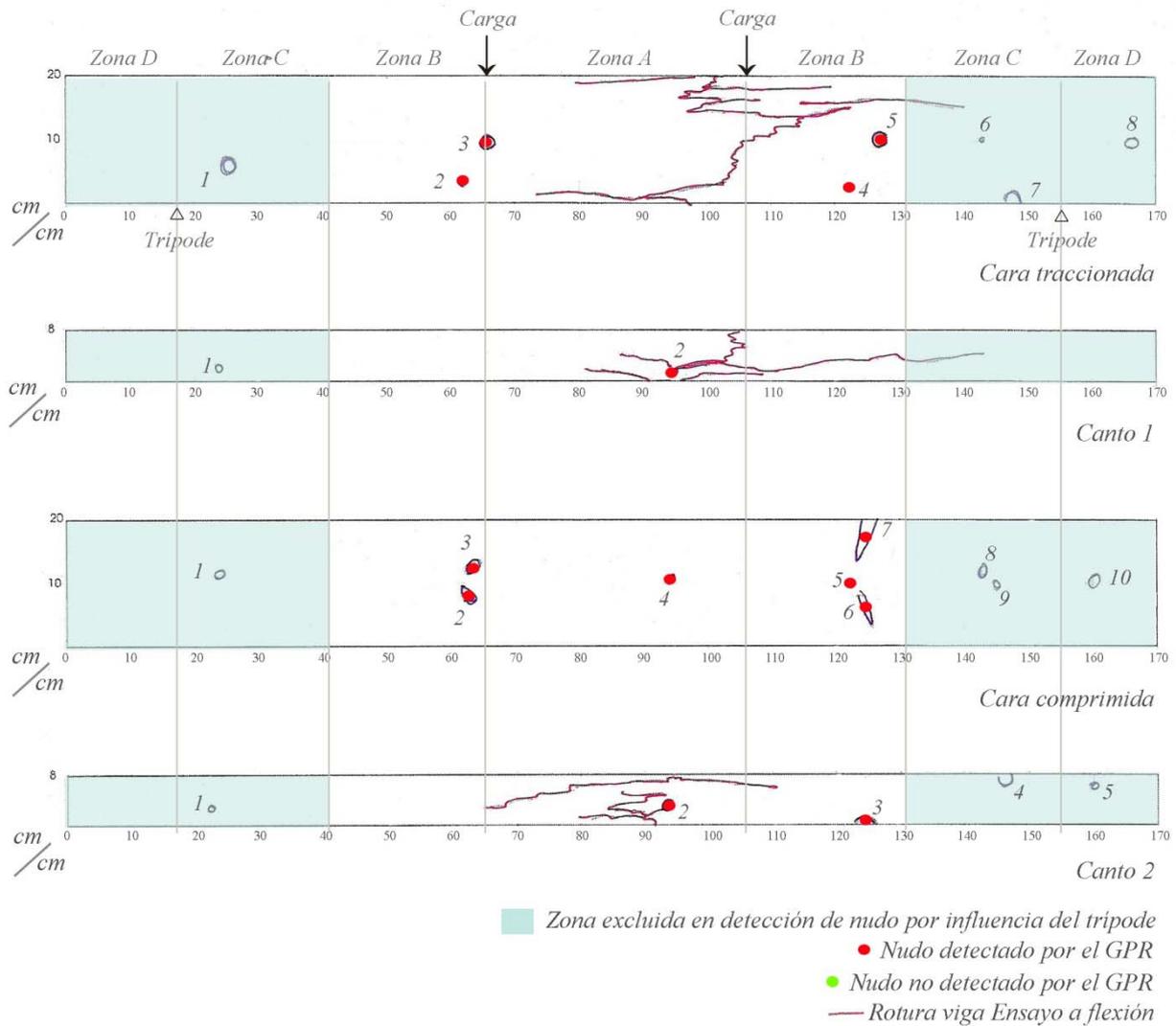
ps2-21				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.			1
			2	no
			3	no
4				sí
5				sí
6				sí
			7	no
			8	no
Canto 1		1		no
	2			sí
Cara Comp.			1	no
			2	no
	3			no
	4			no
			5	no
			6	no
			7	no
Canto 2			1	no
			2	no
			3	no

Tabla 22. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-21.



Figura 94. Detalle del nudo de canto la viga PS2-21.

Identificación de nudos en la viga Ps2-22



149 †

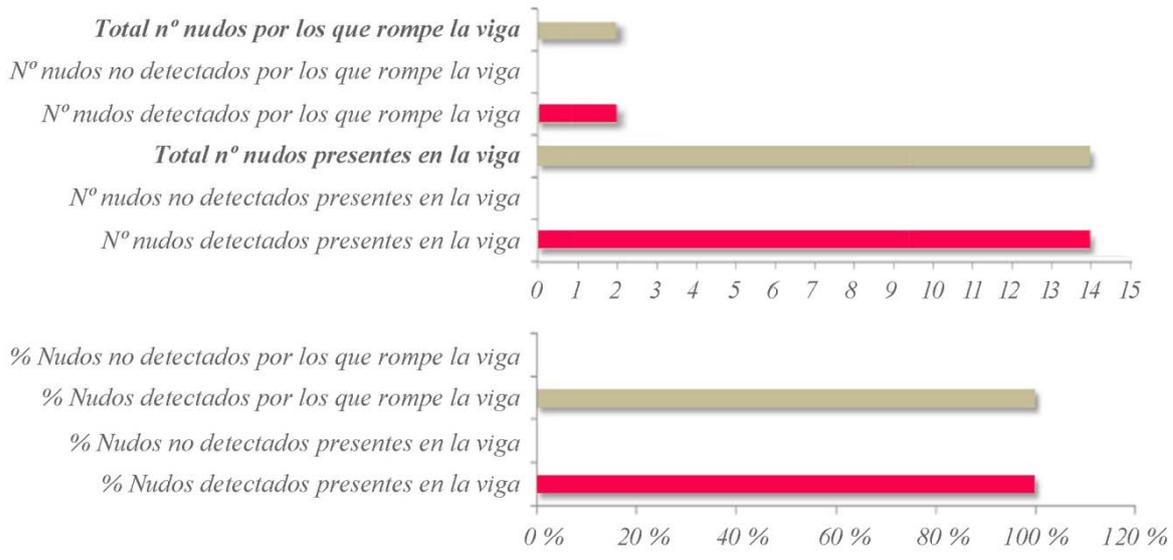


Gráfico 32. Identificación de nudos en la viga PS 2-22. Clasificación visual y estadísticas.

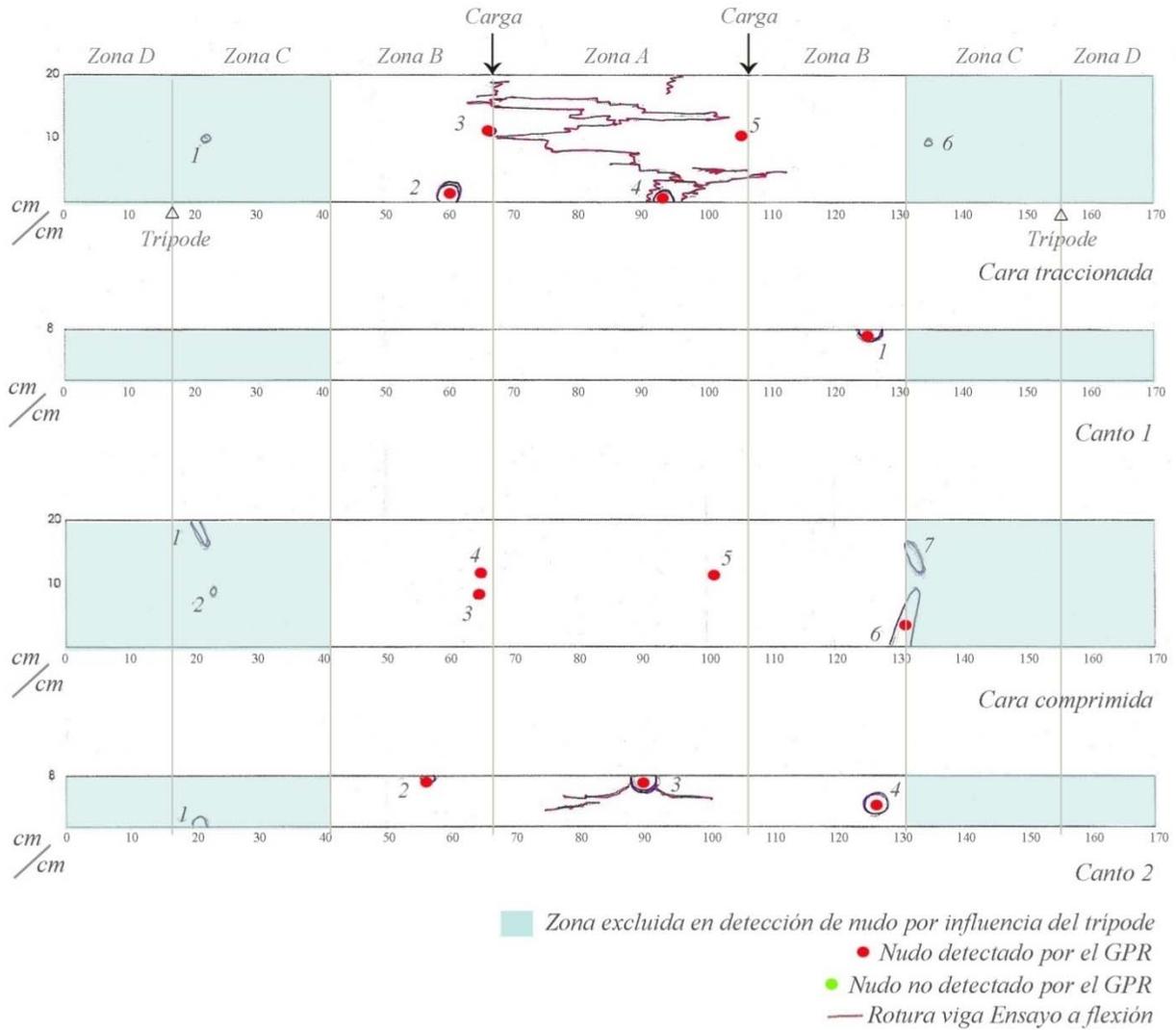
ps2-22				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.	2 3 4 5		1
	7		6 7 8	no no no
Canto 1	2		1	no sí
Cara Comp.	2 3 4 5 6 7		1	no no no no no no
			8 9 10	no no no
Canto 2	2 3		1	no sí
			4 5	no no

Tabla 23. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-22.



Figura 95. Detalle de rotura de la viga PS2-22.

Identificación de nudos en la viga Ps2-27



151 †

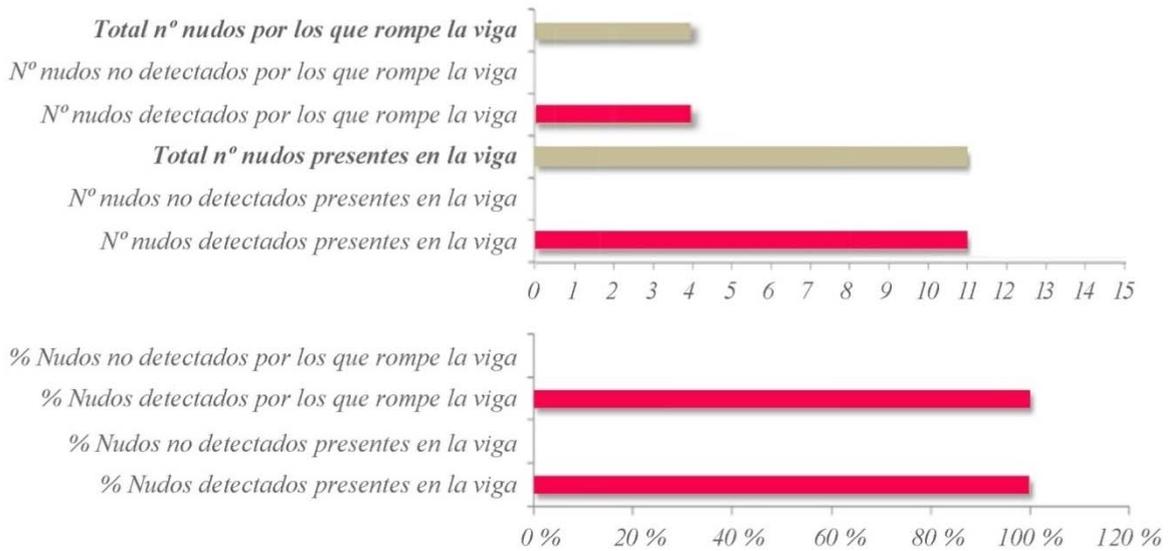


Gráfico 33. Identificación de nudos en la viga PS 2-27. Clasificación visual y estadísticas.

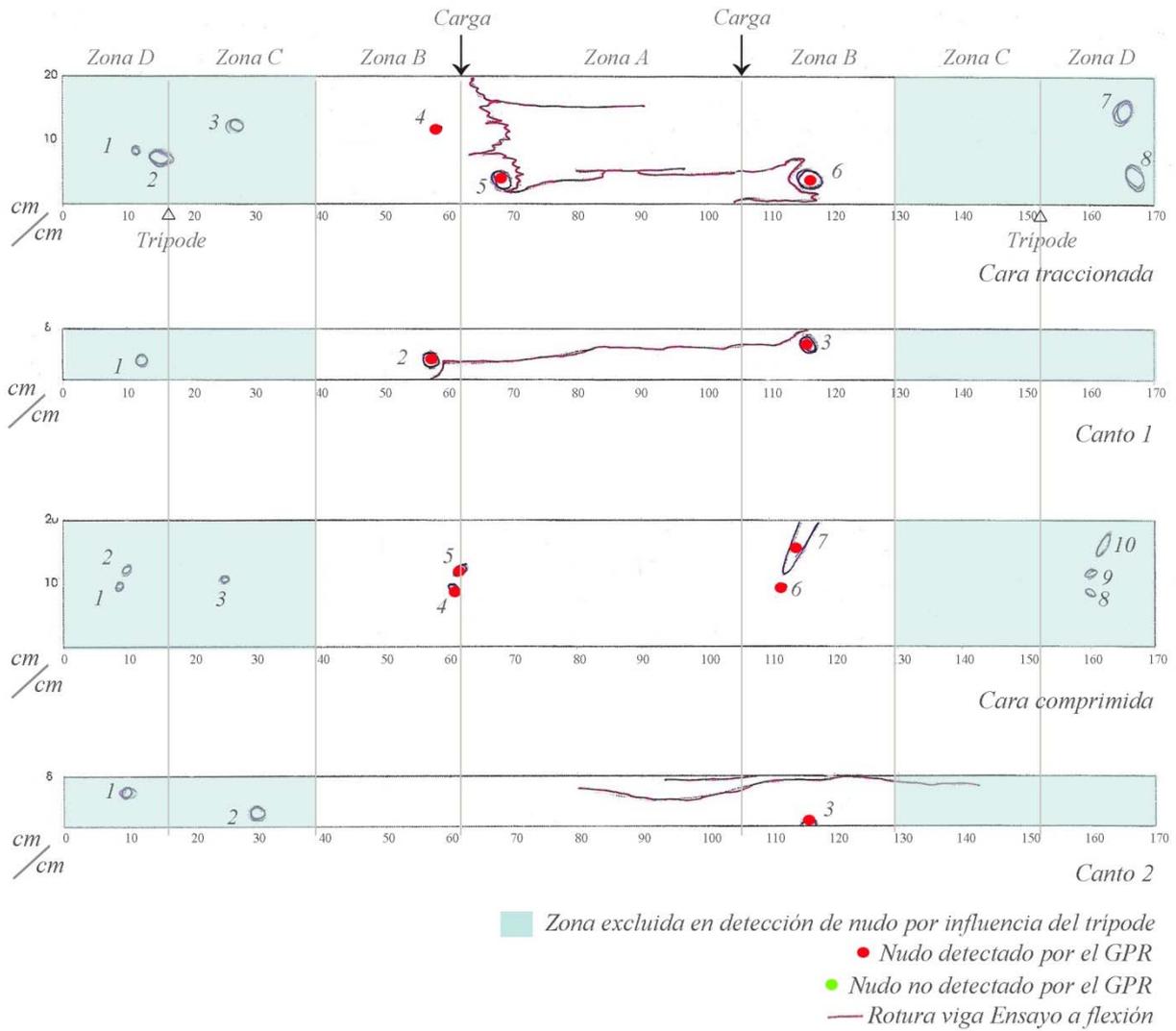
ps2-27				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.	2		1
3				no
4				sí
5				sí
				sí
Canto 1	1		6	no
				no
			1	no
			2	no
				sí
Cara Comp.	3			sí
	4			no
	5			no
			6	no
			7	no
Canto 2			1	no
	2			no
	3			no
	4			no
				no

Tabla 24. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-27.



Figura 96. Detalle de rotura de la viga PS2-27.

Identificación de nudos en la viga Ps2-28



153 ††

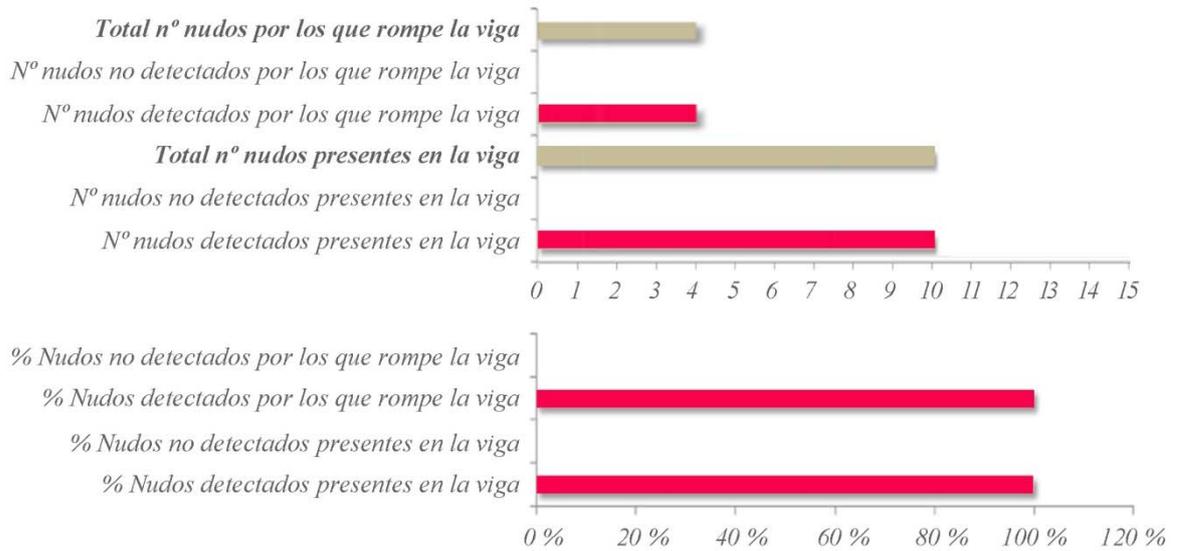


Gráfico 34. Identificación de nudos en la viga PS 2-28. Clasificación visual y estadísticas.

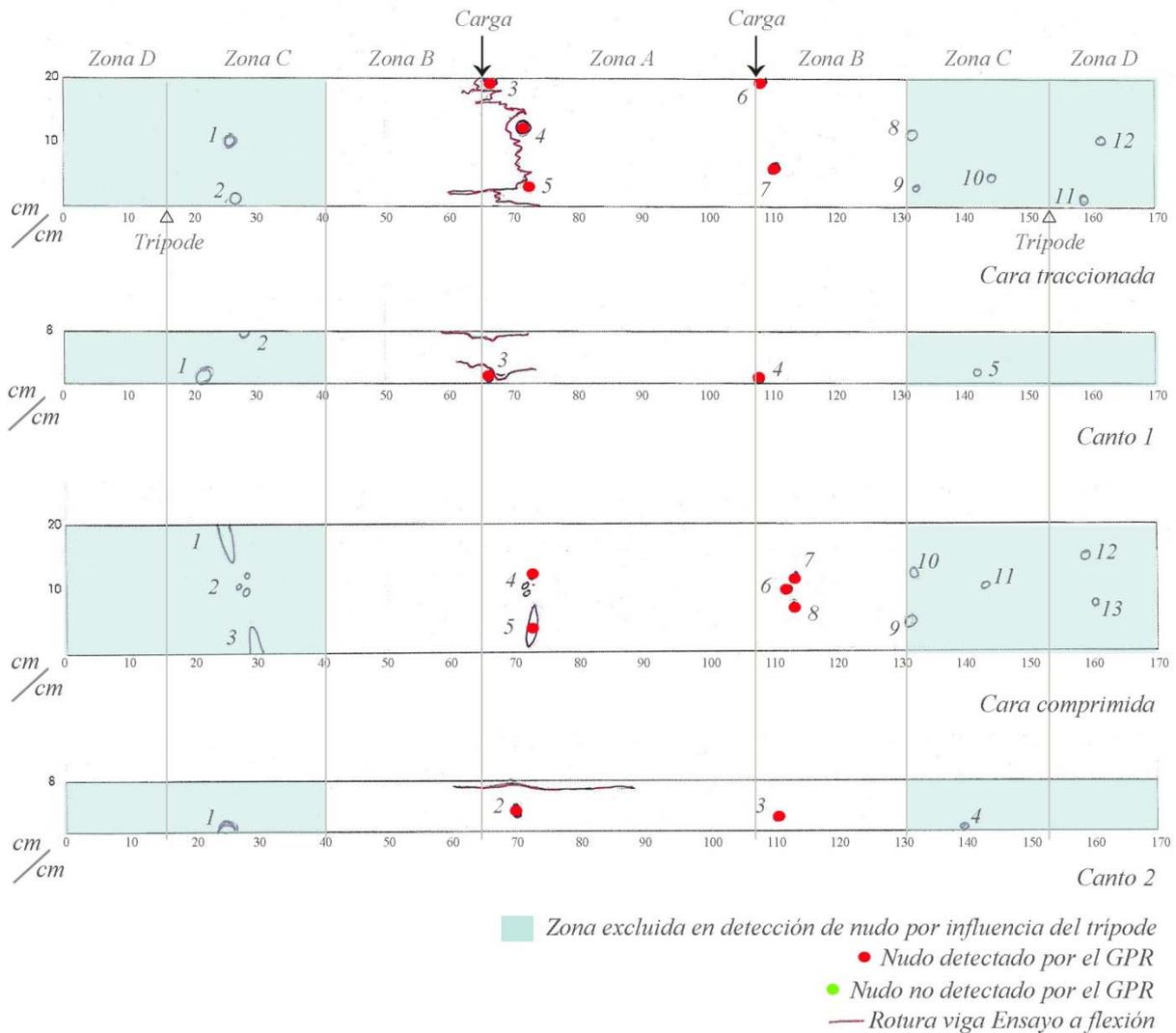
ps2-28				
Irregularidades ocultas detectadas			Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Detectado	No Detectado		
Cara Trac.			1	no
			2	no
			3	no
	4			no
	5			sí
	6			sí
			7	no
			8	no
Canto 1			1	no
	2			sí
	3			sí
Cara Comp.			1	no
			2	no
			3	no
	4			no
	5			no
	6			no
	7			no
			8	no
			9	no
			10	no
Canto 2			1	no
			2	no
	3			no

Tabla 25. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-28.



Figura 97. Detalle de rotura de la viga PS2-28.

Identificación de nudos en la viga Ps2-29



155 †

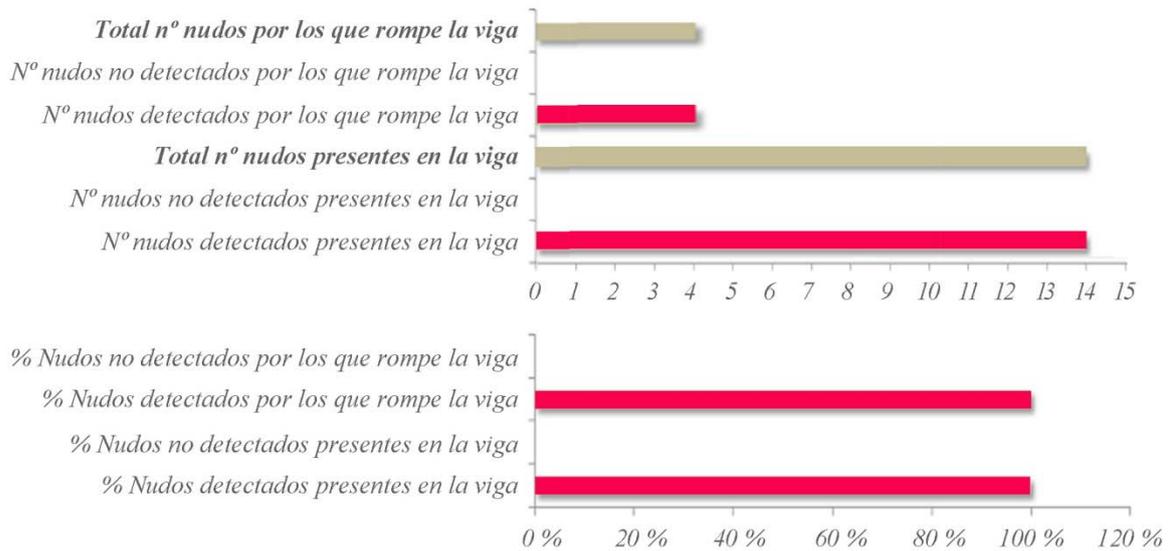


Gráfico 35. Identificación de nudos en la viga PS 2-29. Clasificación visual y estadísticas.

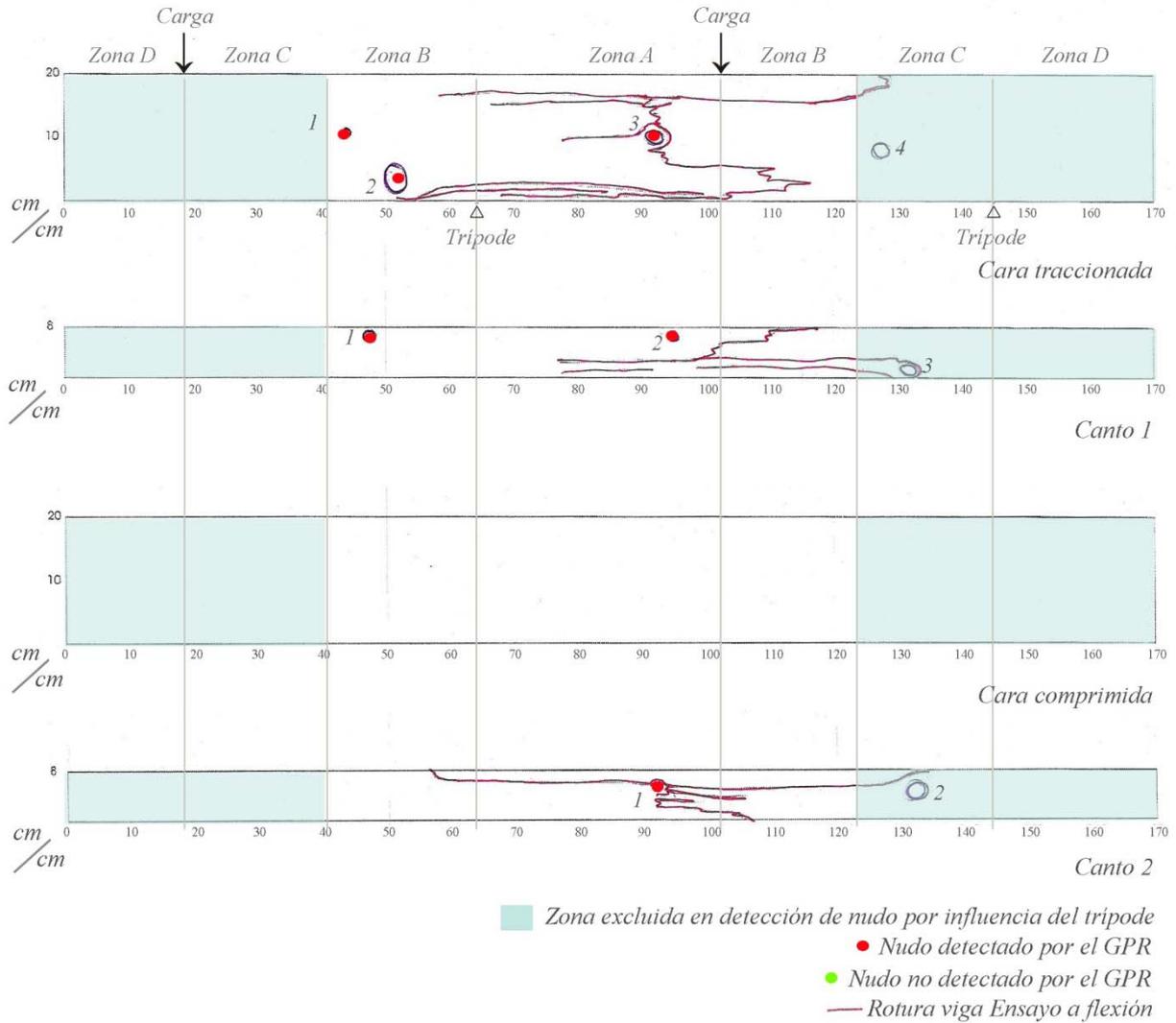
ps2-29				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.			1
			2	no
3				sí
4				sí
5				sí
6				no
7				no
			8	no
			9	no
			10	no
			11	no
			12	no
Canto 1			1	no
			2	no
	3			sí
	4			no
			5	no
Cara Comp.			1	no
			2	no
			3	no
	4			no
	5			no
	6			no
	7			no
	8			no
			9	no
			10	no
			11	no
			12	no
			13	no
Canto 2			1	no
	2			sí
	3			no
			4	no

Tabla 26. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-29.



Figura 98. Detalle de rotura de la viga PS2-29.

Identificación de nudos en la viga Ps2-32



157 ††

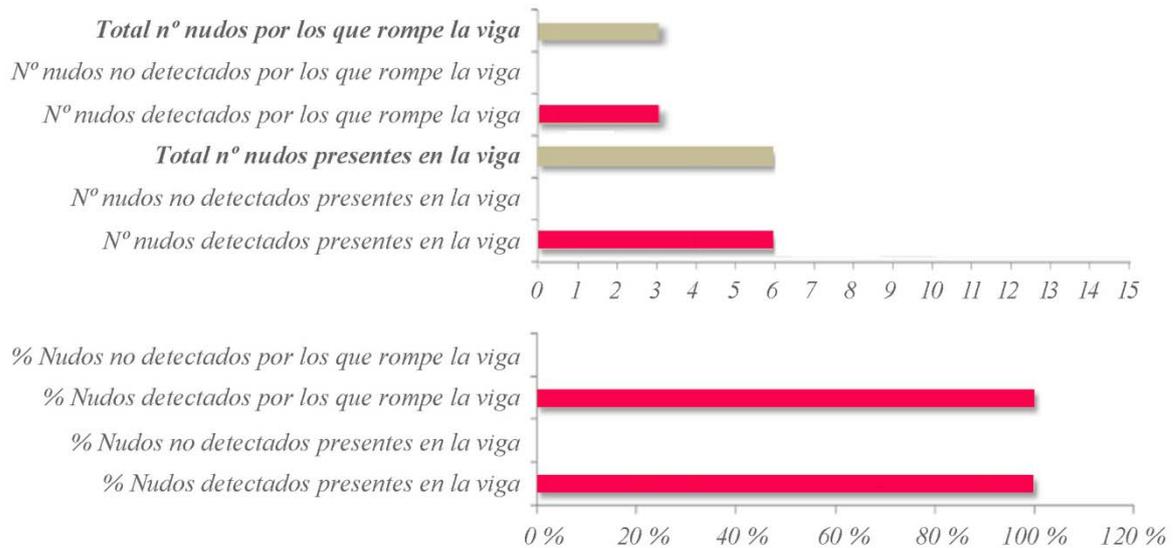


Gráfico 36. Identificación de nudos en la viga PS2-32. Clasificación visual y estadísticas. (Nótese la variación en la aplicación de las cargas)

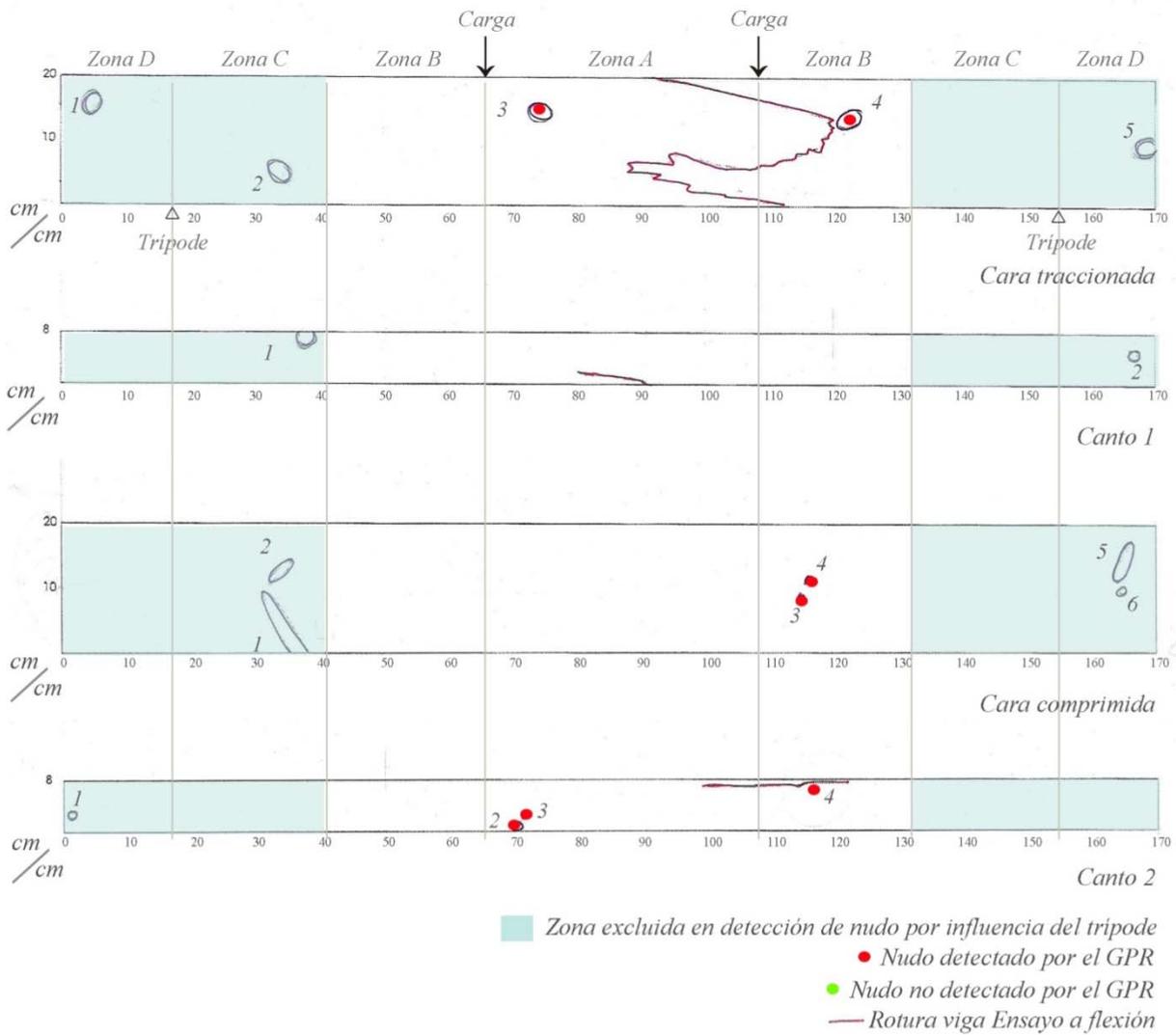
ps2-32				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.	1		
2				sí
3				sí
Canto 1			4	no
	1			no
	2			no
Cara Comp.			3	sí
Canto 2	1		2	sí
				sí

Tabla 27. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-32.



Figura 99. Detalle de rotura por nudo de canto la viga PS2-32.

Identificación de nudos en la viga Ps2-36



159 †

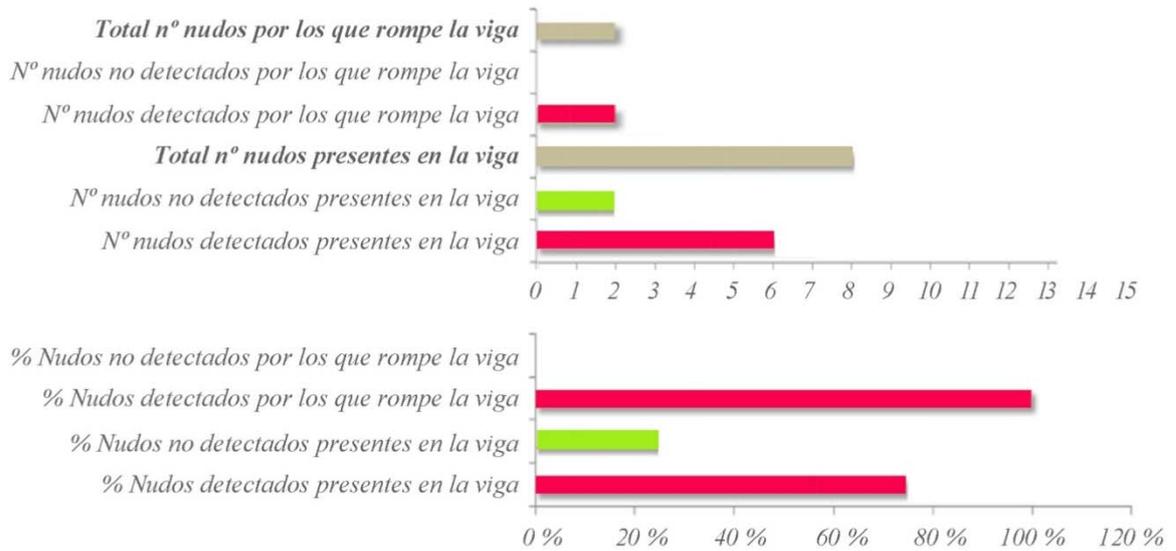


Gráfico 37. Identificación de nudos en la viga PS 2-36. Clasificación visual y estadísticas.

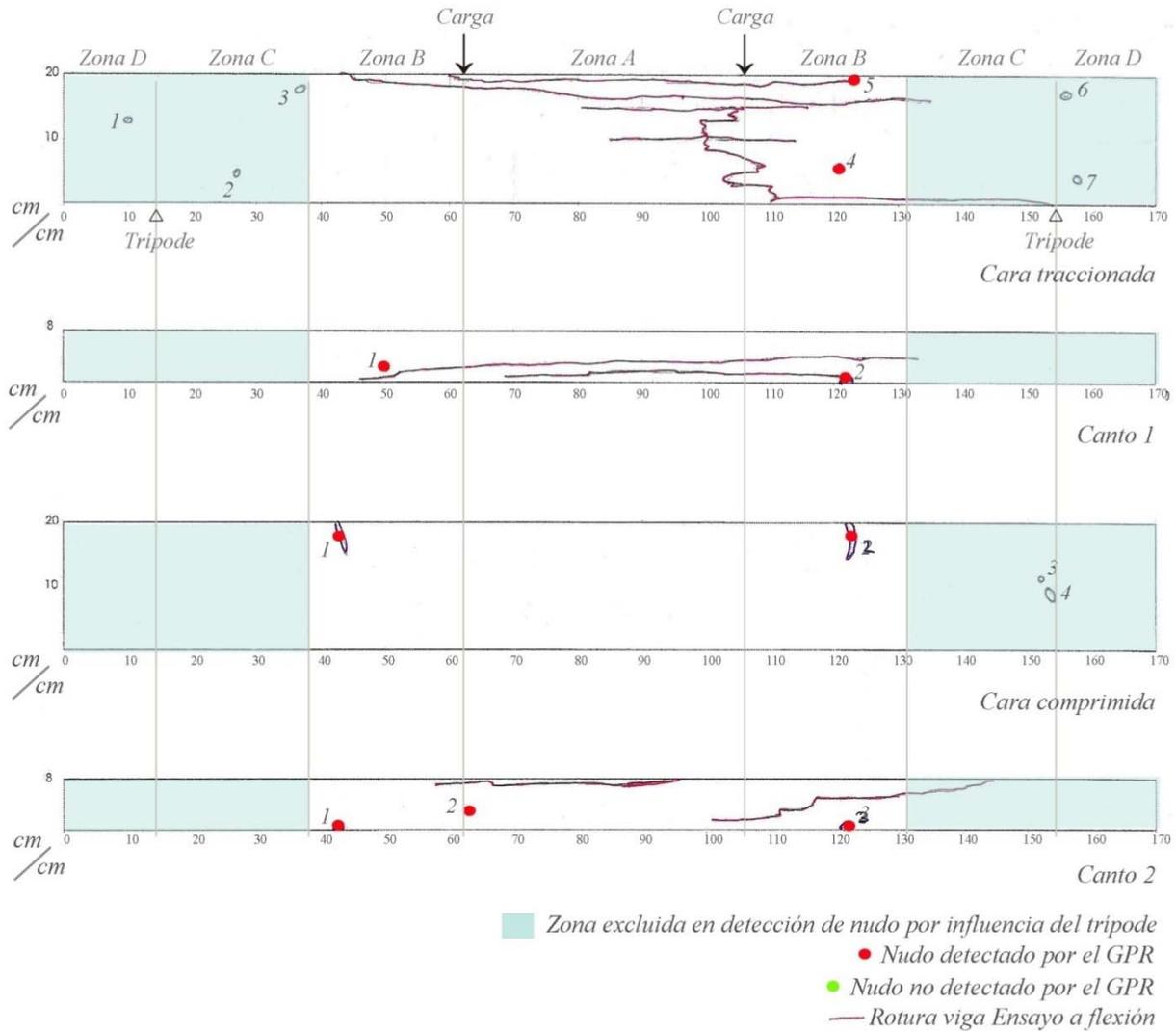
ps2-36				
	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
Cara Trac.	2		1	no
	3		2	no
	4		5	no
				sí
Canto 1			1	no
			2	no
Cara Comp.			1	no
			2	no
		3		no
		4		no
Canto 2			5	no
			6	no
	2		1	no
	3			no
		4	sí	

Tabla 28. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-36.



Figura 100. Detalle de rotura por nudo de la viga PS2-36.

Identificación de nudos en la viga Ps2-37



161 †

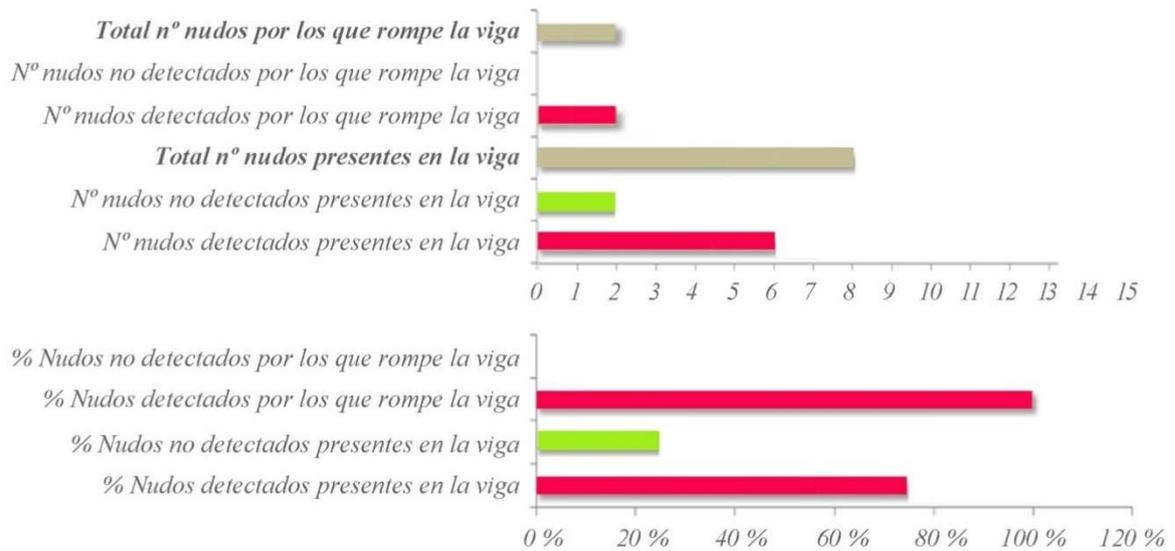


Gráfico 38. Identificación de nudos en la viga PS 2-37. Clasificación visual y estadísticas.

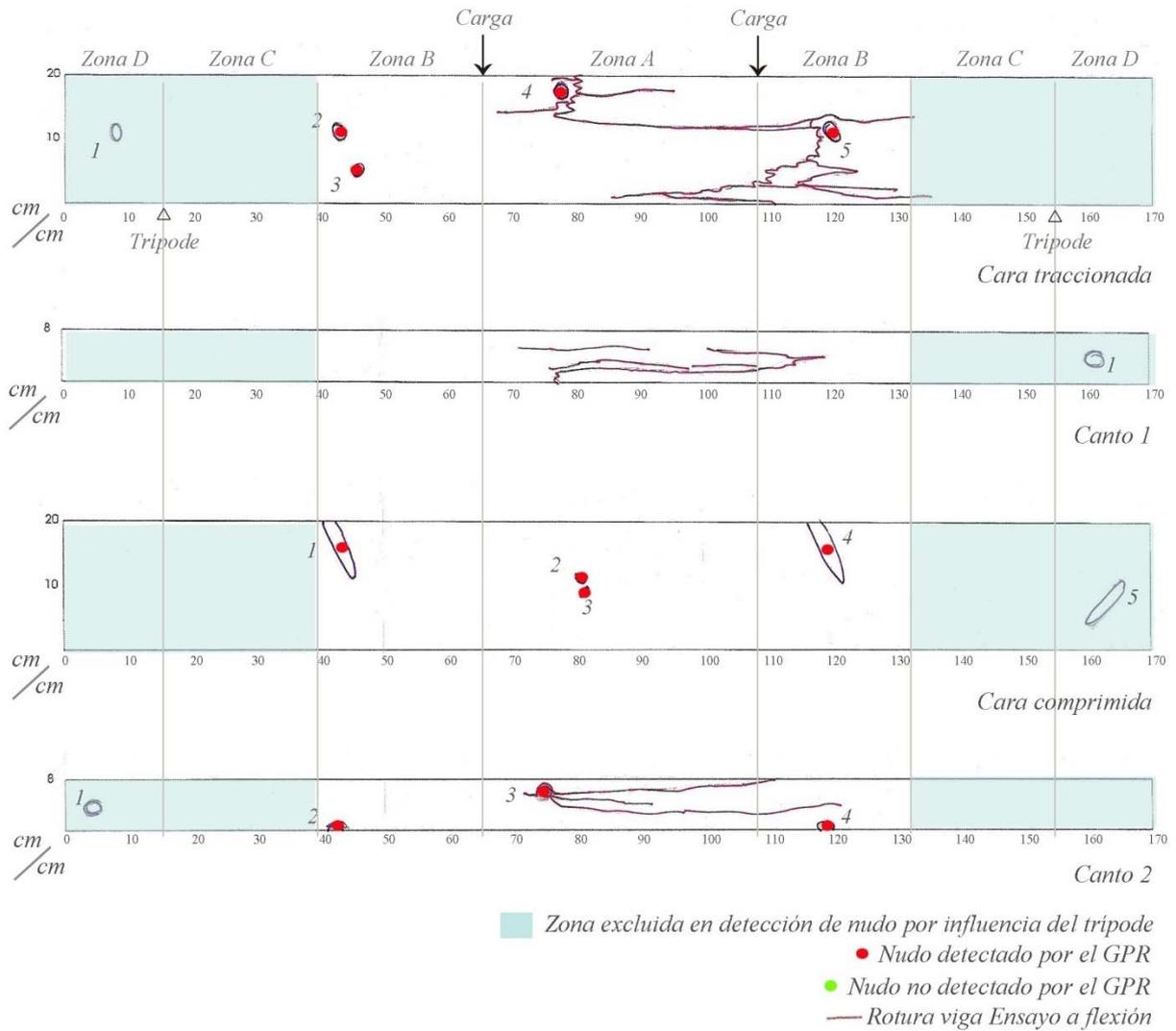
ps2-37				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.			1
			2	no
			3	no
4				no
5				sí
			6	no
			7	no
Canto 1		1		sí
	2			sí
Cara Comp.		1		no
	2			no
			3	no
			4	no
Canto 2		1		no
	2			no
	3			no

Tabla 29. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-37.



Figura 101. Detalle de rotura por nudo de canto de la viga PS2-37.

Identificación de nudos en la viga Ps2-38



163 †

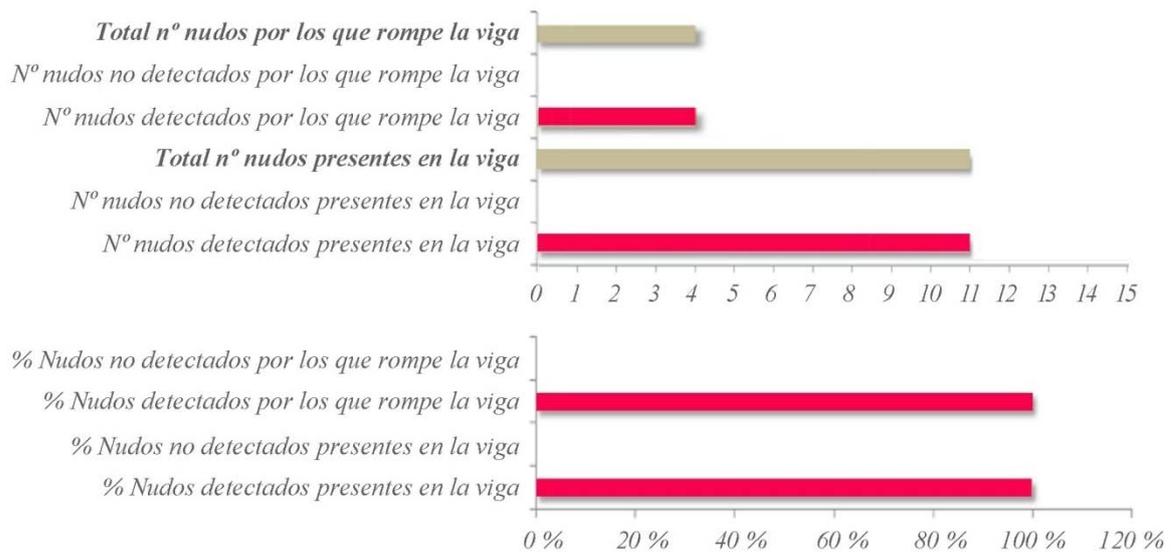


Gráfico 39. Identificación de nudos en la viga PS 2-38. Clasificación visual y estadísticas.

ps2-38				
Irregularidades ocultas detectadas	Detectado	No Detectado	Zona excluida en detección	Rompe por nudo
	Cara Trac.	2 3 4 5		1
Canto 1			1	no
Cara Comp.	1 2 3 4		5	no no no no
Canto 2	2 3 4		1	no no sí sí

Tabla 30. Tabla resumen de datos del georradar aplicado en la viga PS2-38.



Figura 102. Detalle de rotura por un nudo de la viga PS2-38.

5.4. Influencia del nudo en la resistencia mecánica de la madera estructural

La presencia de nudos, fendas, gemas y la desviación de las fibras son las principales particularidades que determinan la clase resistente en la clasificación visual de la madera. La presencia de nudos puede reducir la resistencia a flexión de una pieza de manera notable (Arriaga et al., 2007), alrededor de los cuales se produce una concentración de tensiones que lo convierte en puntos especialmente débiles donde se reduce la capacidad mecánica de la madera. Herrero (2003) indica que una pieza de madera con presencia de nudos puede llegar a poseer una resistencia a flexión diez veces menor que en una libre de nudos.

**La razón de resistencia teórica explica solo un bajo porcentaje la variación de la razón de resistencia real, encontrándose además que la razón de resistencia teórica sobreestima a la razón de resistencia real para defectos medianos a pequeños y la teórica subestima para defectos grandes. La razón de área nudosa de borde, resultó mejor predictor del módulo de ruptura en madera estructural que la razón de resistencia (Karsulovic y Cisternas, 1991)*

** La densidad básica y la razón de área nudosa son semejantes en cuanto a su capacidad para estimar el módulo de ruptura (MOR). La correlación estadística mejora, sensiblemente, si se mide el esfuerzo en la zona donde se ubica el mayor defecto (Davalos et al., 2009)*

Los nudos son la singularidad de la madera que posee un carácter más restrictivo y el efecto más significativo sobre la resistencia de la madera en la clasificación visual (Cown et al., 2004; Gaunt, 2004; Karsulovic y Cisternas, 1991; Lam et al., 2004; Lam et al., 2005; y Mackenzie et al., 2005). Debido a su influencia las normas de clasificación de madera de varios países se basan en la CV, y en concreto en el principio de la razón de área nudosa $RAN^{*,*}$ (grupo de nudos proyectada sobre la sección transversal de una pieza). Este concepto se fundamenta en las limitaciones a los tamaños de los nudos y la cantidad de los mismos. Según Casado et al. (2009) la norma infravalora la capacidad resistente de la madera de chopo (*Populus alba*), lo que da lugar a un rechazo del 50% (por presencia de nudos). Respecto de las coníferas, existen numerosos estudios que coinciden al afirmar que es un método excesivamente conservador, el cual infravalora y

desestima mucha madera (Carballo et al., 2007b; Rodríguez, 2009), sobre todo en MEG, cuya presencia de nudos provoca que sean rechazadas la mitad de las piezas (Arriaga et al., 2007; Herrero, 2003)

A pesar de que la presencia de nudos es determinante para su clasificación estructural, la CV no es 100% efectiva pues no puede identificar las irregularidades internas por las que posteriormente puede romper una viga aunque no haya presencia de nudos en la superficie. Cuando el acceso a la pieza no es total en toda su superficie, el GPR identifica defectos ocultos (fendas, bolsas de resina, acebolladuras y gemas) y permite completar la CV y mejorar así la clasificación estructural.

Conclusiones

APLICACIÓN DE RESULTADOS LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las principales conclusiones alcanzadas en la presente tesis doctoral son las siguientes:

- 1°. El tratamiento espectral de los pulsos o señales del georradar supone un avance innovador respecto a la interpretación de los datos de georradar en madera estructural. Hasta la fecha el estudio de la madera por medio del georradar se había analizado utilizando las imágenes de los radargramas, buscando en ellos identificar visualmente un defecto en la madera, dando lugar a resultados poco fiables. Sin embargo, el empleo de esta nueva metodología, mediante el estudio de los espectros y no visualmente los radargramas, ha permitido avanzar en el empleo del georradar, pues queda demostrado que es posible identificar singularidades de la madera como nudos o bolsas de resina, ya que se produce un cambio en la gráfica del espectro debido a que la onda atraviesa un medio con diferente humedad, direccionalidad de las fibras o densidad, correspondiente a un defecto en la madera.
- 2°. Esta nueva aplicación del análisis espectral permite ampliar los límites de detección de nudos e irregularidades en el interior de la madera estructural dado que posibilita

el estudio completo del elemento así como la identificación exacta de la sección de la pieza que contiene el defecto.

- 3°. Esta nueva aplicación del análisis espectral de registros con georradar confiere a este método geofísico de ensayo no destructivo en madera estructural una fiabilidad y precisión desconocida hasta el momento actual en la detección de defectos. Mediante el georradar es posible identificar la presencia de singularidades en la madera, en su interior o en la superficie de la misma, en caras vistas u ocultas. Lo cual permite considerar el georradar como una herramienta complementaria de la inspección visual a la hora de evaluar la madera estructural.

La presente tesis ha alcanzado un porcentaje de identificación de defectos en la madera de pino silvestre del 97,05%, habiendo sido corroborado con la inspección visual en las maderas ensayadas.

6.1. Aplicación de resultados

La detección de nudos mediante el georradar supone mejoras en la evaluación de la madera estructural tanto en el campo de la rehabilitación del patrimonio construido como en la clasificación de la madera nueva en aserradero.

Por un lado el georradar en rehabilitación permite la identificación, de una forma rápida y sencilla, de defectos ocultos, bien por no manifestarse en la superficie de la madera, bien por estar presentes en superficies de la pieza ocultas por otros elementos constructivos como artesonados, entrevigados o pavimentos.

Por otro lado en aserradero, permitiría en un futuro una mayor automatización de la clasificación visual en aserradero, lo que se traduce en una identificación de los defectos más inmediata y precisa, además de una optimización en la producción del aserradero. Asimismo sería posible identificar la presencia de defectos en la madera, en cuya superficie no se manifiestan, permitiendo evaluarse mejor su calidad estructural.

6.2. Líneas futuras de investigación

Las líneas futuras de investigación quedarían divididas en tres fases:

- 1º. Mejora del método de procesado.
- 2º. Aplicación del método.
- 3º. Informatización del método.

169 ††

El paso posterior a la presente tesis doctoral es la mejora del método, principalmente en dos aspectos:

- 1º. Intentar cuantificar la magnitud del defecto por el propio espectro.
- 2º. Intentar caracterizar el tipo de defecto por el propio espectro.

Una vez mejorado el método, sería conveniente estudiarlo aplicado a maderas frondosas empleadas en construcción, como el chopo, el castaño o el eucalipto, así como en otras especies de coníferas empleadas habitualmente en la construcción.

El diseño de un dispositivo de medición continua con georradar en todas las caras posibles de la madera con varias antenas al mismo tiempo. en condiciones de laboratorio.

Por último, una vez analizados varios tipos de madera y creado un banco de datos del método, para agilizar el tiempo de análisis de la madera con el georradar, sería conveniente el desarrollo de un *software* que ayudase a identificar y analizar los espectros automáticamente.

Bibliografía

DE LA TESIS

Acuña, L., Llorente, A., Casado, M. y Herrera, C. (2001). Clasificación de la madera de *Pinus Sylvestris* L. mediante ensayos no destructivos. *Actas del III Congreso Forestal Español*, Granada, España. Recuperado de: <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/.../6336>

Acuña, L., Llorente, A. y Casado, M. (2005). Estudio comparativo entre normas de ensayo para madera de *Pinus sylvestris* L. en uso resistente. *IV Congreso Forestal Español*. Recuperado de: <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/issue/view/187>

171 ††

Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Acuña, L., Basterra, A., Casado, M., López, G., Ramón-Cueto, G., Relea, E., Martínez, C. y González, A. (2011). Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. *Materiales de Construcción*, 61, 303, 451–464. ISSN: 0465-2746. DOI: 10.3989/mc.2010.57610

Acuña, L., Díez, R., Casado, M., Llorente, A., Lázaro, M^a T., Basterra, A., Relea, E. y Cueto, G. (s.f.). Clasificación de madera estructural de *p. pinaster ait.* mediante ultrasonidos.

Aguilera, C., Ramos, M. y Salinas, D. (2002). Visualización interna de nudos en rollizos de madera de *Pinus radiata* d. Don utilizando rayos-x. *Maderas: Ciencia y tecnología*, 4, 2, 193-200.

Álvarez, L., Basterra, A., Casado, M. y Acuña, L. (2005). Aplicación del resistógrafo a diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. *Actas del I Jornadas de Investigación en Construcción*, Madrid, España. Recuperado de:

<http://www3.uva.es/maderas/Files/2005%20TORROJA%20resis.pdf>

Arriaga, F. (1995). Eficacia estructural y energética de la madera como material de construcción. *Revista AITIM*, 179.

Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M. y Bobadilla, I.. (2007). Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la Construcción*, 59, 506, 29-41

Arriaga, F., García, L., Gebremedhin, K.G. y Peraza, F. (s.f.). Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera. *Infomadera*. Recuperado de: http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_1707_17524.pdf

Basterra, L.A., Ramón-Cueto, G.; Barranco, I.; López, G.; Acuña, L. y Casado, M. (2005). Avance de propuesta metodológica para el diagnóstico y análisis de estructuras de madera históricas. *Actas del IVº Congreso Nacional de historia de la construcción*. Santiago Huerta (Ed.), 121-131. Madrid.

Berglund, A., Broman, O., Grönlund, A. y Fredriksson, M. (2013). Improved log rotation using information from a computed tomography scanner. *Computer and Electronics in Agriculture*, 90,152–158

Bertolini, C., Brunetti, M., Cavallero, P. y Macchioni, N.(1998). A Non Destructive Diagnostic Method on Ancient Timber Structures Some Practical Application Examples. *WCTE '98 - 5th World Conference on Timber Engineering*, 1, 17-20, Montreaux, Switzerland.

Bridges, J.K.(s.f.). Historia de las Comunicaciones Transportes Terrestres Capítulo "Puentes en la Antigüedad" Recuperado de: <http://www.portalplanetasedna.com.ar/puentes.htm>.

Bobadilla, I., Esteban, M., Íñiguez, G., Arriaga, F., Ballarín, D. y Palacios, J. (2007). Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la Construcción*, 59, 506, 107–116. ISSN: 0020-0883

Borrás, X. (2010). Breve historia de la madera como material de construcción (2015). *Interempresas*. Recuperado de: <http://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>

Bucur, V. (2003). Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. *Springer Series in Wood Science*. Springer-Verlag, Berlin. Recuperado de: <http://forestry.oxfordjournals.org/content/78/3/314.full>

Bucur, V. (2006). Acoustics of wood. Segunda Edición. *Heidelberg: Springer Verlag*, 455

Canas, J. A.; García, F., Clapes, J., Osorio, R.; Pérez, M.V., Pujades, L, Caselles, J.O. y Ugalde, A. (1996). *Aplicaciones del geo-radar para la determinación del volumen de hormigón necesario para la reparación del revestimiento de la bóveda y hastiales de un túnel*. *Journal of applied geophysics* Vol. 20, 4, 974-977. Recuperado de: <http://futur.upc.edu/publicaciones/o/YWN0aXZpdGF0X2VzX2ludmVzdGlnYWRvcnMgZGVzYWw==/ad/MTk5Ng==/ai/UHVqYWRlcyBCZW5laXQsIExlXmMgR29uemFnYQ==>

Capuz, R. (2003). Métodos de ensayo no destructivo para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Carballo, J., Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Cabrero, J.C. (2007). Evaluación de técnicas vibratorias en la clasificación de la madera aserrada destinada a fines estructurales. *Actas del Congreso Español de Ensayos No Destructivos*, 11, 305-316.

Carballo, J, Hermoso, E. y Fernández-Golfín, J. (2009). Comparación de la evaluación y clasificación mecánica del *Pinus pinaster* Ait. Con dos equipos de ultrasonidos. *5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer*. Ávila, España.

Carrasón, A. (s.f.). Nuevas aportaciones sobre la pintura del alfarje mudéjar del Monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos). Recuperado de: http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/dms/mecd/cultura-mecd/areas-cultura/patrimonio/mc/patrimonioculturale/n-1/capitulos/22_PCE1_Pintura_Alfarje_Silos.pdf

Casado, M., Escudero, I., Acuña, L., Vecilla, D., Bastrerra, A., Ramón-Cueto, G., López, G. y Relea, E. (2009). Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de *Populus x euramericana*. *5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer*. Ávila, España. ISBN: 978-84-936854-6-1

Casado, M.(2009). Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de *populus x euramericana*. *5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer*, Ávila, España.

Chang S.J. y Gazo R. (2009). Measuring the effect of internal log defect scanning on the value of lumber produced. *Forest Products Journal*, 59, 56–59

Colorado, A. (s.f.). Edificar en Madera. Entre prejuicios y temores. Un recurso subvalorado. *El Mueble y la Madera*. Recuperado de: <http://www.revista-mm.com/ediciones/rev30/edi.htm>

175 ††

Conde García, M., Fernández-Golfín Seco J. I. y Hermoso Prieto, E. (2007). Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción*, 57, 288, 49–59. ISSN: 0465-2746

Cown, D. J., Ball, R. D. y Riddell, M. J. (2004). Wood density and microfibril angle in 10 *Pinus radiata* clones: distribution and influence on product performance. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 34, 3, 293–315

C. i R. d'Arqueologia (2014). El pilar de madera de L'Assut. Conservación y restauración de una viga de madera arqueológica de origen terrestre. *UNICUM - Revista de l'Escola Superior de Conservació i Restauració de Béns Culturals de Catalunya*. Recuperado de:

http://unicum.cat/2014/01/el-pilar-de-fusta-de-1%E2%80%99assut-conservacio-i-restauracio-d%E2%80%99una-biga-de-fusta-arqueologica-d%E2%80%99origen-terrestre/?tmp_lang=es

CSCAE- Consejo Superior de Colegios de Arquitectos de España (2011). Estructuras de madera, madera aserrada y madera laminada encolada. Recuperado de: http://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/actividades/act_paginas/libro2011/Estructuras_madera_aserrada_%20laminada.pdf

Dávalos, R. y Limón, R. (2009). Efecto de los nudos sobre la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino. *Ciencia Forestal en México*, 34, 106. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-35862009000200011&script=sci_arttext

EdCA- Editorial de Construcción Arquitectónica (2008). El hábitat del pueblo musulmán. Departamento de Construcción Arquitectónica, Escuela de Arquitectura, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Colección 173. Marzo 2008. URL: http://editorial.cda.ulpgc.es/estructuras/construccion/1_historia/17_islamica/c173.htm.

Ecohabitar (2013). Primer edificio de 6 plantas de madera en España. Ecohabitar. Recuperado de: <http://www.ecohabitar.org/primer-edificio-de-6-plantas-de-madera-en-espana/>

Esteban, M. (2003). . *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Fernández-Golfín J.I., Díez, M.R. y Gutiérrez, A. (1998). Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. *Materiales de construcción*, 48, 252 Recuperado de:
<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/463/511>

Fernández-Golfín J.I., Díez, R. y Hermoso, E. (2001). Análisis del estado del arte de la técnica de la clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. *Investigación agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 10, 1, 5-19. Recuperado de:
<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=165093>

Franco, J.T. (2013). Propuesta de rascacielos de madera es una alternativa sostenible a los edificios de acero y hormigón. *Plataforma arquitectura*. Recuperado de:
<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-244335/propuesta-de-rascacielos-de-madera-es-una-alternativa-sostenible-a-los-edificios-de-acero-y-hormigon>.

García, L. (2002). La madera y su tecnología. *Mundi-prensa libros*. ISBN 9788484760368

García, L. (s.f.) Historia de la Tecnología de la Madera. *Boletín de información técnica*, 198 Recuperado de:
http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_3559_11791.pdf

Gamaliel, L., Basterra, A., Ramón-Cueto, G. y de Diego, A. (2014). Detection of Singularities and Subsurface Defects in Wood by Infrared Thermography. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 8,4, 517–536, DOI: 10.1080/15583058.2012.702369. Recuperado de:
<http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2012.702369>

Gaunt, D. (2004). Upcoming changes to structural timber. *New Zealand Timber Design Journal*, 1, 13, 19–25

Gracia, V.P., Canas, J.A., Pujades, L.G., Clapés, J., Caselles, O., García, F., y Osorio, R. (2000). GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 43, Issue 2, 167–174. DOI: 10.1016/S0926-9851(99)00056-7

Guardiola, A. y Basset, L. (s.f.). Evolución Histórica del SOPORTE como Elemento Estructural Fundamental en Arquitectura. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12872/soportes.pdf?sequence=5>

Gülzow, A., Steiger, R., Gsell, D., Wilson, W., y Feltrin, G. (2007). Dynamic field performance of a wooden trough bridge. *Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07)*, 181–188. Porto, Portugal

Hermoso, E. (2001). Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Hodges D.G., Anderson, W.C. y McMillin C.W. (1990). The economic potential of CT scanners for hardwood sawmills. *Forest Products Journal* 40(3) 65-69.

Íñiguez, F (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de madera aserrada de conífera de gran escuadría para uso estructural (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Íñiguez, G., Arriaga, F., Esteban, M. y Argüelles, R. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*, 59, 506, 97–105. ISSN: 0020-0883

Jayne, B. A. (1959). Vibrational Properties of Wood as índices of quality. *Forest Product Journal*, 9, 11, 413–416

Karsulovic, C., J. T. y Cisternas, A. G. (1991). Predicción del módulo de ruptura en madera estructural de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) mediante razones de resistencia y de área nudosa. *Revista de Ciencias Forestales*, 7, 1–2, 47–57

Lam, F., Barrett, J. D. y Nakajima, J. D. (2004). Influence of knot area ratio based grading rules on the engineering properties of Hem–fir used in Japanese post and beam housing. *Wood Science and Technology*, 38, 2, 83–92

179 ††

Lam, F., Barrett, J. D. y Nakajima, J. D. (2005). Influence of knot area ratio on the bending strength of Canadian Douglas fir timber used in Japanese post and beam housing. *Journal of Wood Science*, 51, 1, 18–25

Laudon N., Baumgartner R., Brüchert F. y Sauter U.H. (2012). Automatic Detection of Fungal Wood Decay in high-speed Computed Tomography Images. *Actas del 2012 IUFRO Conference All-Division 5 Forest Products*, 88.

Lundahl C.G. y Grönlund A. (2010). Increased yield in sawmills by applying alternate rotation and lateral positioning. *Forest Products Journal*, 60, 331–338

Mackenzie, R. K. T., Smith, R. S. y Fairfield, C.A. (2005). New directions for NDT in forestry. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 47, 7, 416–420

Manzaneque, J. A. (s.f.) Vocabulario de arte por temas. El arte Griego. Historia del arte. educalab.es. Ministerio de Educación, ciencia y deporte. Recuperado de: http://almez.pntic.mec.es/~jmac0005/Bach_Arte/Teoria/Html/vocabulario3b.htm

Montero, M.J. (2013). Clasificación de madera estructural de gran escuadría de *Pinus sylvestris* L. mediante métodos no destructivos (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Pedrotti, P., Paganini, F. y Del Senno, M. (2000). Longitudinal boring of beams. *Xylon International*, 72–75

Pellerin, R.F. y Ross, R.J. (2002). Nondestructive evaluation of wood. 210 p. *Forest Products Society*. Madison, WI, USA.

Promateriales (s.f.) Madera Laminada de Uso Estructural. Promateriales. Disponible en <http://www.promateriales.com/pdf/pm2503.pdf>

Ramírez, M., García, F., Rodríguez, I., Martínez, R. y Benlloch, J. (2008). Ground-penetrating radar survey for subfloor mapping and analysis of structural damage in the Sagrado Corazón de Jesús Church, Spain. *Archaeological Prospection*, 15, 4, 285–292

Rodríguez, I. (2009). *Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis de la madera* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Rodríguez, I., Martínez, R., Capuz, R., Díez, R. y García, F. (2011). Estudio de la variación del contenido de humedad en el *Pinus pinaster* Ait por medio de la técnica no destructiva del georradar. *Materiales de Construcción*, 61, 301. ISSN 0465-2746. Recuperado de: <http://oa.upm.es/11391/>

Rodríguez-Abad, I., Martínez-Sala, R., Capuz Lladro, R., Diez Barra, R. y García García F. (2011). Estudio de la variación del contenido de humedad en el *Pinus pinaster* Ait por medio de la técnica no destructiva del georradar. *Materiales de Construcción*, 61, 301, 143–156, ISSN: 0465-2746, eISSN: 1988-3226. DOI: 10.3989/mc.2010.49608

Stängle S. M., Brüchert F., Heikkilä A., Usenius T., Usenius A. y Sauter U. H. (2015). Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection. *Annals of Forest Science*, 72, 57–65

Simancas, K. (2003). Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo (Tesis doctoral) Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Recuperado de: <http://www.tdr.cesca.es/handle/10803/6113> http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6113/04PARTE2_3.pdf;jsessionid=62C7AFFD249CEC809298BB83BD952348.tdx1?sequence=6

Vega, A. (2013). Caracterización mecánica de la madera de *Castanea sativa* Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.

Wessels, C.B., Malan, F.S y Rypstra, T. (2011). A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber. *European Journal of Forest Research*, 130, 6, 881–893. DOI 10.1007/s10342-011-0484-6

Bibliografía

DE LAS TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS

Tablas

Tabla 1. Tabla 3 de la Norma UNE 56544:2011- Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ cm. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. AENOR.

Tablas de la 2 a la 30. Elaboración propia.

183 ††

Figuras

Figura 1. Buigues, M. (s.f.) Artesonado de madera de la Sala del Consulado del Mar [html] La Lonja de los Mercaderes.- Lonja de Valencia. Recuperado de: <http://www.jdiezarnal.com/valencialalonja.html>.

Figura 2. Rogers, R y Balaguer, A. (s.f.). Bodegas Protos [fotografía]. Recuperado de “Bodegas Protos, Richard Rogers + Alonso y Balaguer”, Plataforma Arquitectura. 25 Abril de 2014. Disponible en <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-355780/bodegas-protos-richard-rogers-alonso-y-balaguer/535af423c07a8072f200001f>

Figura 3. UNESCO (2009). [fotografía] Palafitos del entorno de los Alpes (Suiza, Alemania, Austria, Eslovenia, Francia e Italia). UNESCO. Disponible en

<http://www.unesco.org/new/es/media-services/multimedia/photos/whc-2011/multi-site/>

Figura 4. Gusinde, M. (1920) [fotografía] La Gran choza del Klóketen Pampa argentina. "Die Feuerland Indianer" http://ethnohistoria.naya.org.ar/htm/imagenes_selknam.htm

Figura 5. Simancas, K. (2003). Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo (Tesis doctoral) Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Recuperado de: <http://www.tdr.cesca.es/handle/10803/6113>
http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6113/04PARTE2_3.pdf;jsessionid=62C7AFFD249CEC809298BB83BD952348.tdx1?sequence=6

Figura 6. Quintanals, C. (2013) "Korowai" Tectónica Blog. 22 de septiembre de 2013. Disponible en <http://tectonicablog.com/?p=1578>

Figura 7. Docavo , N (2011). [fotografía] Choza bakka. Disponible en <http://500generaciones.wordpress.com/>

Figura 8. C. i R. d'Arqueologia (2014). El pilar de madera de L'Assut. Conservación y restauración de una viga de madera arqueológica de origen terrestre [fotografía]. Autores: Delia Eguiluz, Sandra Caballero y Ruth Sadurní. UNICUM - Revista de l'Escola Superior de Conservació i Restauració de Béns Culturals de Catalunya, 31 January, 2014. Recuperado de: http://unicum.cat/2014/01/el-pilar-de-fusta-de-l%E2%80%99assut-conservacio-i-restauracio-d%E2%80%99una-biga-de-fusta-arqueologica-d%E2%80%99origen-terrestre/?tmp_lang=es

Figura 9. Collis, Helen (2013). [fotografía] The biggest building in the world that's made entirely from wood (even down to the nuts and bolts!) HotSpot Media. Disponible en : <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2360473/Kizhi-Pogost-The-biggest-building-world-thats-entirely-wood.html>

Figura 10. Corrales, I. (2011). Cuacos de Yuste. Arquitectura popular., Arquitectura tradicional en la Vera de Extremadura. [html] Veraverata, 23 de octubre de 2011. Recuperado de: http://veraverata.blogspot.com.es/2011_10_23_archive.html

Figura 11. Sarralde, J.L. (2014). [fotografía] Programación de conciertos de las Noches Mágicas 2014 en la Casa Batlló. 25 Junio 2014. Disponible en : <http://guias-viajar.com/espana/barcelona-programa-conciertos-noches-magicas-casa-batllo/>

Figura 12. EcoHabitar (2012). La vivienda de madera más antigua de Europa. [html] EcoHabitar, publicado el 25 enero, 2012. Disponible en : <http://www.ecohabitar.org/la-vivienda-de-madera-mas-antigua-de-europa>

Figura 13. ArQuitexs (2010). Catedral del cristo de la luz. [html]Magazine Arquitectura & Diseño Contemporáneo, 28 septiembre, 2010. Recuperado de: <http://www.arquitexs.com/2010/09/catedral-del-cristo-de-la-luz-el-diseno.html>

Figura 14. Proyectos OTMO (s.f.). Madera laminada de uso estructural, Grupo Holtza. [html] Promateriales. Recuperado de: <http://www.promateriales.com/pdf/pm2503.pdf>

Figura 15. Carrassón, A. (2009). Nuevas aportaciones sobre la pintura del alfarje mudéjar del Monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos) ISSN 1889-3104. - N. 1 (2009), p. 291-301

Figura 16. EcoHabitar (2014) La escuela de madera más grande de España. [html] EcoHabitar, publicado el 20 marzo, 2014. Disponible en : <http://www.ecohabitar.org/la-escuela-de-madera-mas-grande-de-espana/>

Figura 17. Franck. Ostfildern, D. (s.f.). Muros en flujo. [html] Exclama Recuperado de: <http://www.revistaexclama.com/arquitectura/muros-en-flujo/>

Figura 18. Díaz, J. (2014). Vila-seca tendrá la escuela de madera más grande de España. [html] Diari de Tarragona, 5 de Marzo de 2014. Recuperado de: <http://www.diaridetarragona.com/noticia.php?id=19847>

Figura 19. Quintanals, C. (2013) “Korowai” Tectónica Blog. 22 de septiembre de 2013. Disponible en <http://tectonicablog.com/?p=1578>

Figura 20. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figuras 21. Lonja de Valencia. Autor: Javier Benlloch Marco.

Figura 22. Ídem.

Figura 23. Casado, M.(2009). Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de *populus x euramericana*. 5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer, Ávila, España.

Figura 24. UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. AENOR.

Figura 25 Esteban, M. (2003). . *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Figura 26. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figura 27. Montón, J.(2012). Clasificación estructural de la madera de pinus radiata d. Don procedente de Catalunya mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural (Tesis doctoral). Universidad Poliècnica de Catalunya.

Figura 28. Montón, J. (2012). Clasificación estructural de la madera de pinus radiata d. Don procedente de Catalunya mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural (Tesis doctoral). Universidad Poliècnica de Catalunya.

Figura 29. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figura 30. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figura 31. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figura 32. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figuras 33. Montero, M.J. (2013). Clasificación de madera estructural de gran escuadría de *Pinus sylvestris* L. mediante métodos no destructivos (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Figura 34. Ídem.

Figura 35. Ídem.

Figura 36. Tratecval (2015). Inspecciones. Disponible en : http://www.tratecval.com/servicios_termograficas.htm

Figura 37. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figura 38. Acuña, L. (2007). La madera como material. Conceptos básicos. Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera. *Máster Universitario en Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido*. Universidad el País Vasco.

Figura 39. Aguilera, C., Ramos, M. y Salinas, D. (2002). Visualización interna de nudos en rollizos de madera de *Pinus radiata* L. utilizando rayos-x. *Maderas: Ciencia y tecnología*, 4, 2, 193-200.

Figura 40. Aguilera, C., Ramos, M. y Salinas, D. (2002). Visualización interna de nudos en rollizos de madera de *Pinus radiata* L. utilizando rayos-x. *Maderas: Ciencia y tecnología*, 4, 2, 193-200.

Figuras 41 y 42. Elaboración propia.

Figura 43. Buigues, M. (s.f.) Artesonado de madera de la Sala del Consulado del Mar [html] La Lonja de los Mercaderes.- Lonja de Valencia. Recuperado de: <http://www.jdiezarnal.com/valencialalonja.html>.

Figuras de la 44 a la 102. Elaboración propia.

Gráficos del 1 al 39. Elaboración propia.

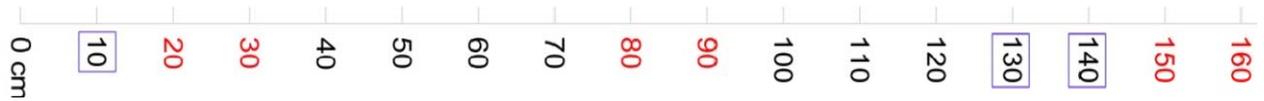
A.1

Anexo 1

DATOS EN BRUTO DEL PLAN EXPERIEMETAL
ANÁLISIS DEL ESPECTRO Y DEL RADARGRAMA

A.1.1. Análisis de las vigas del grupo PS1

PS1-1



Cara tracción



Canto 1



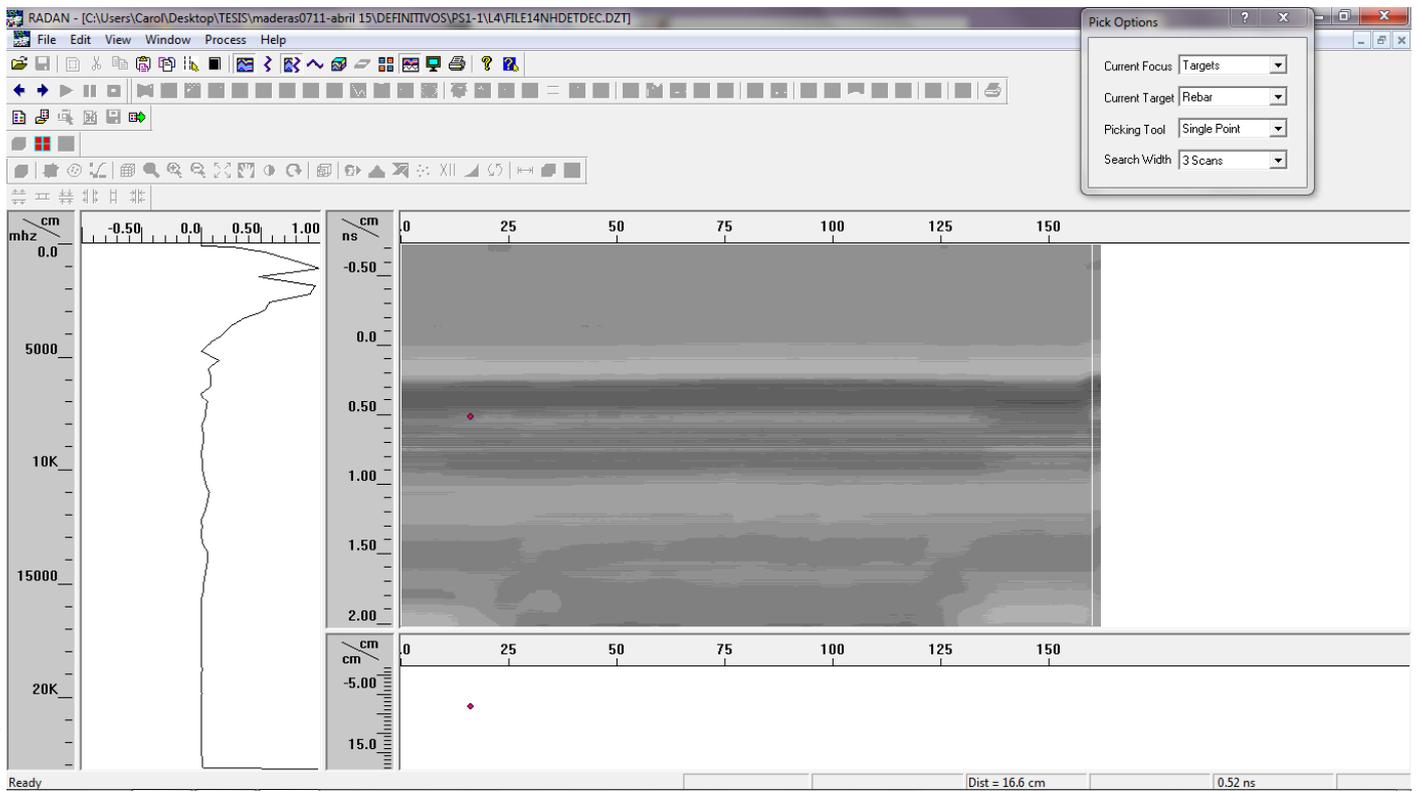
Cara compresión



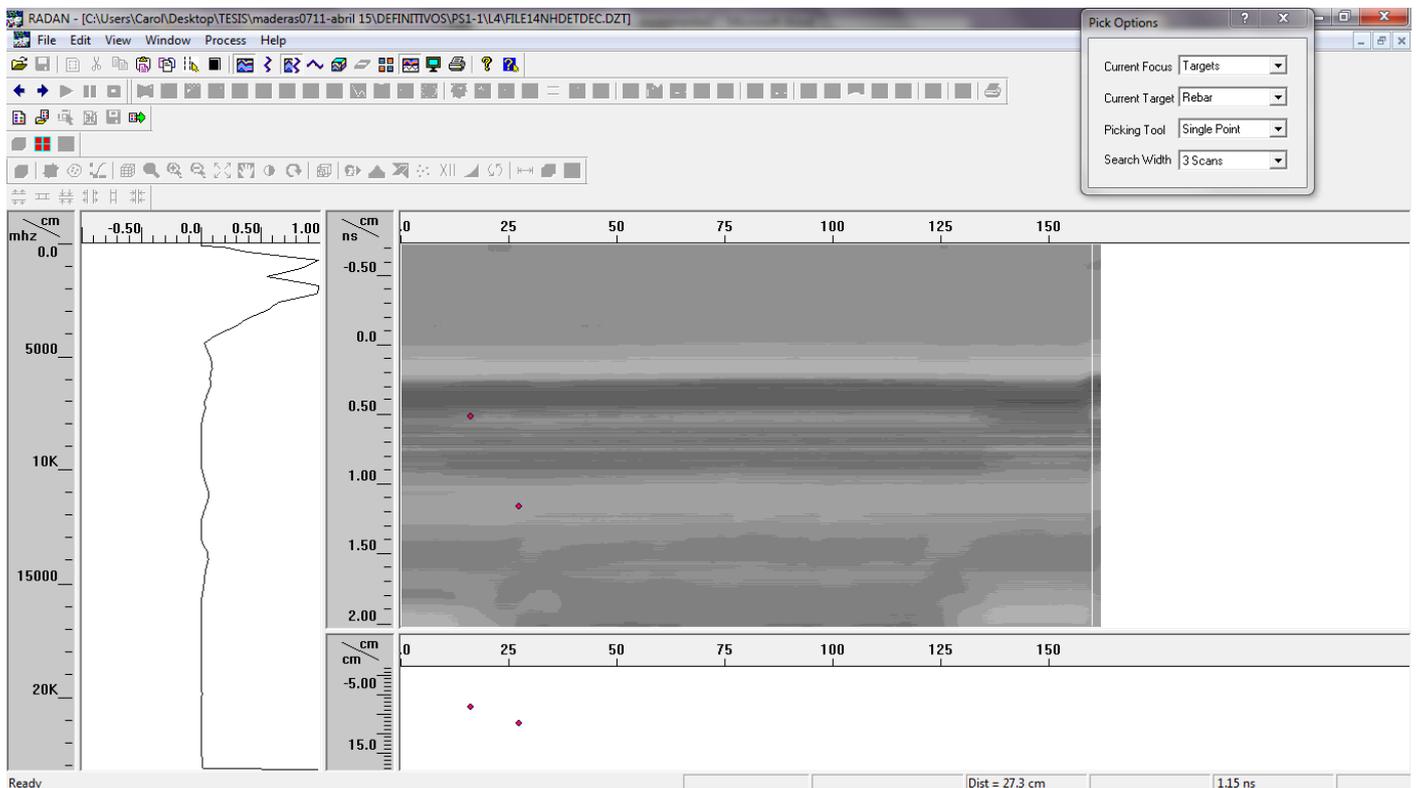
Canto 2

En $x=15$ cm detecta los nudos 1 de la cara de tracción y el nudo 1 de la cara de compresión:

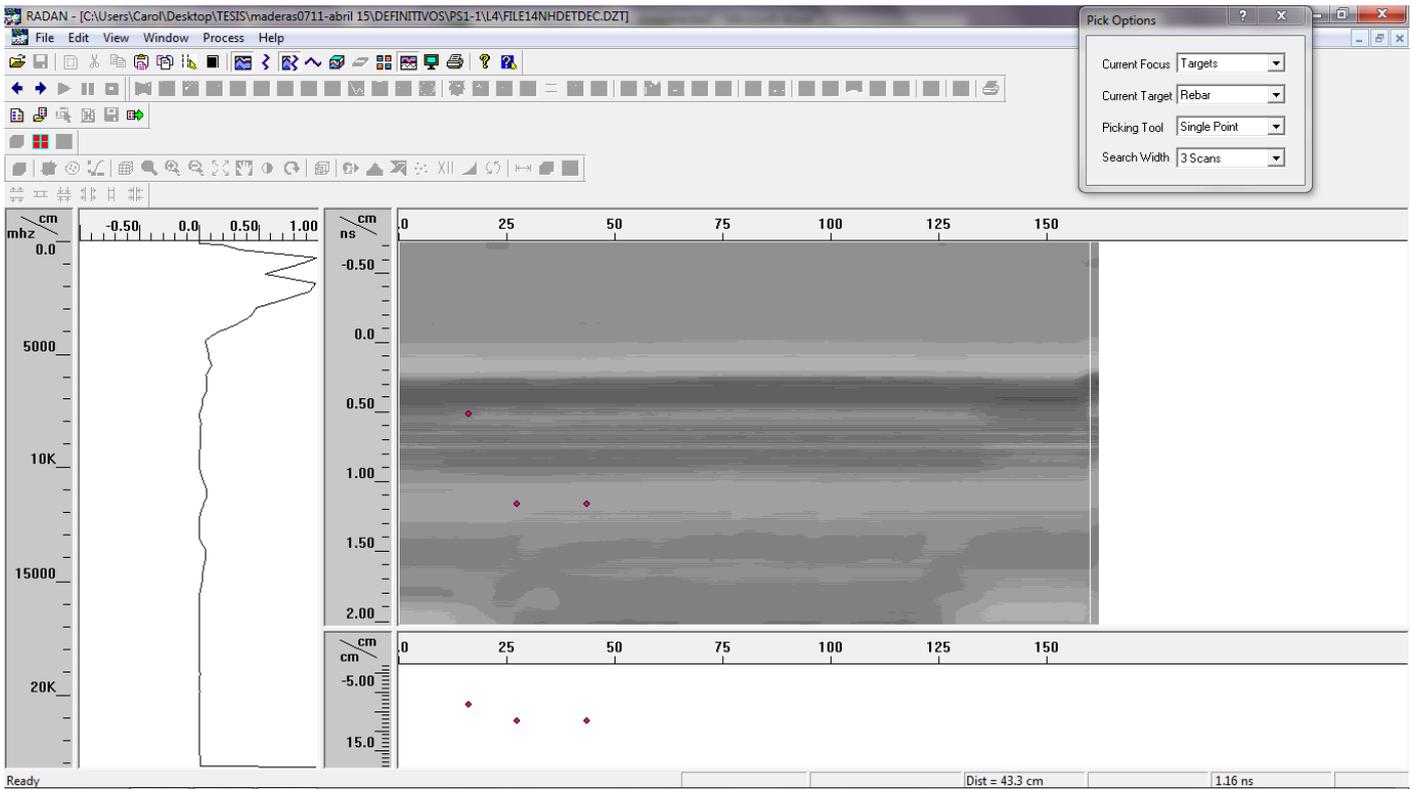
192



En $x=27$ cm detecta los nudos 2 de tracción, 1 del canto 1 y 1 del canto 2:

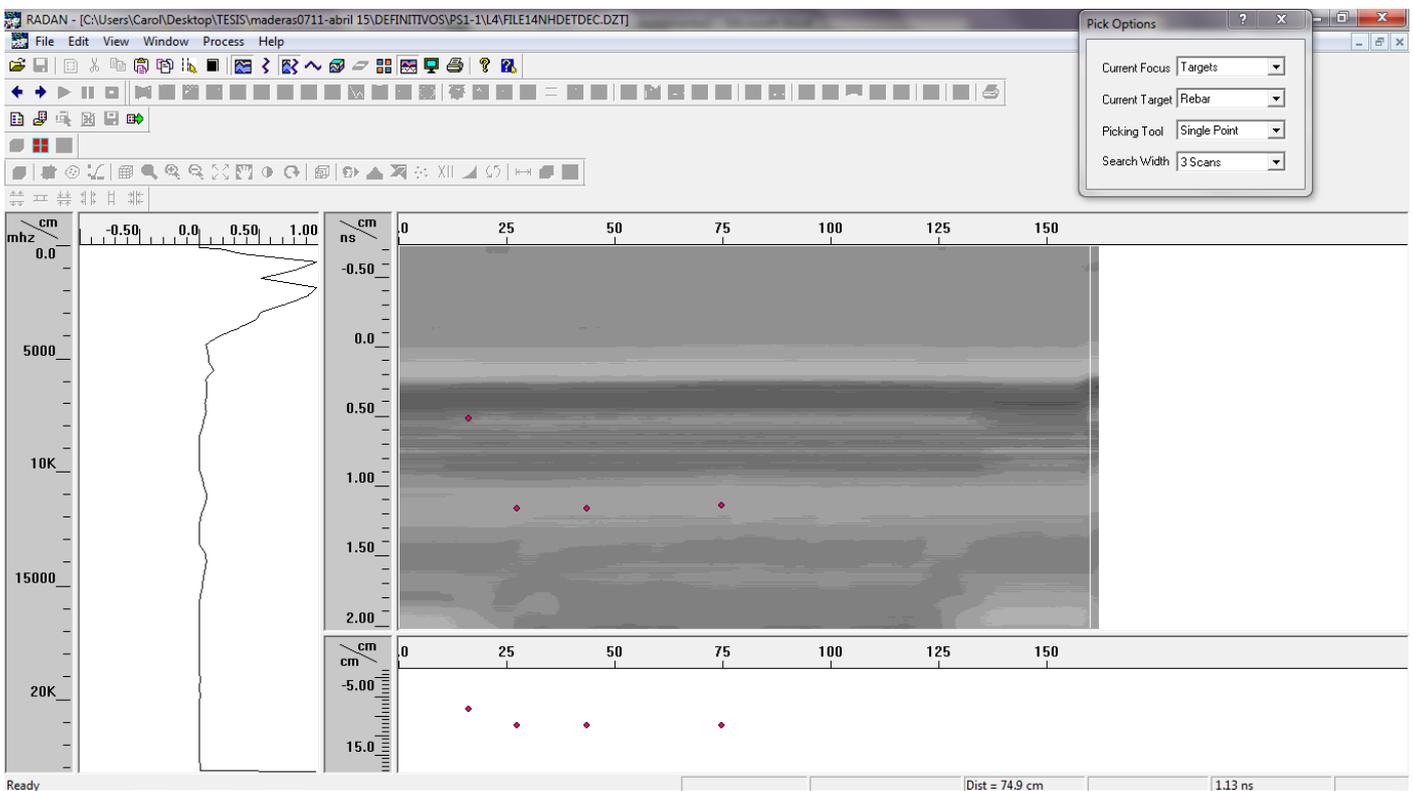


En $x=43$ cm se detecta una zona de irregularidades ocultas:

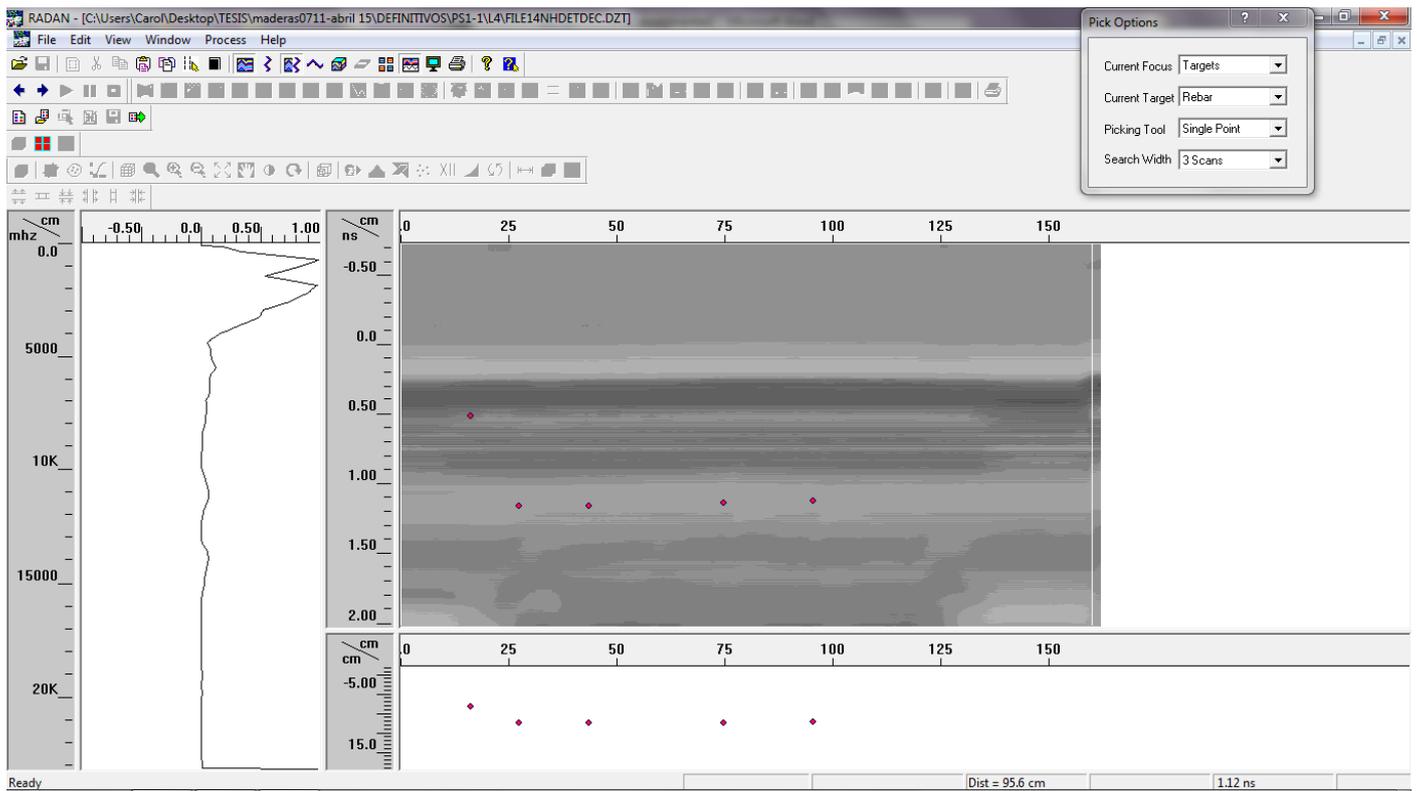


193

En $x=74$ cm sigue detectando una zona de irregularidades, donde están incluidos los nudos 2 de compresión y 3 de tracción:

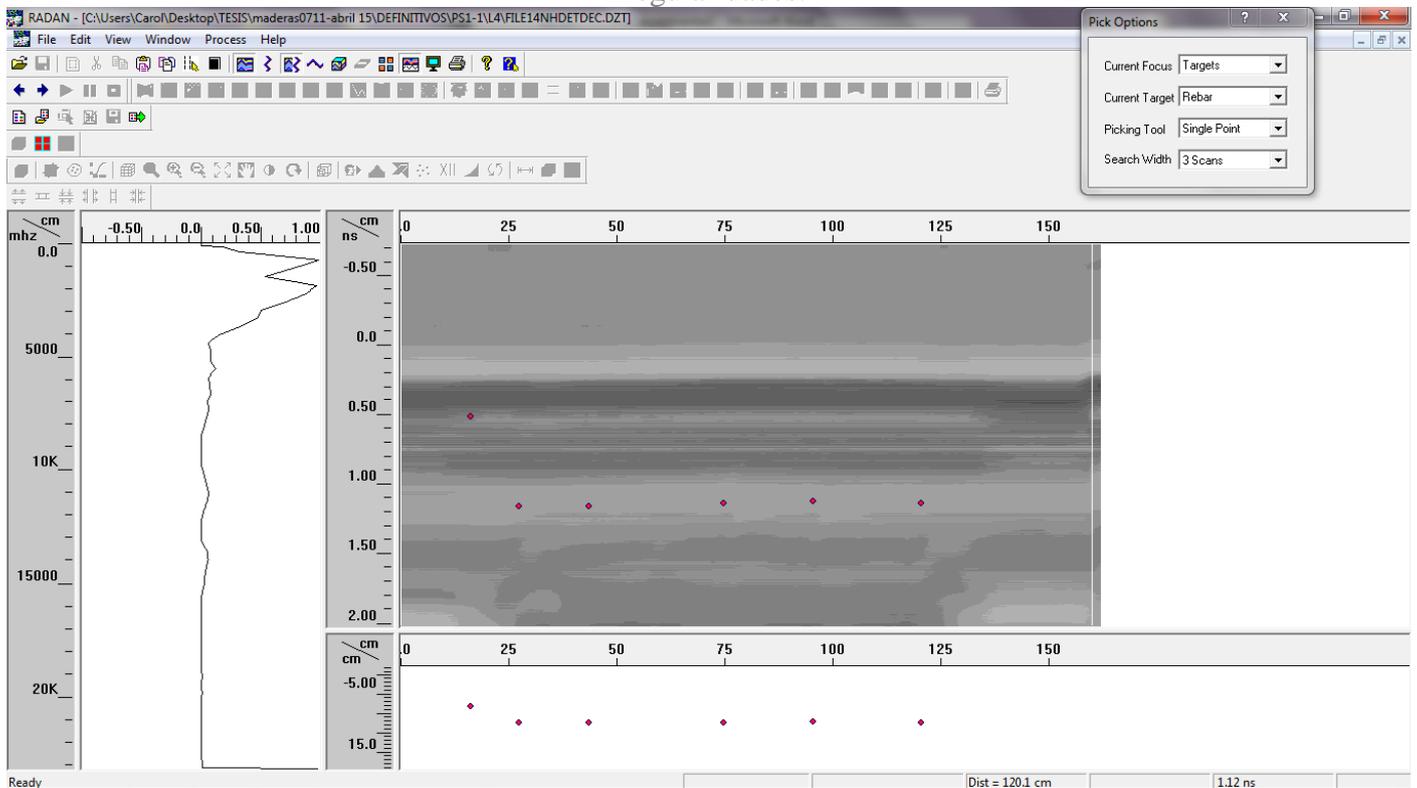


En $x=95$ cm detecta los nudos 4 de tracción, 3 de compresión y 2 del canto 2:



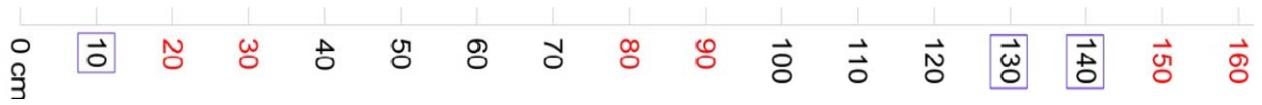
194

En $x=120$ cm detecta el nudo 5 de tracción, 4 de compresión y 3 del canto 2.: Indica una zona continua de irregularidades:



A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

PS1-5



Cara tracción



Canto 1



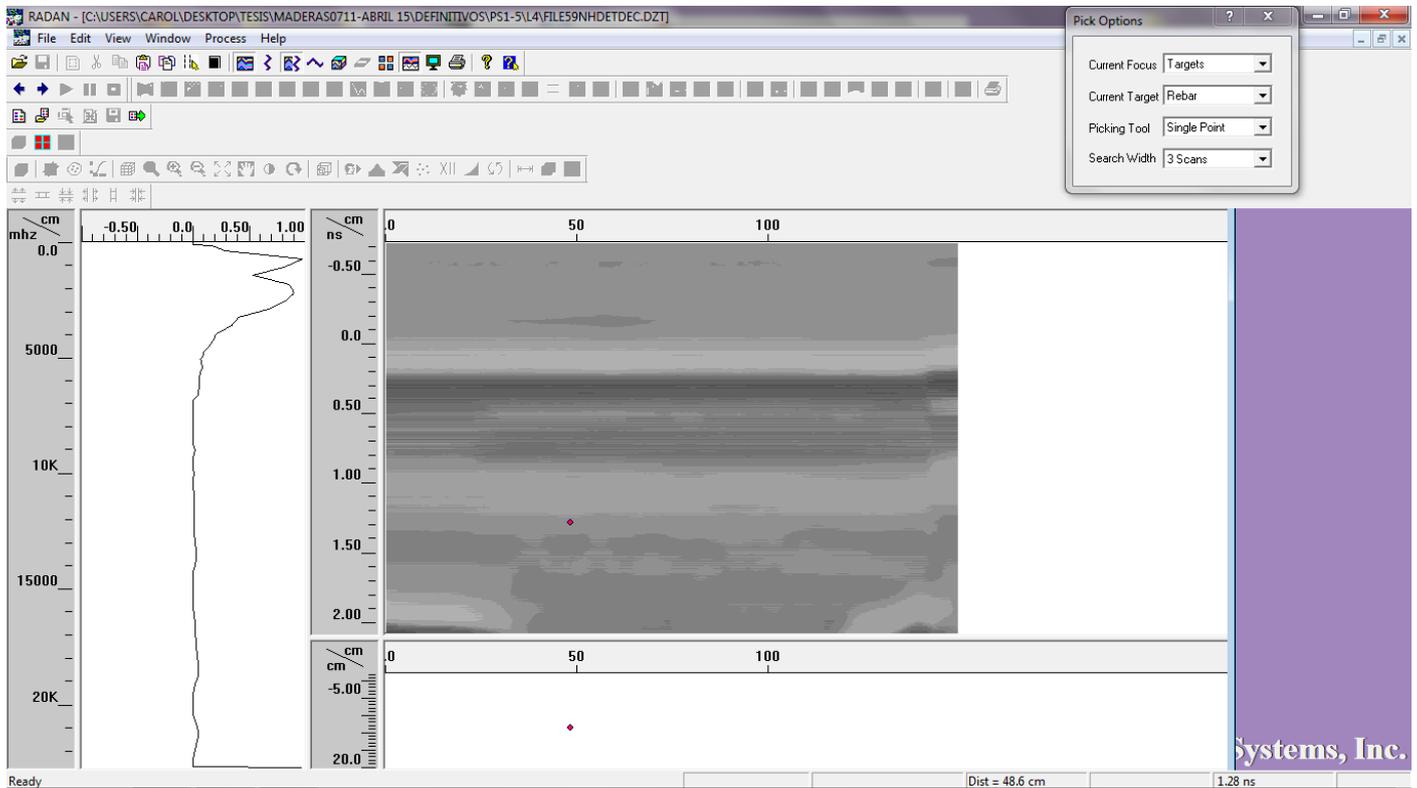
Cara compresión



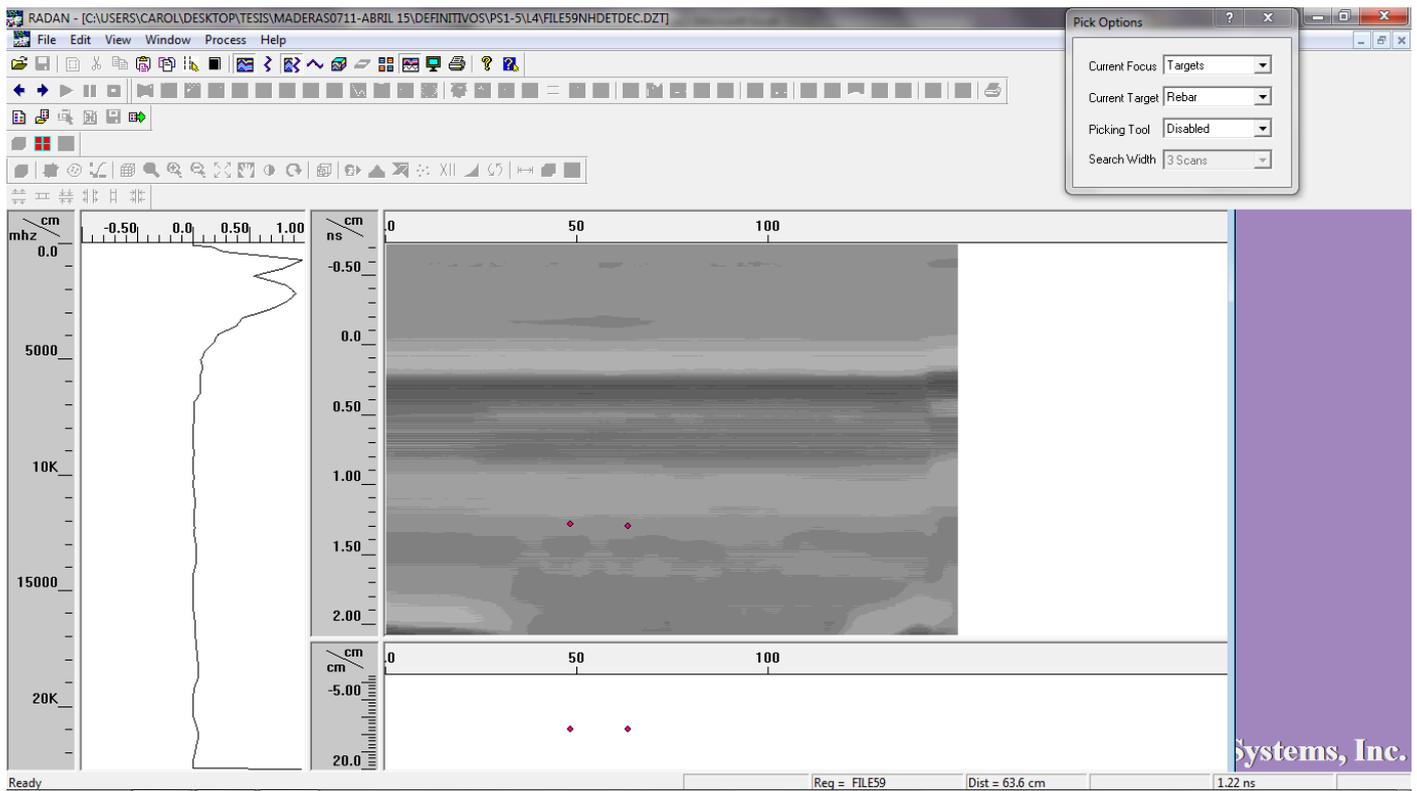
Canto 2

195+

En $x=48$ cm detecta el nudo 2 de tracción y el 5 de compresión:

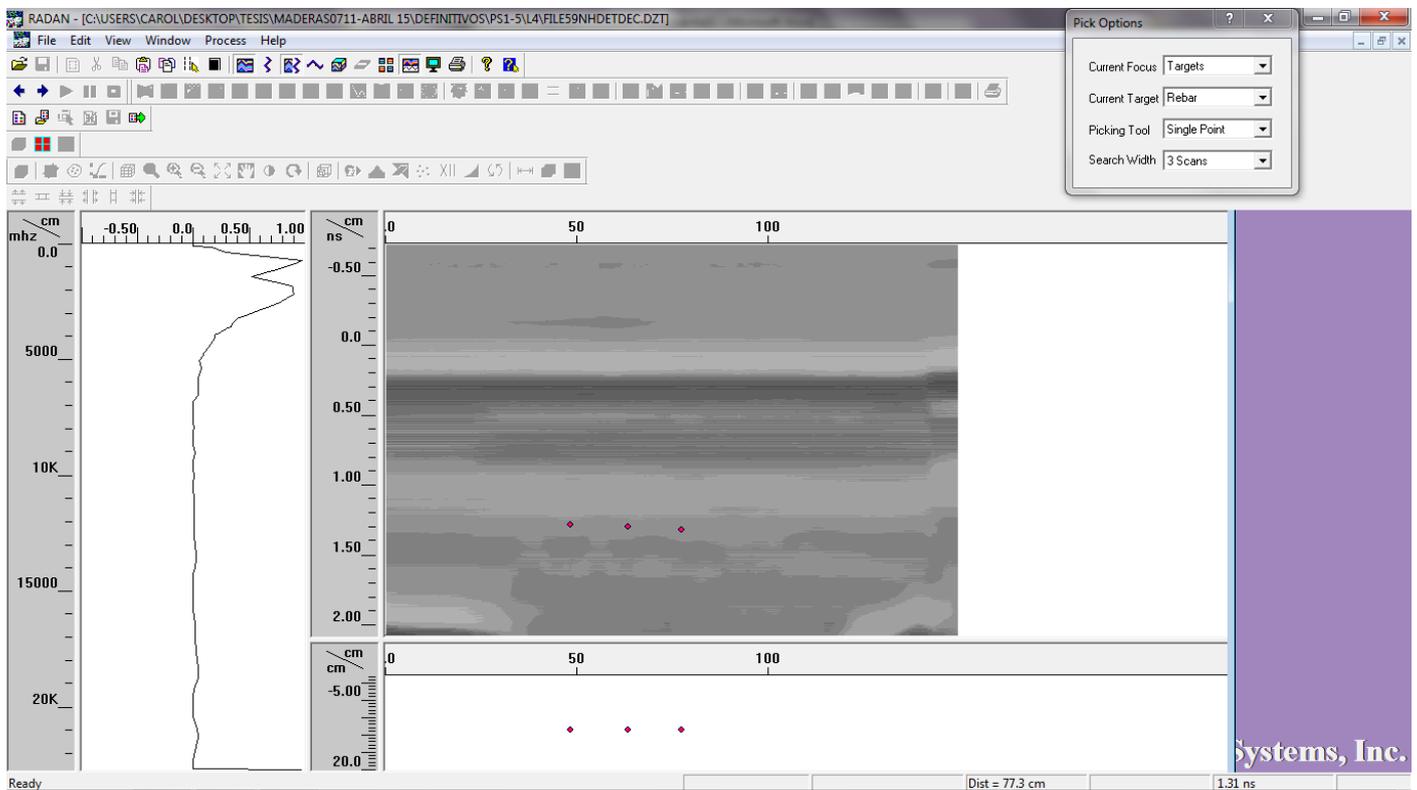


En $x=63$ cm identifica el nudo 3 de compresión:

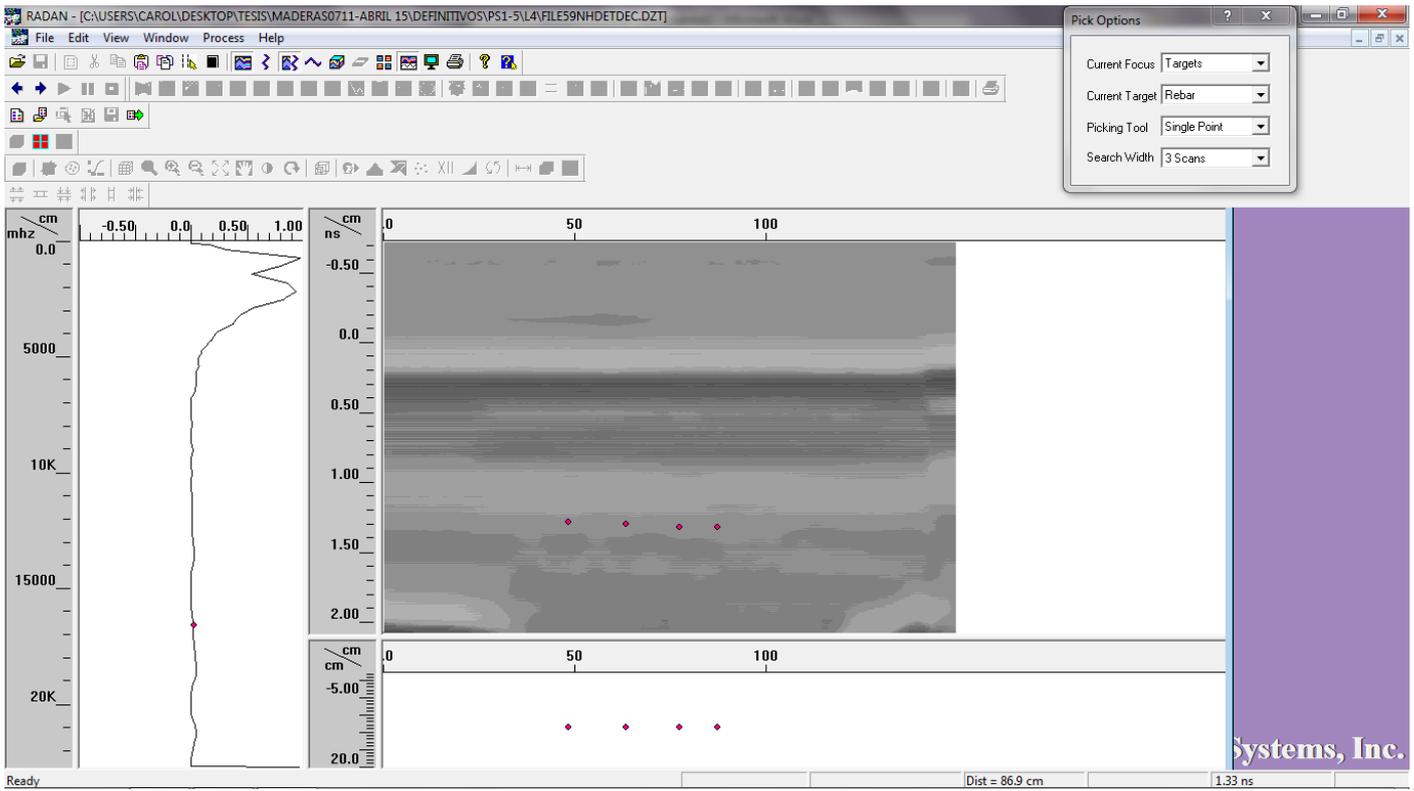


196

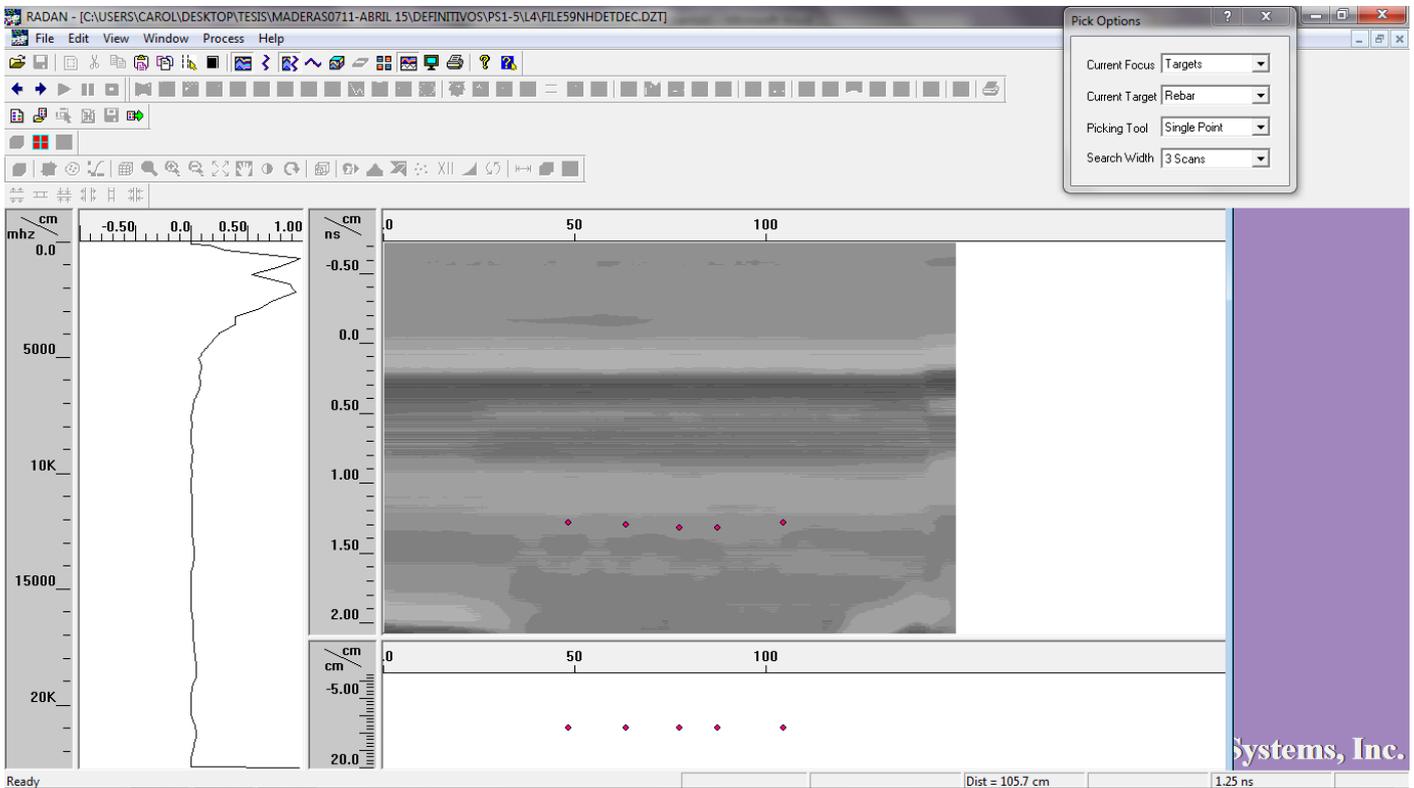
En $x=77,3$ cm detecta el nudo 4 de compresión:



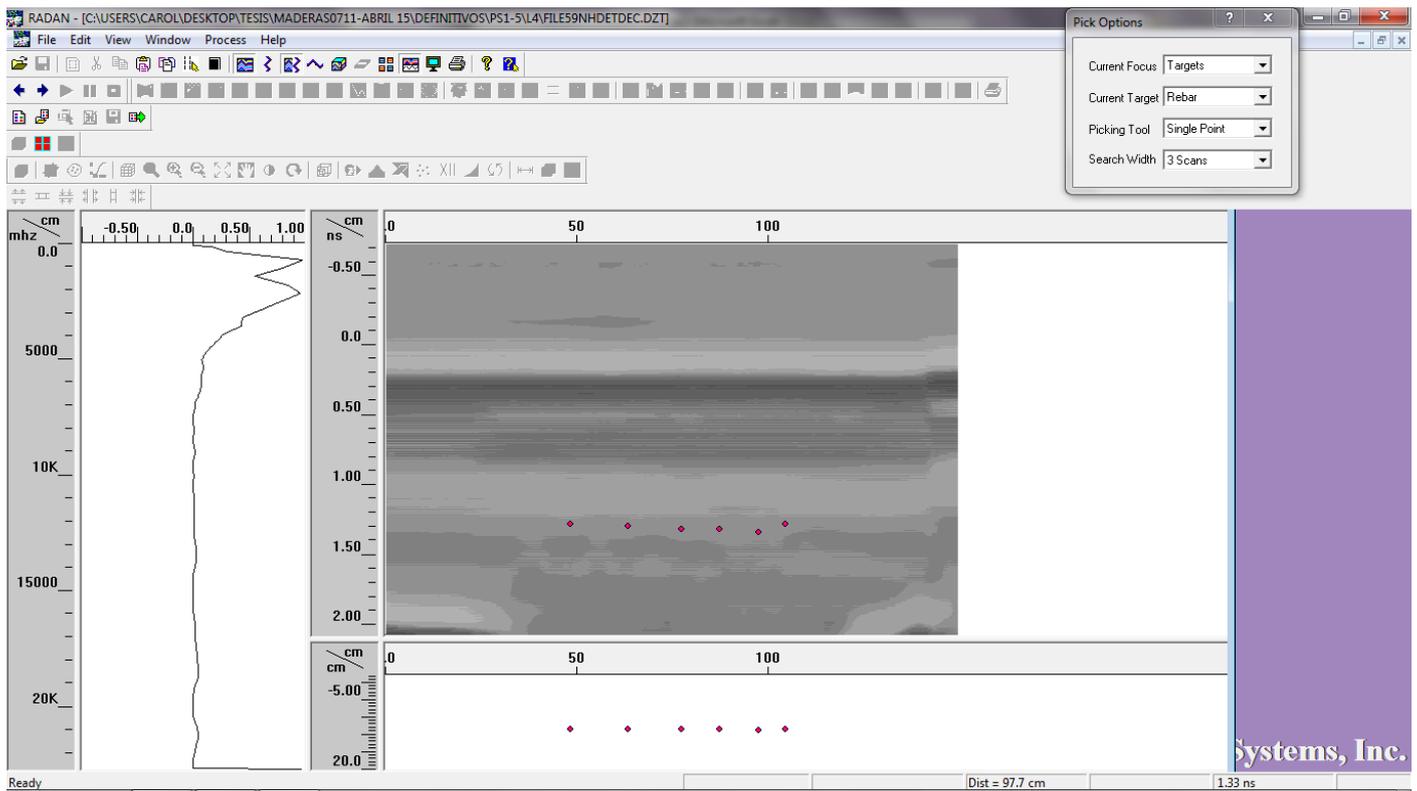
En $x=86$ cm detecta el nudo 5 de compresión:



En $x=105$ cm detecta el nudo 6 de compresión y el 4 de tracción:

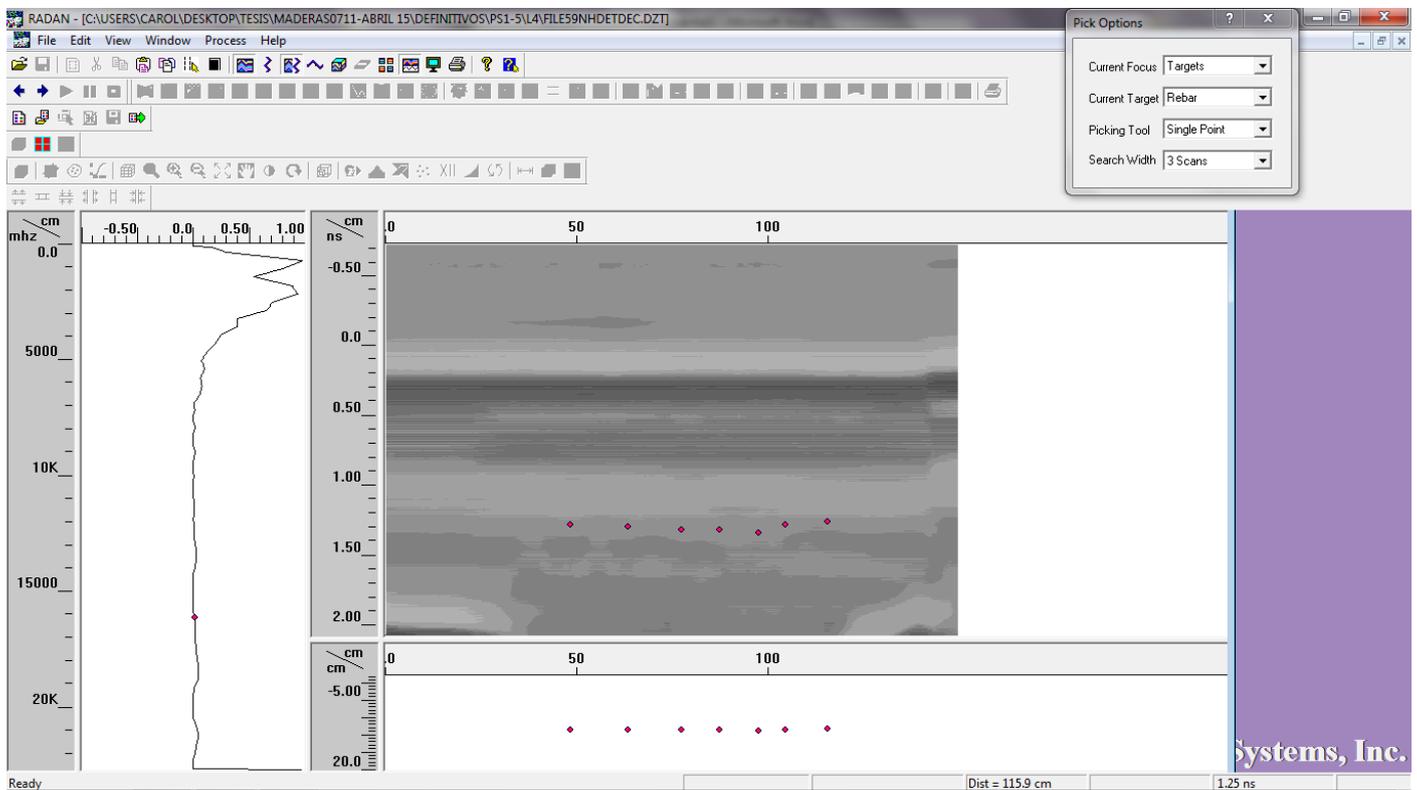


En $x=97$ cm detecta el nudo 3 de tracción:



198

En $x=115$ cm detecta el nudo 5 de tracción y el 7, 8 y 9 de compresión:



A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

PS1-6



Cara tracción



Canto 1

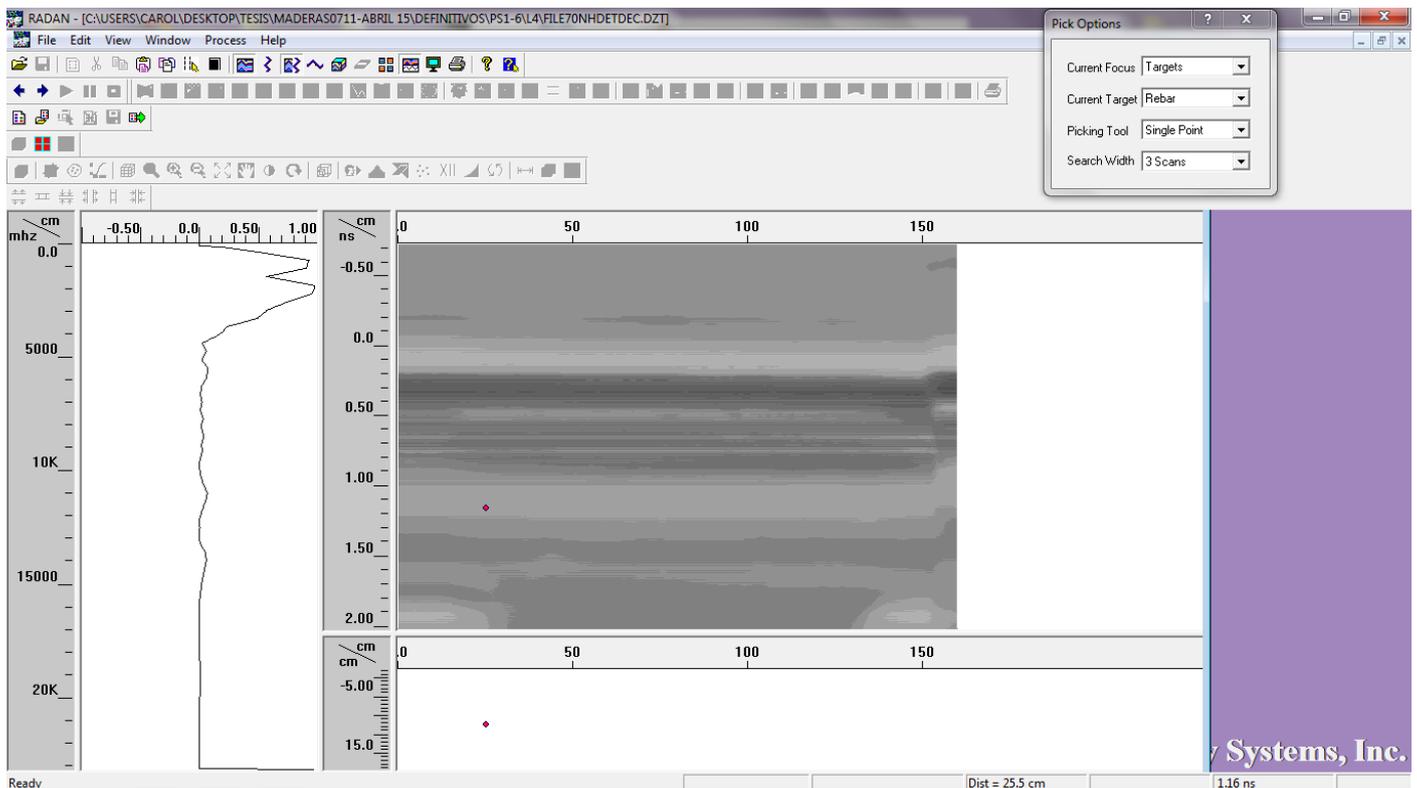


Cara compresión

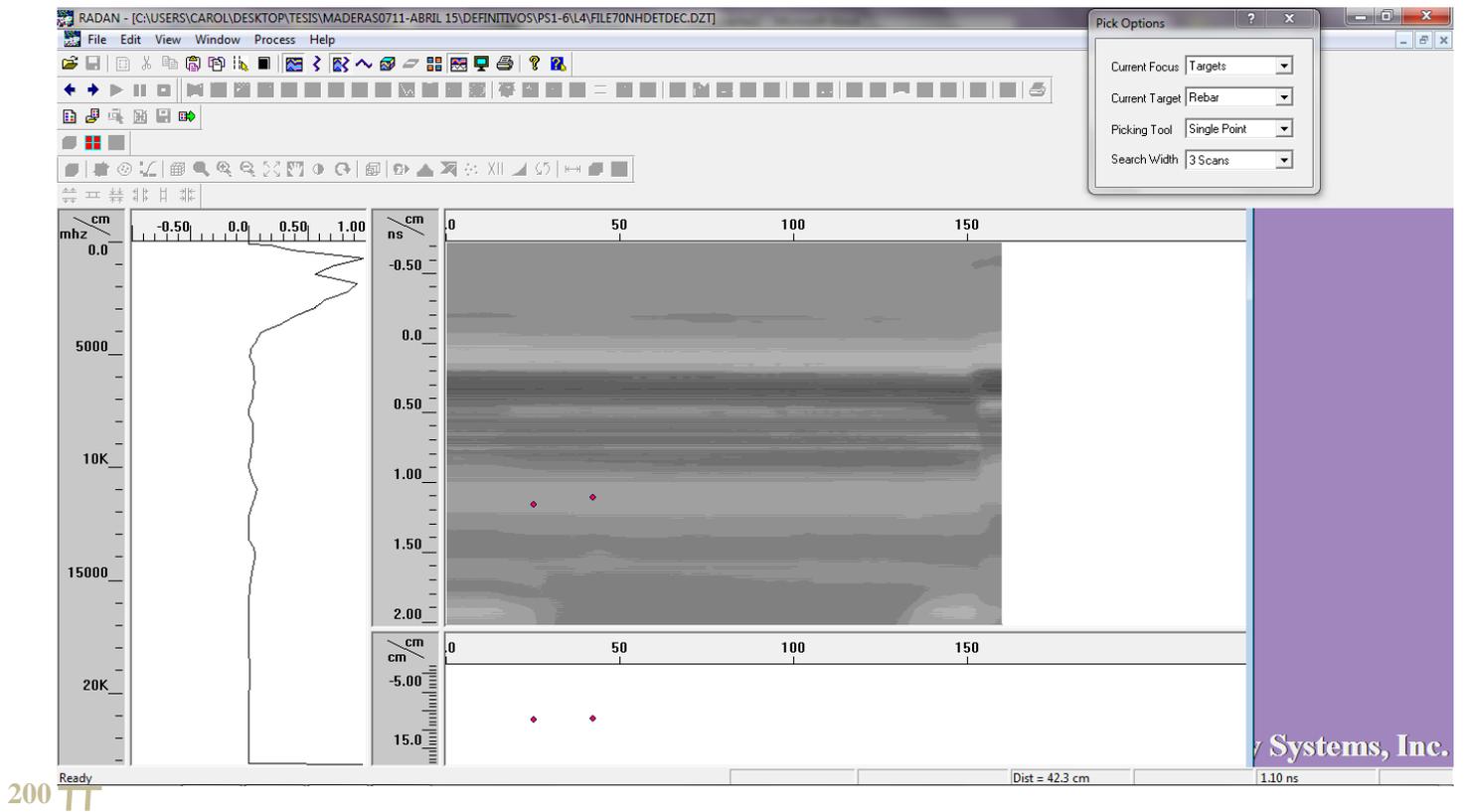


Canto 2

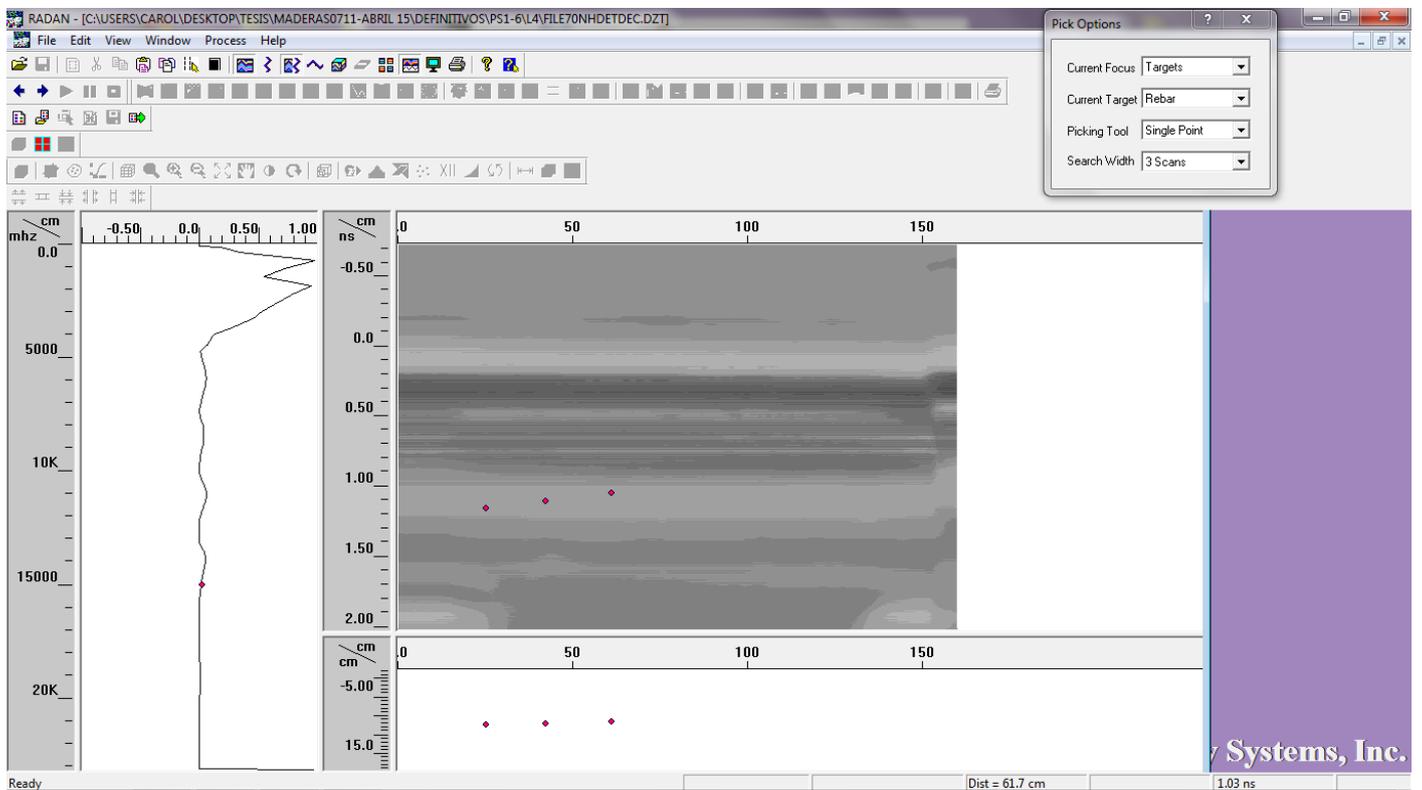
En $x=25$ cm detecta los nudos 1 y 2 de tracción, y 1 y 2 de compresión:



En x=42 cm detecta irregularidades ocultas:

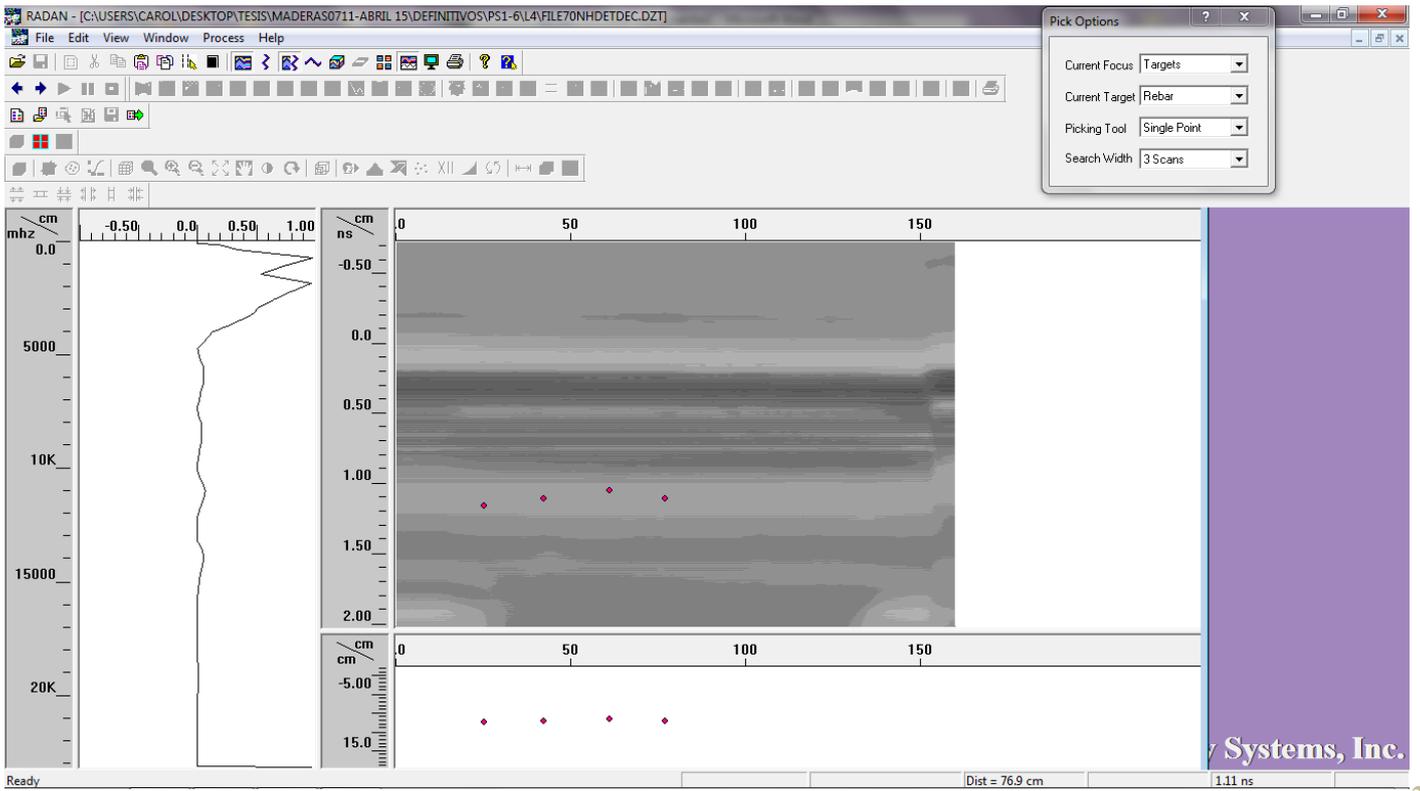


En x=61 cm sigue vuelve a detectar irregularidades ocultas:



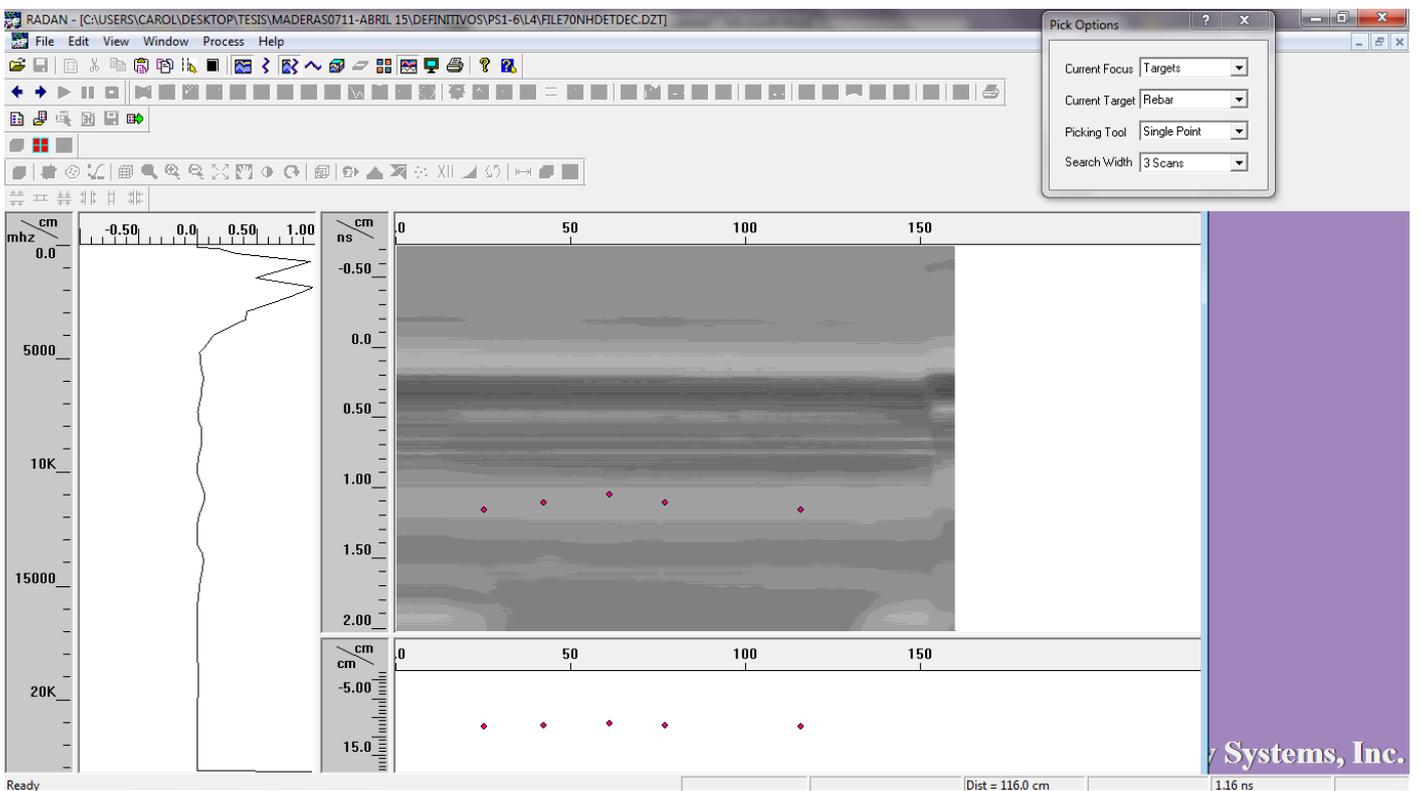
A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

En $x=77$ cm detecta los nudos 3 y 4 de tracción, y el 3 y 4 de compresión:



201+

Hasta $x=117$ cm detecta irregularidades ocultas, y en $x=117$ cm detecta los nudos 5 de tracción, y 5 y 6 de compresión:



Sin embargo los nudos 6 y 7 de tracción se confunden con el caballete.

PS1-7



Cara tracción



Canto 1



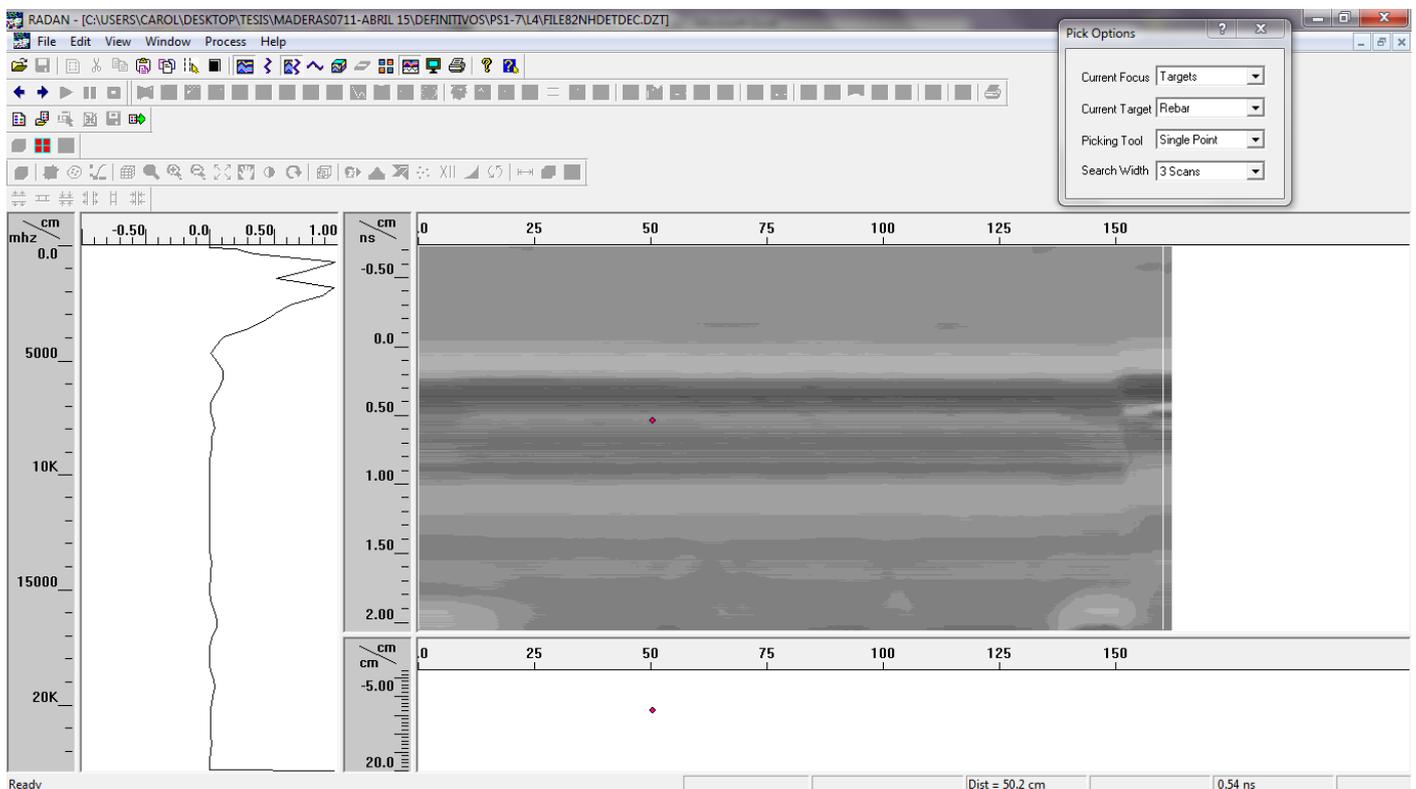
Cara compresión



Canto 2

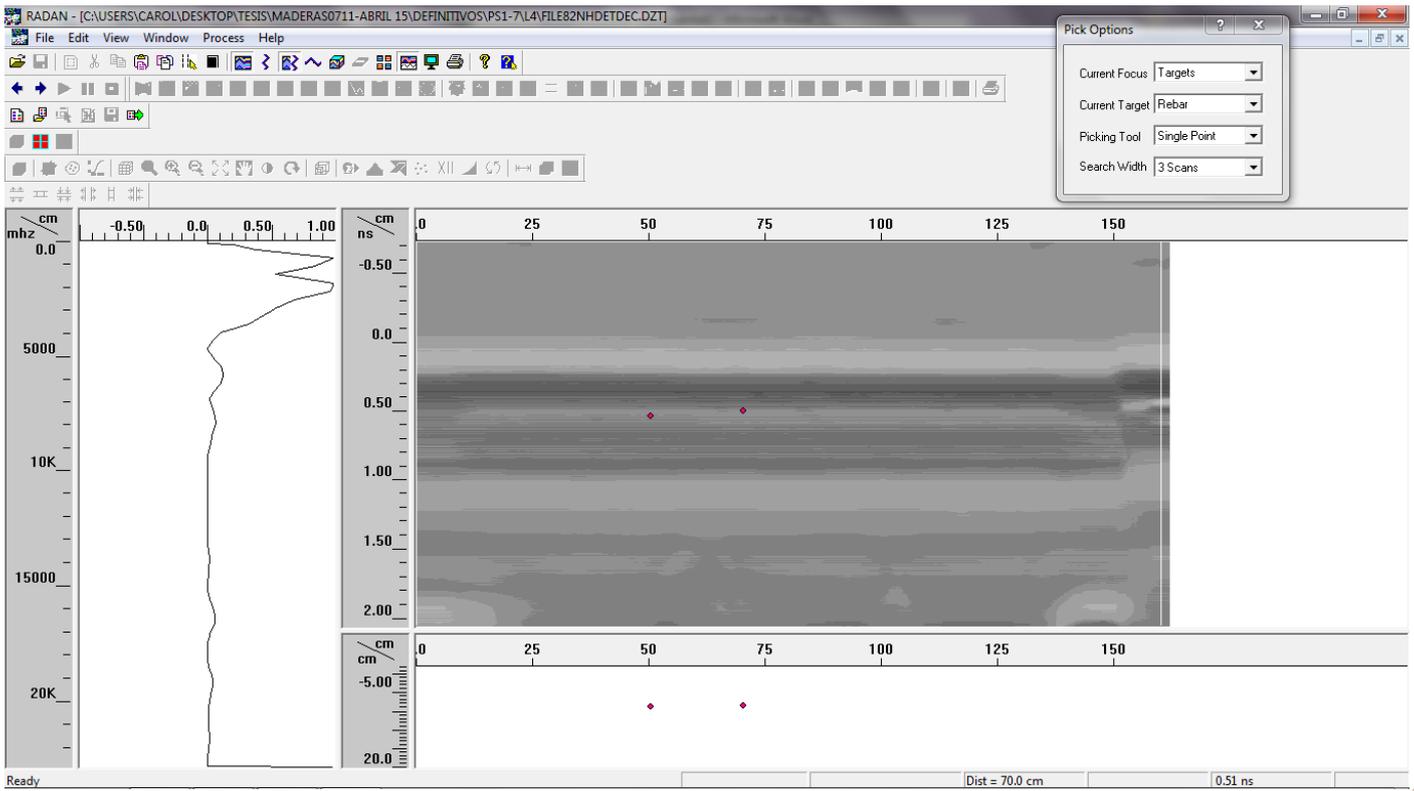
202 †

En $x=50$ cm identifica el nudo 2 de tracción, el 3 de compresión y la bolsa de resina 1:



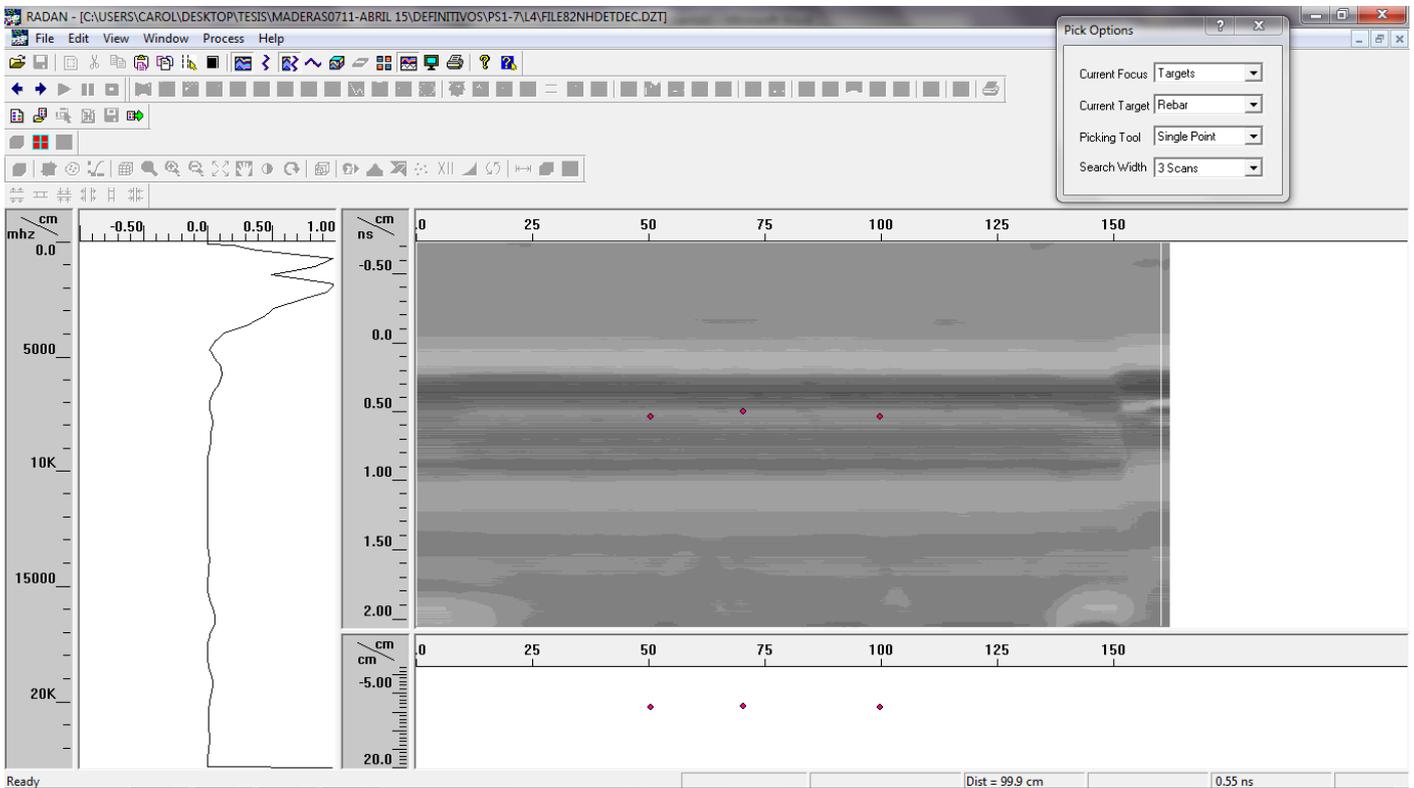
A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

En $x=70$ cm identifica alguna irregularidad oculta:

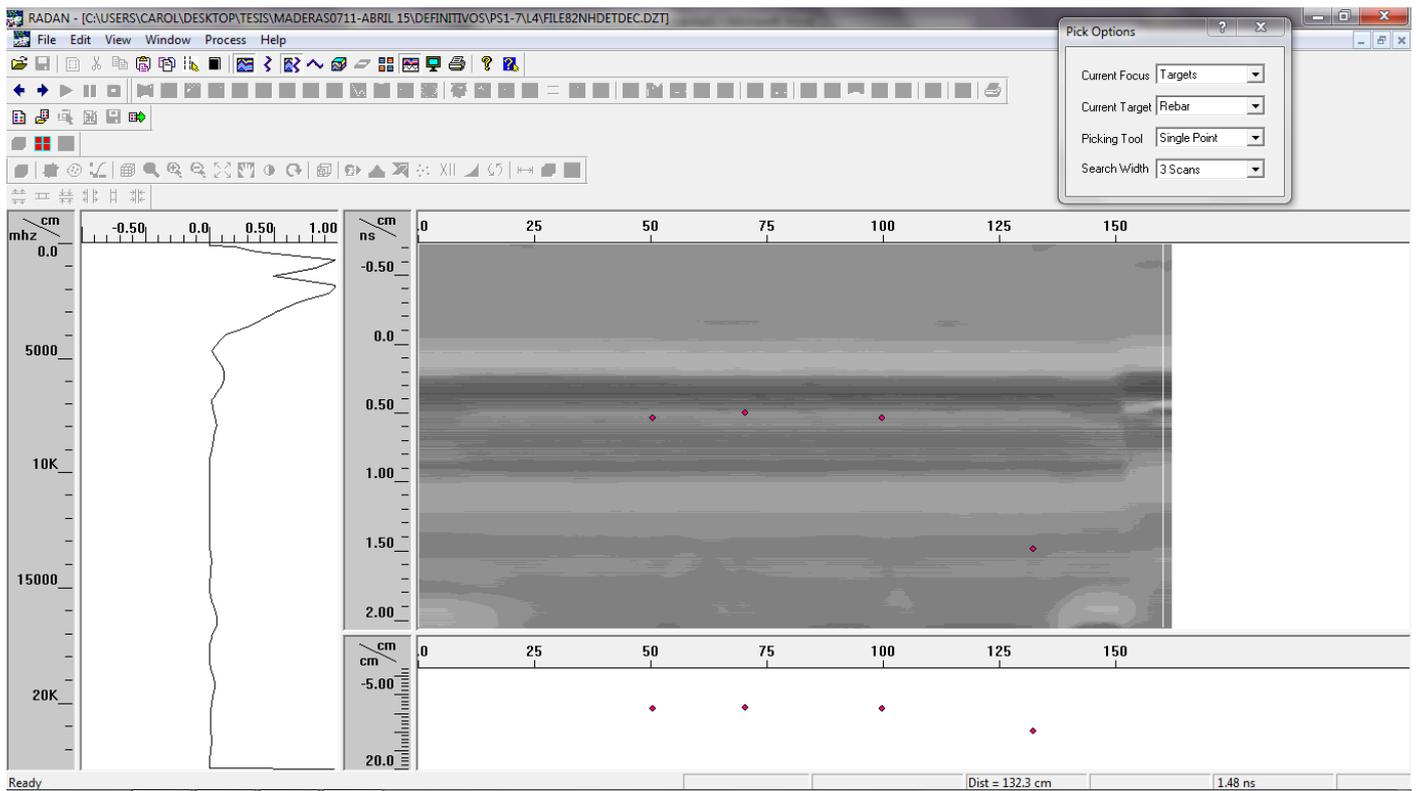


203

En $x=100$ cm detecta los nudos 4 y 5 de compresión, y la bolsa de resina b2:

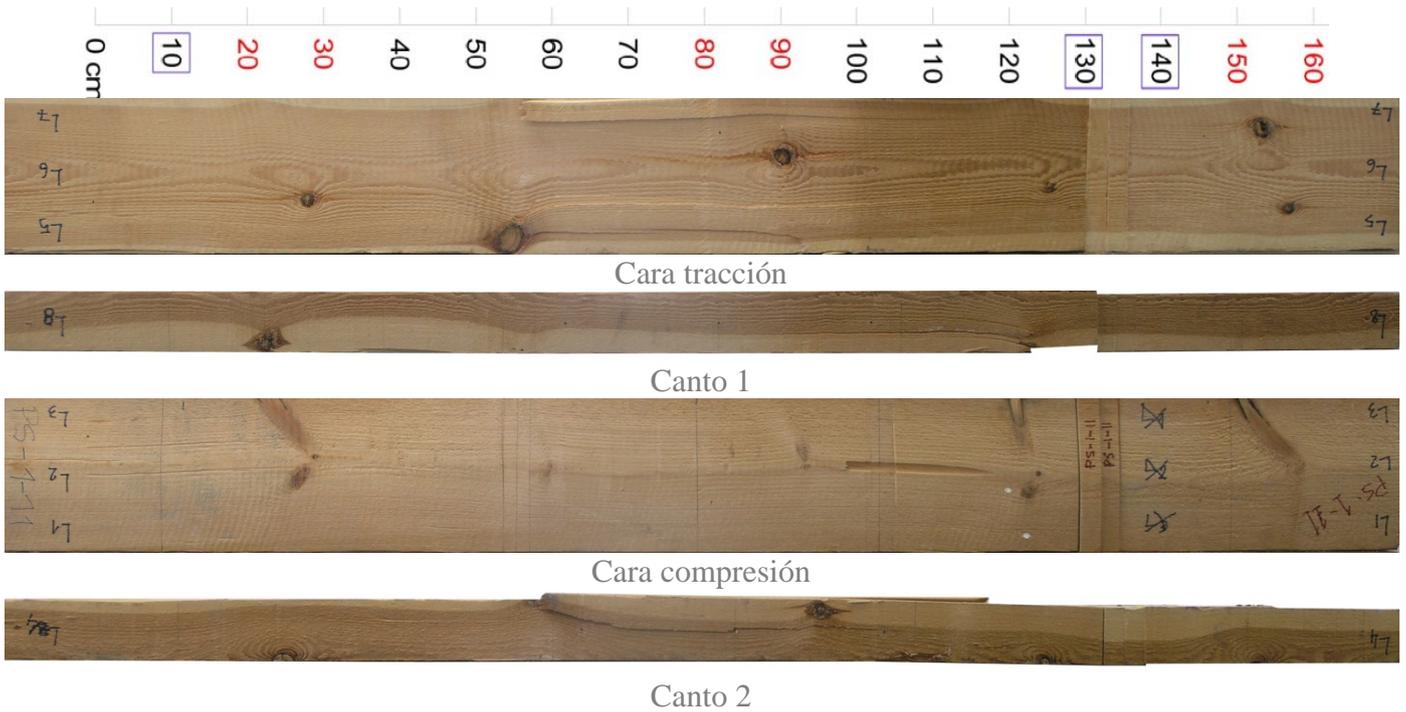


En $x=130$ cm identifica la presencia de alguna irregularidad oculta:

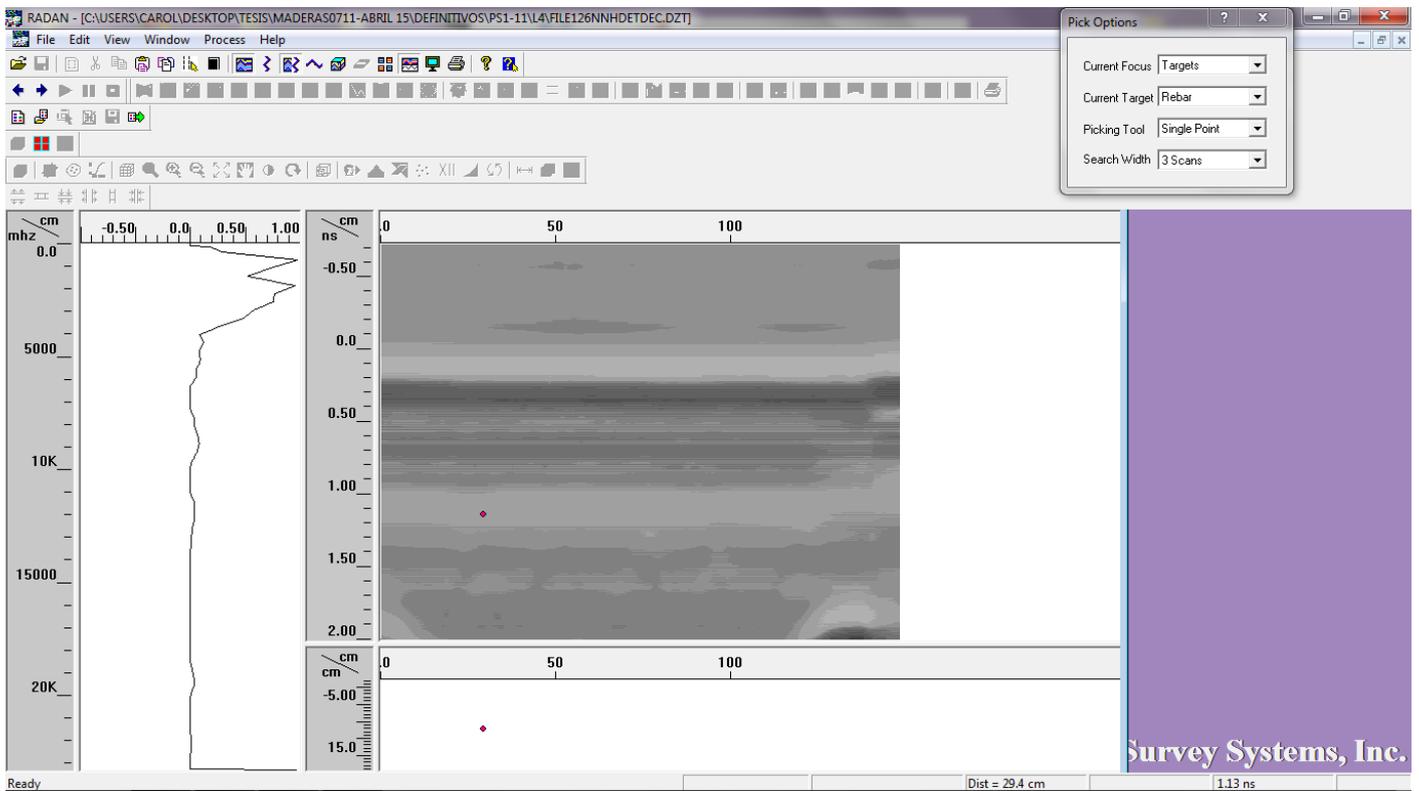


A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

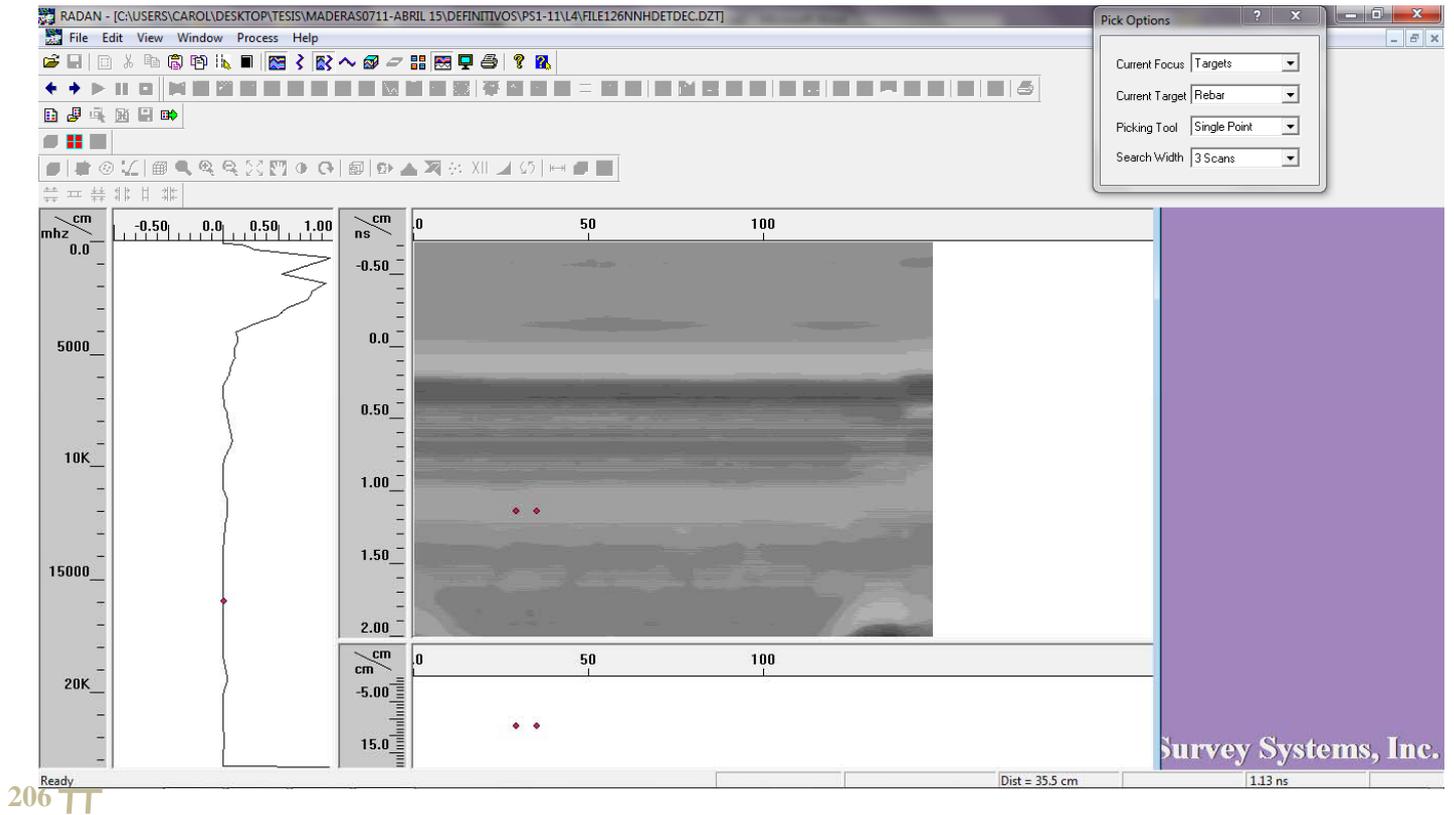
PS1-11



En $x=30$ cm detecta el nudo 1 del canto 1, el nudo 1 de compresión y el 1 del canto 2:

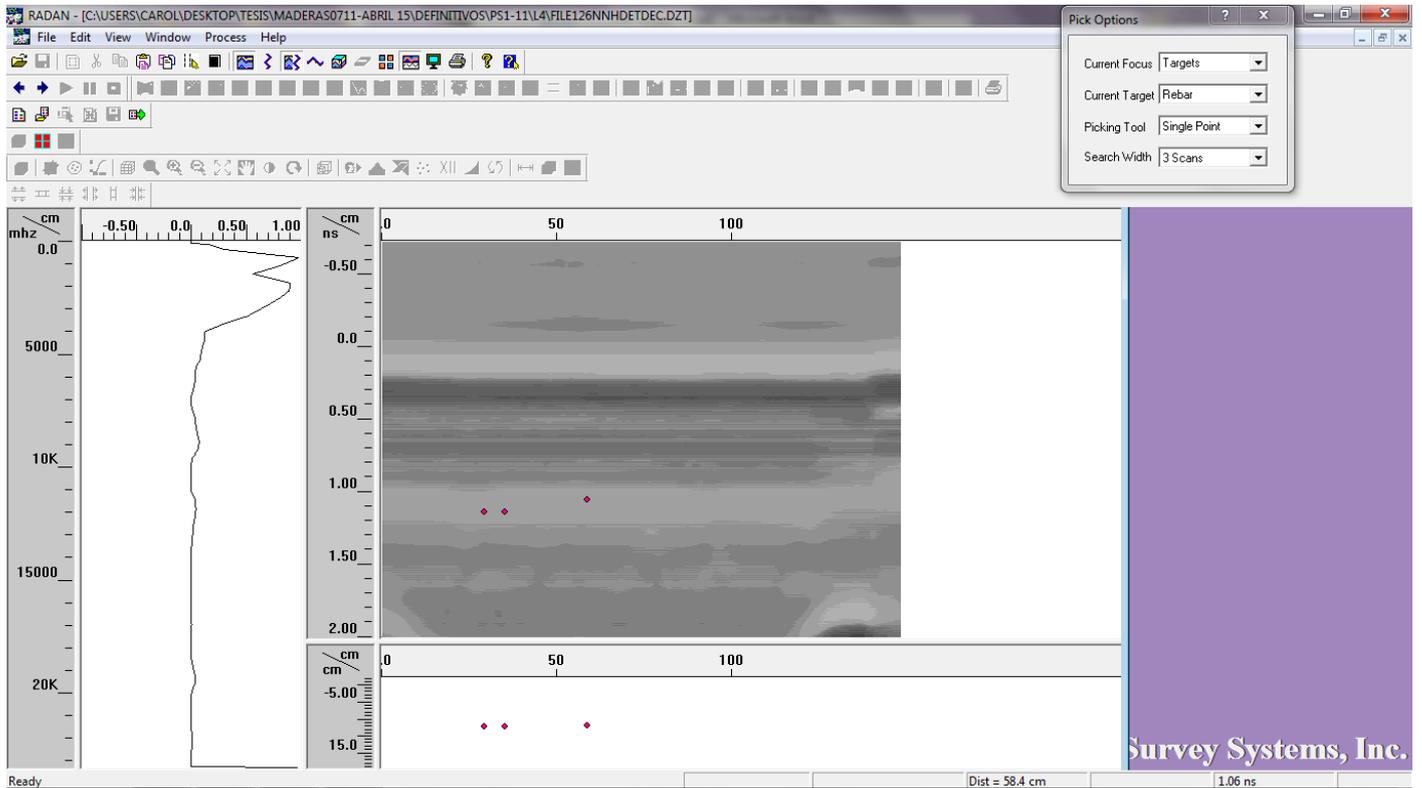


En $x=35$ cm, detecta el nudo 1 de tracción y el nudo 2 de compresión:

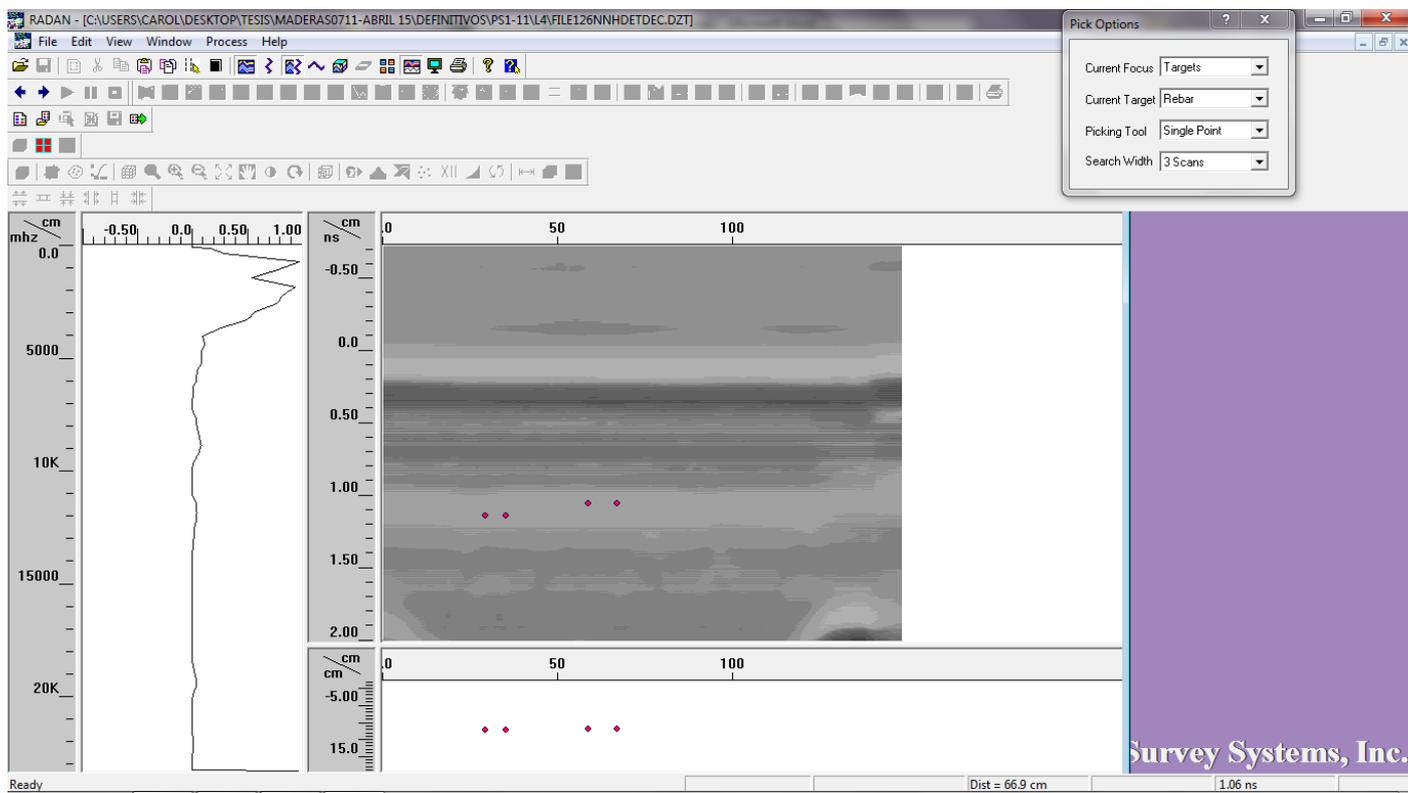


206 TT

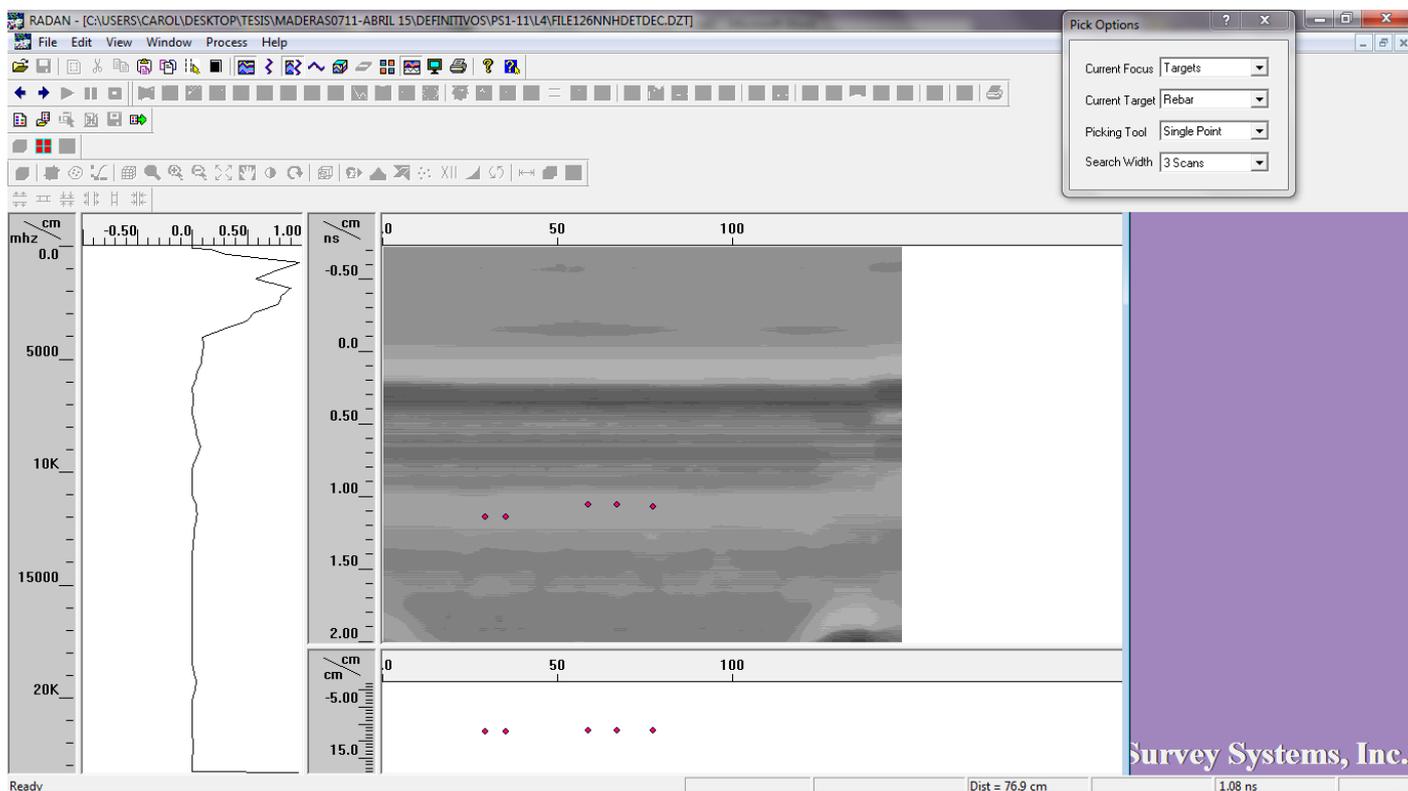
En $x=56$ cm detecta el nudo 2 de tracción, el 4 de compresión y el 2 del canto 2:



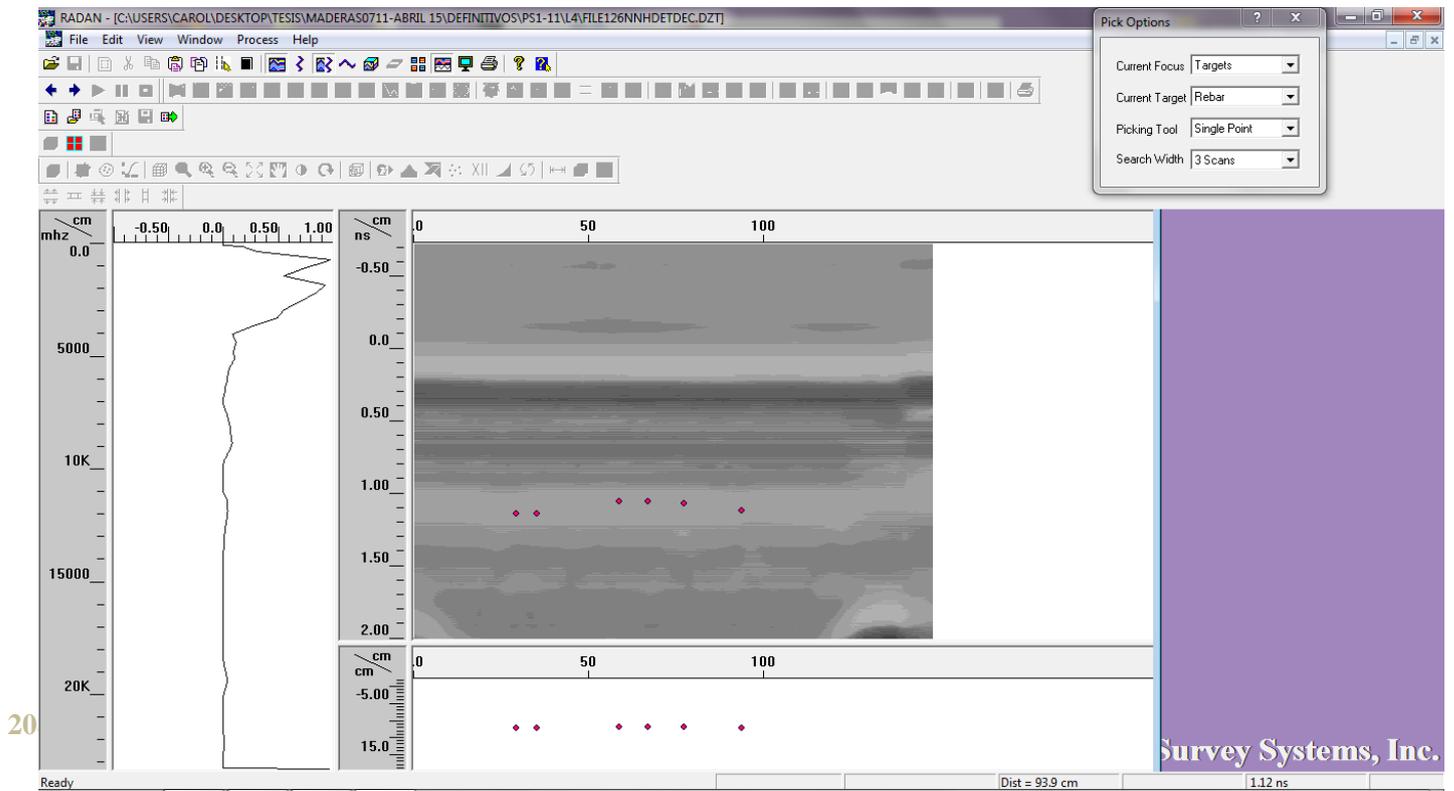
En $x=67$ cm detecta alguna irregularidad oculta:



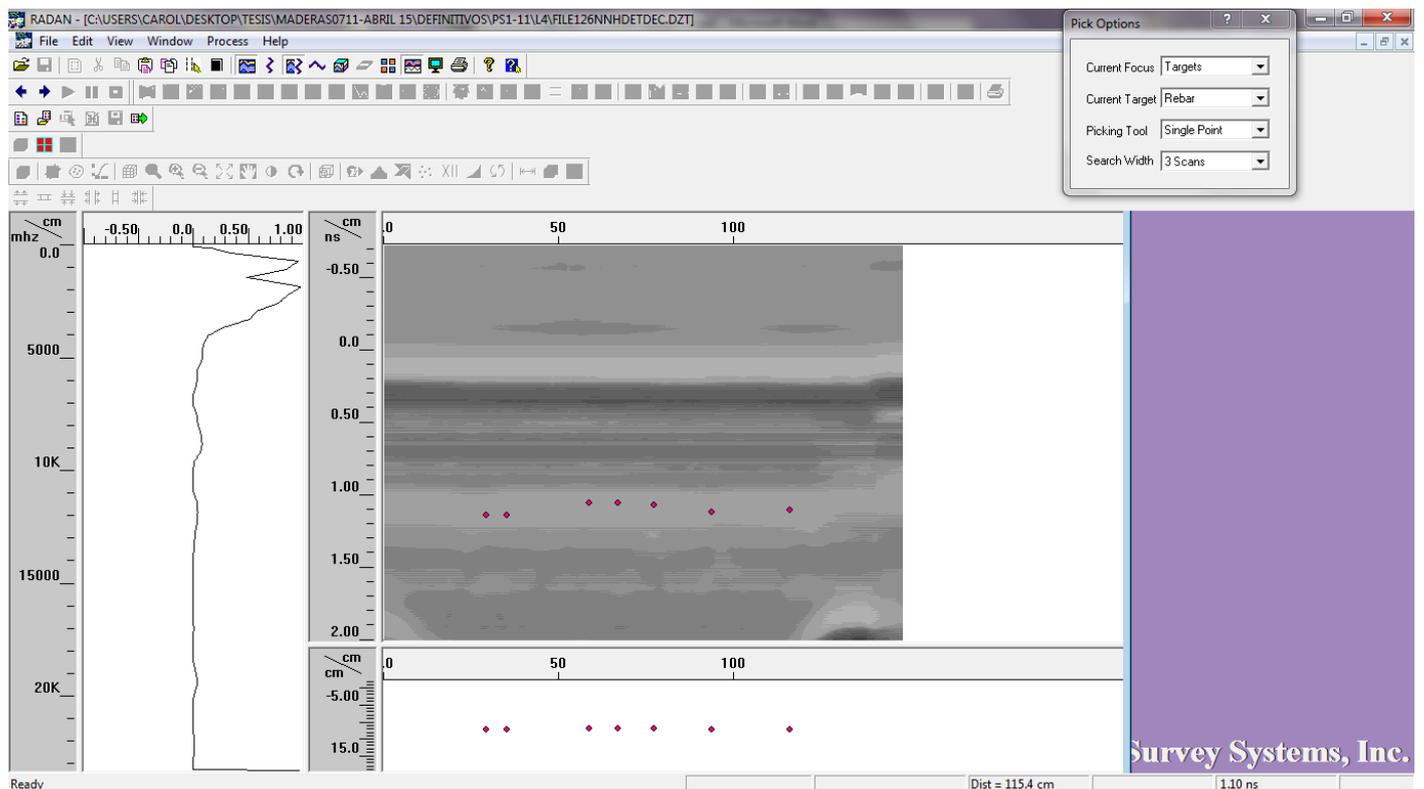
Hasta $x=77$ cm sigue detectando una zona de irregularidades ocultas:



En x=93 cm detecta los nudos 3 de tracción, 5 y 6 de compresión, y 3 del canto 2:



En x=115 cm identifica los nudos 4 y 5 de tracción, el nudo 2 del canto 1, el 7, 8 y 9 de compresión, y el 4 del canto 2:



PS1-13



Cara tracción



Canto 1

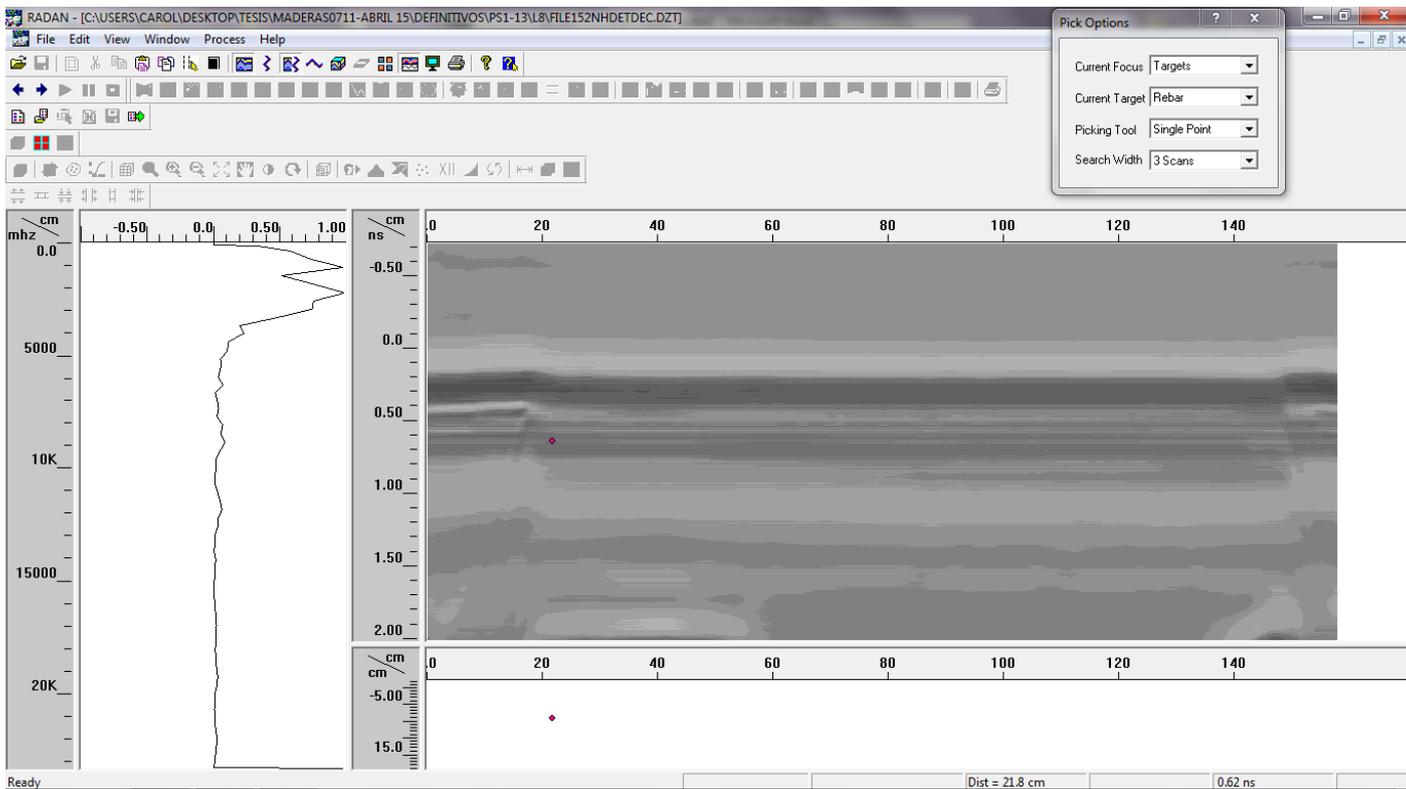


Cara compresión

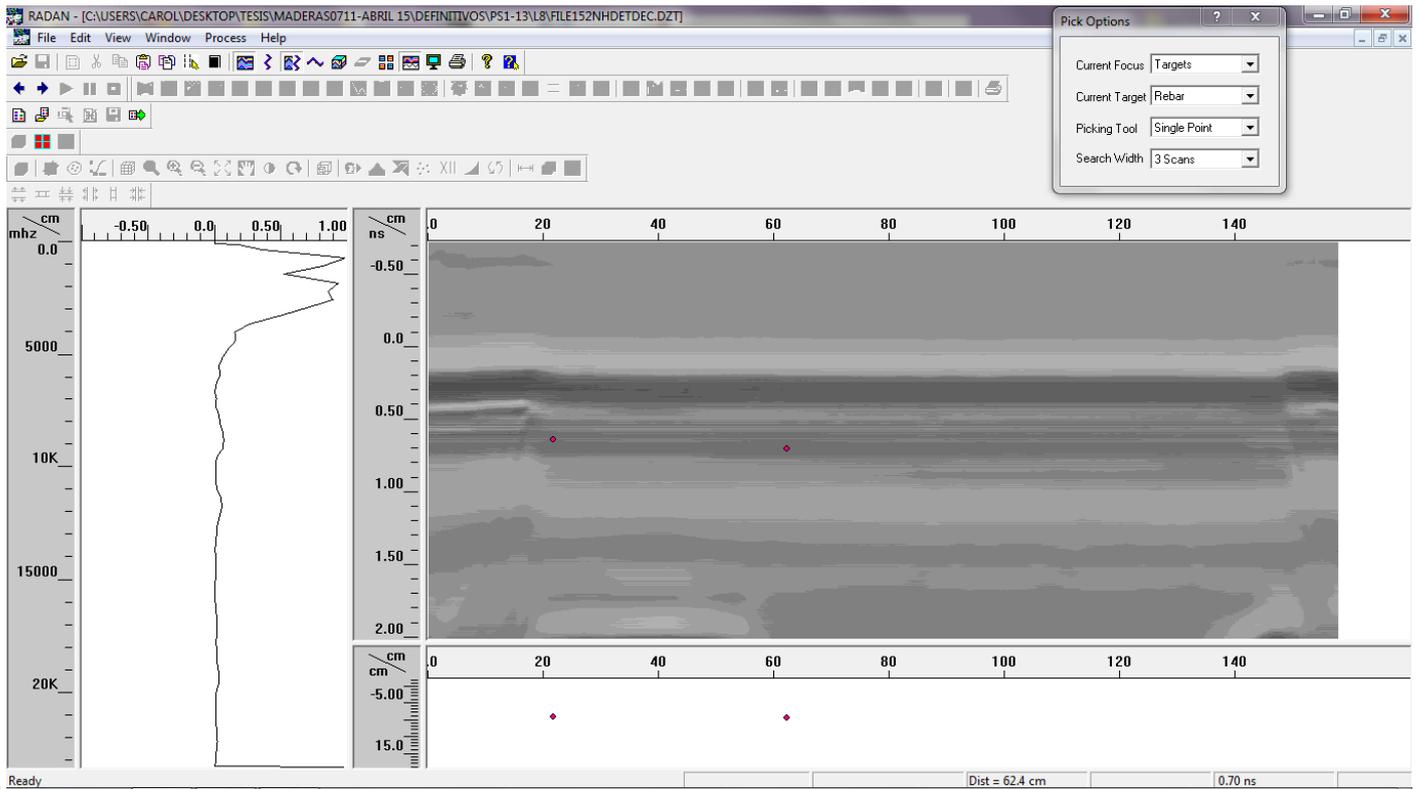


Canto 2

En $x=21$ cm detecta el nudo 1 de tracción y el 2 de compresión:

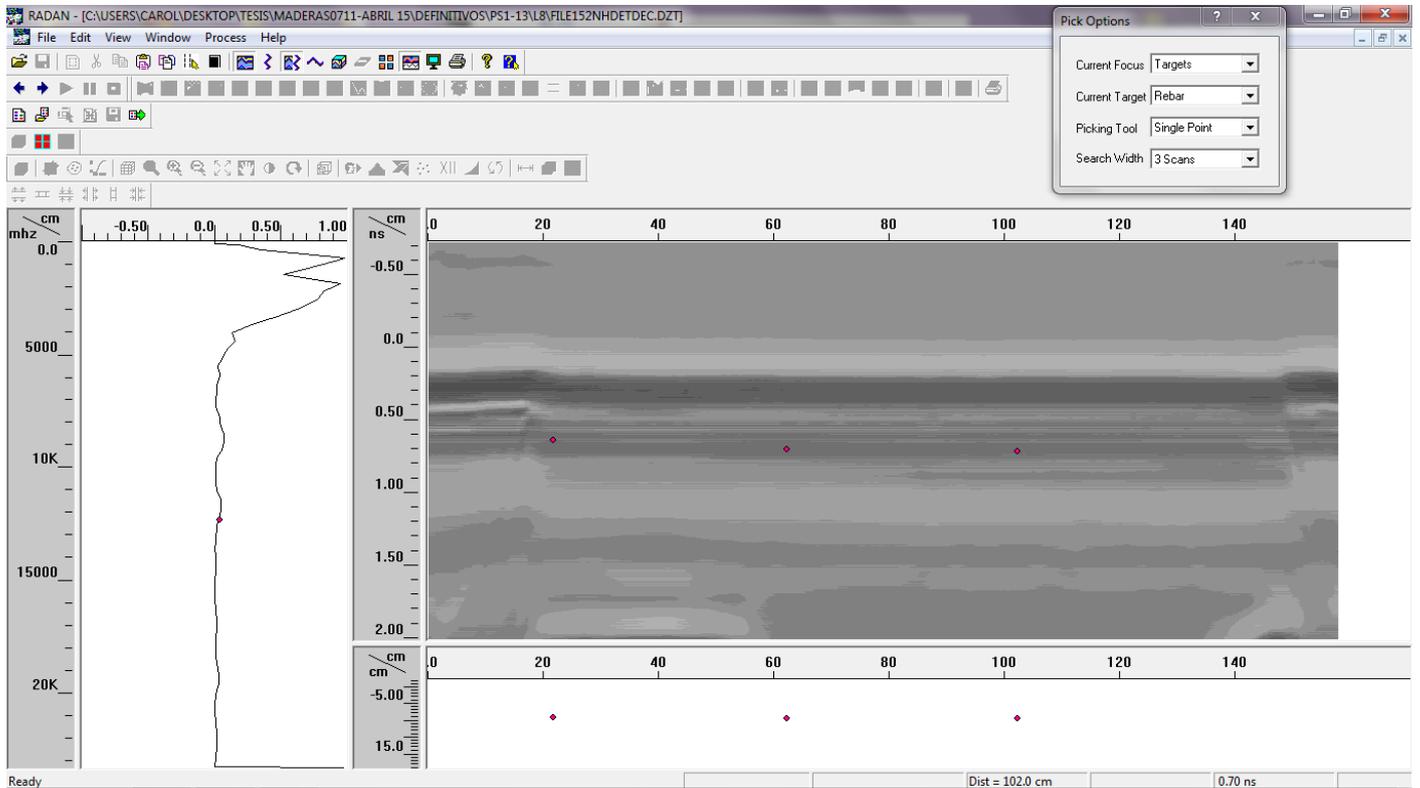


En $x=62$ cm detecta el nudo 2 de tracción, nudo 1 del canto 1 y el nudo 2 del canto 2:

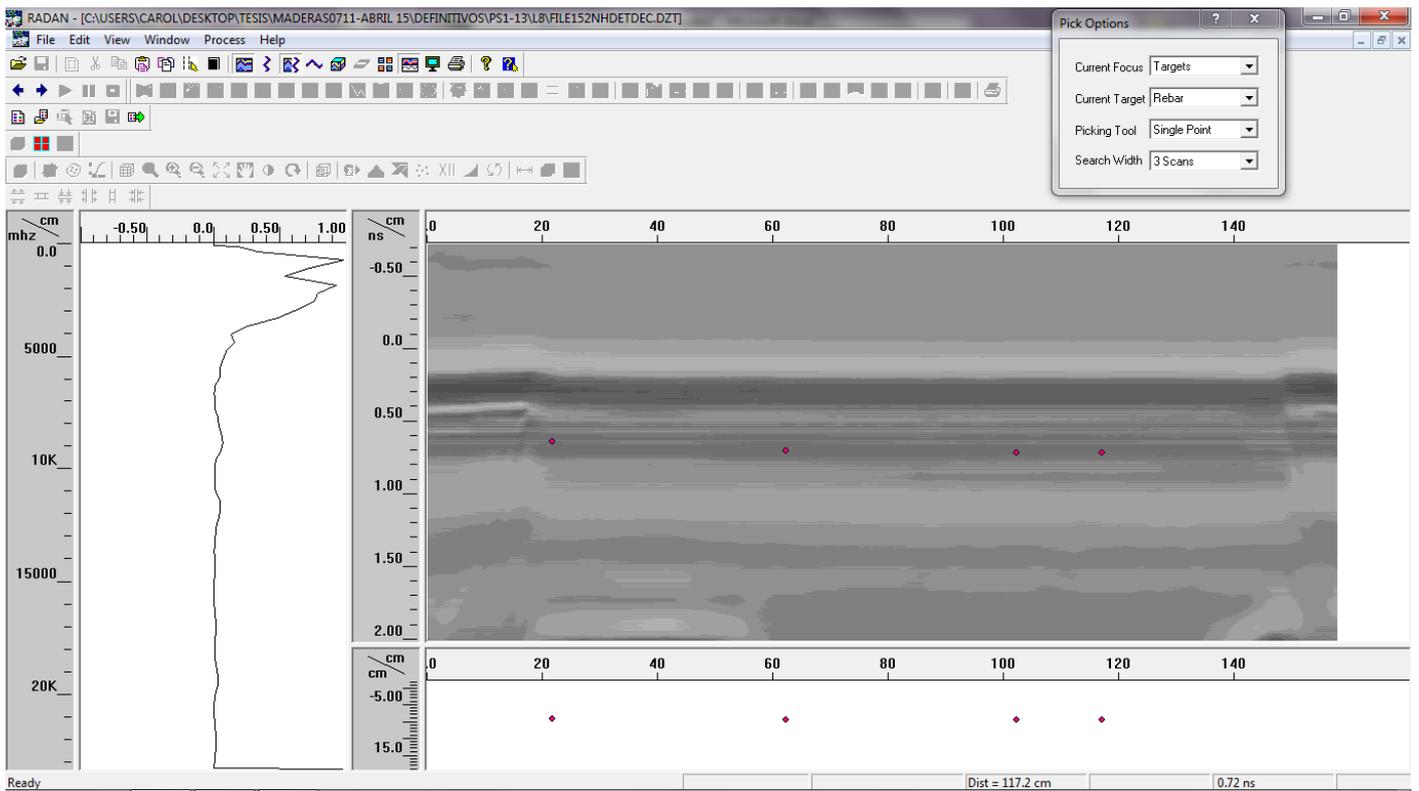


210 TT

En $x=102$ cm detecta los nudos 3 y 4 de tracción, 3 y 4 de compresión y el nudo 2 del canto 2:

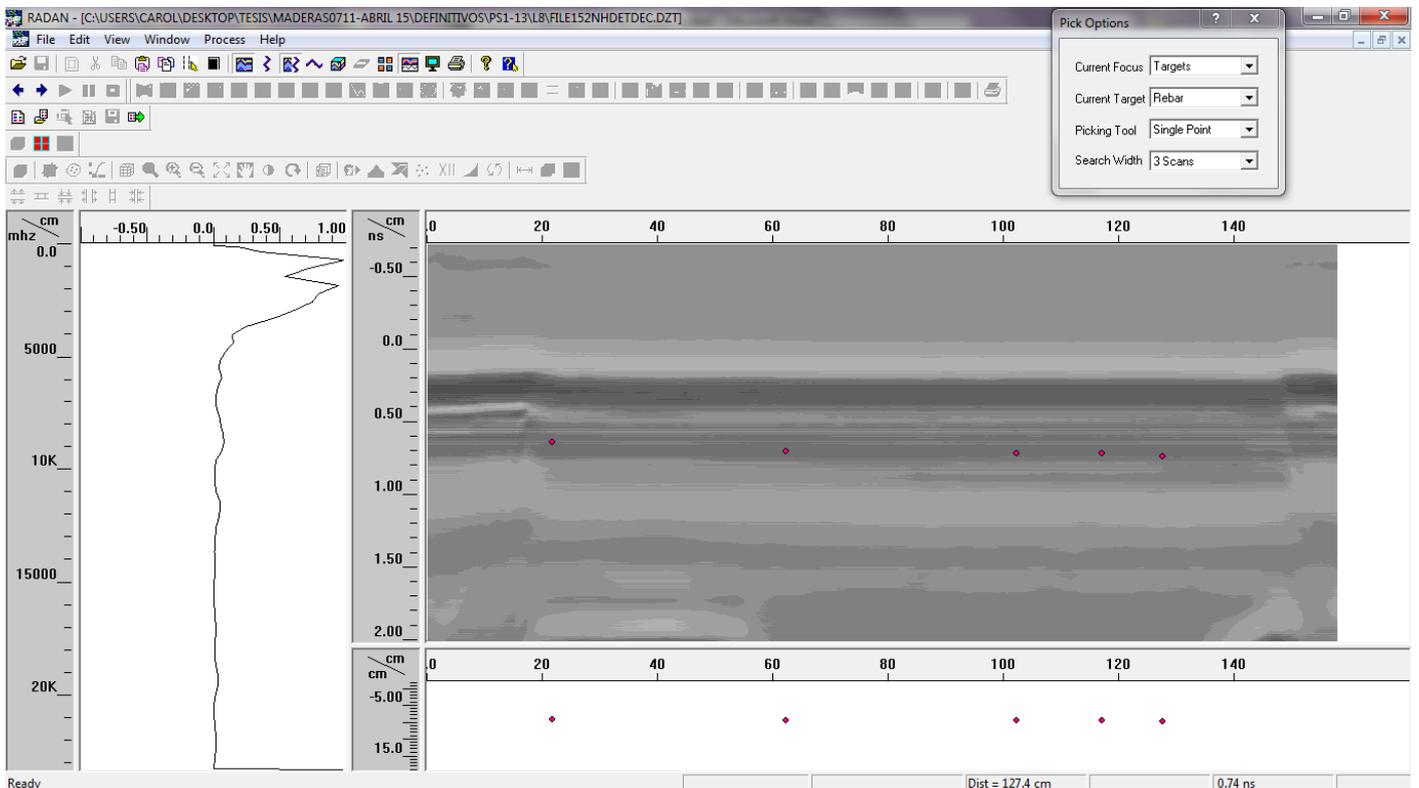


En $x=117$ cm detecta la presencia de alguna singularidad oculta:

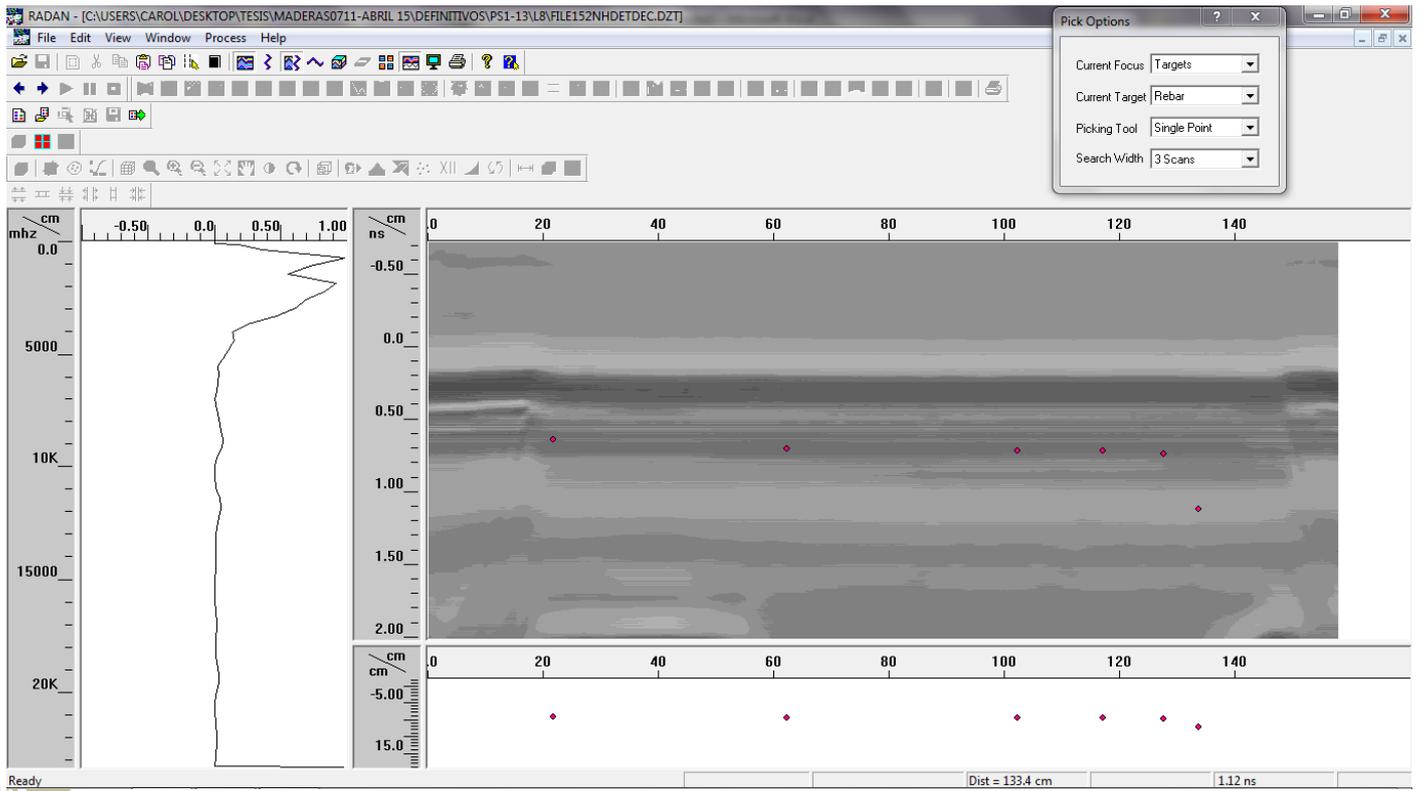


211+

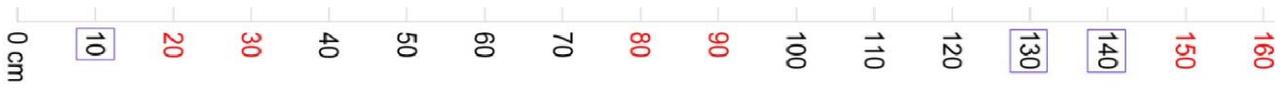
En $x=127$ cm identifica los nudos 5 de compresión y 3 del canto 2:



En $x=133$ cm detecta los nudos 5, 6 y 7 de tracción, el nudo 5 de compresión y el 3 del canto 2:



PS1-19



Cara tracción



Canto 1



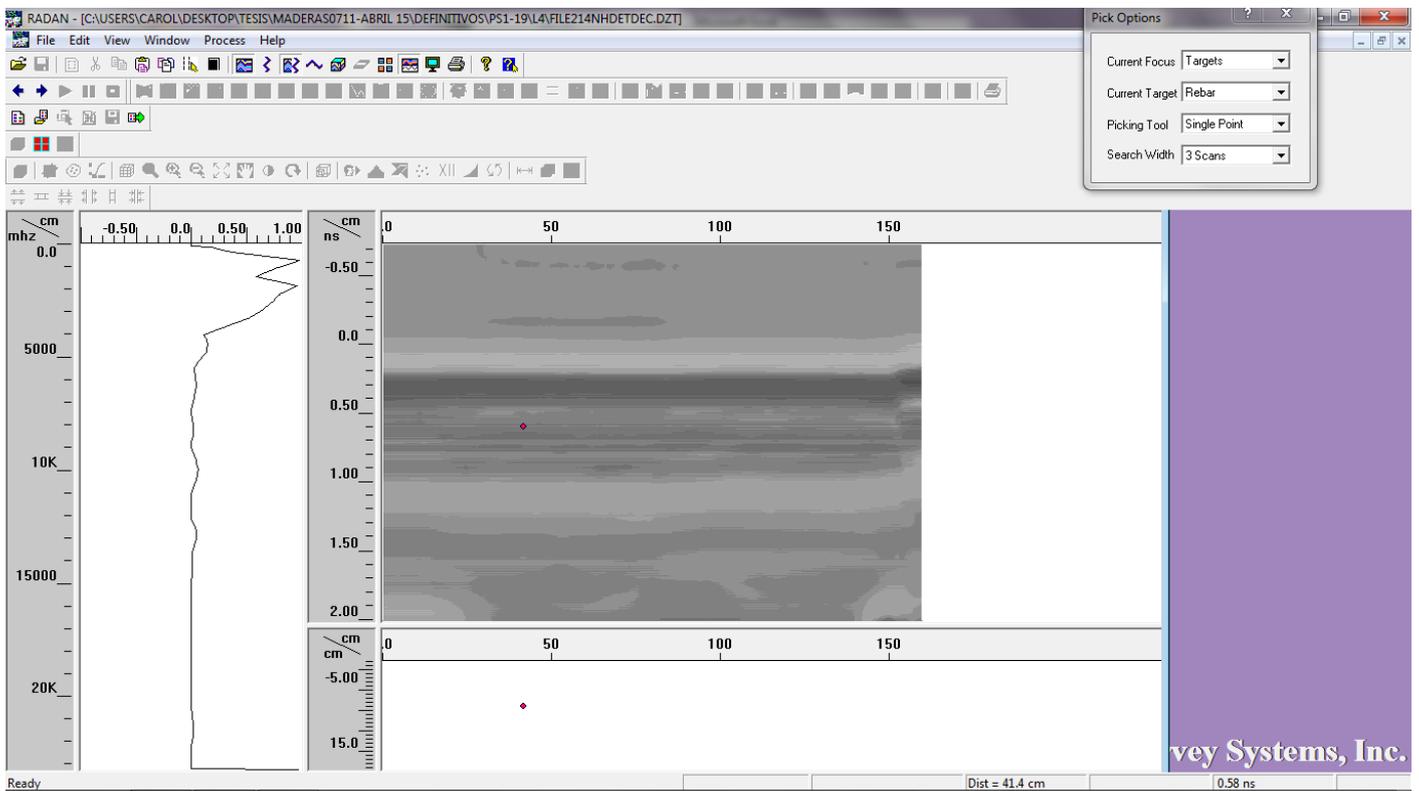
Cara compresión



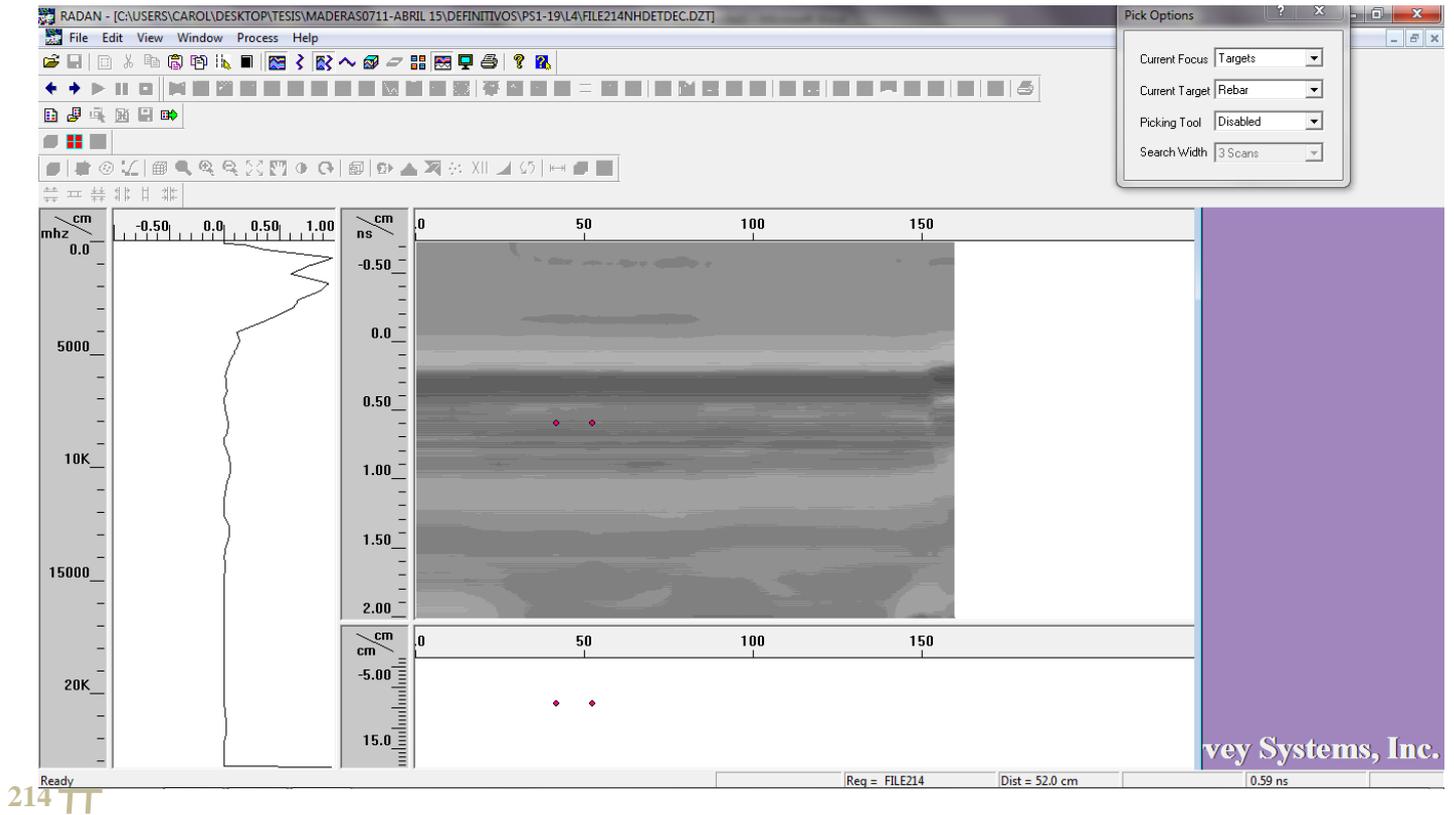
Canto 2

213+

En $x=41$ cm detecta los posibles nudos 3 de compresión y 1 del canto 2:

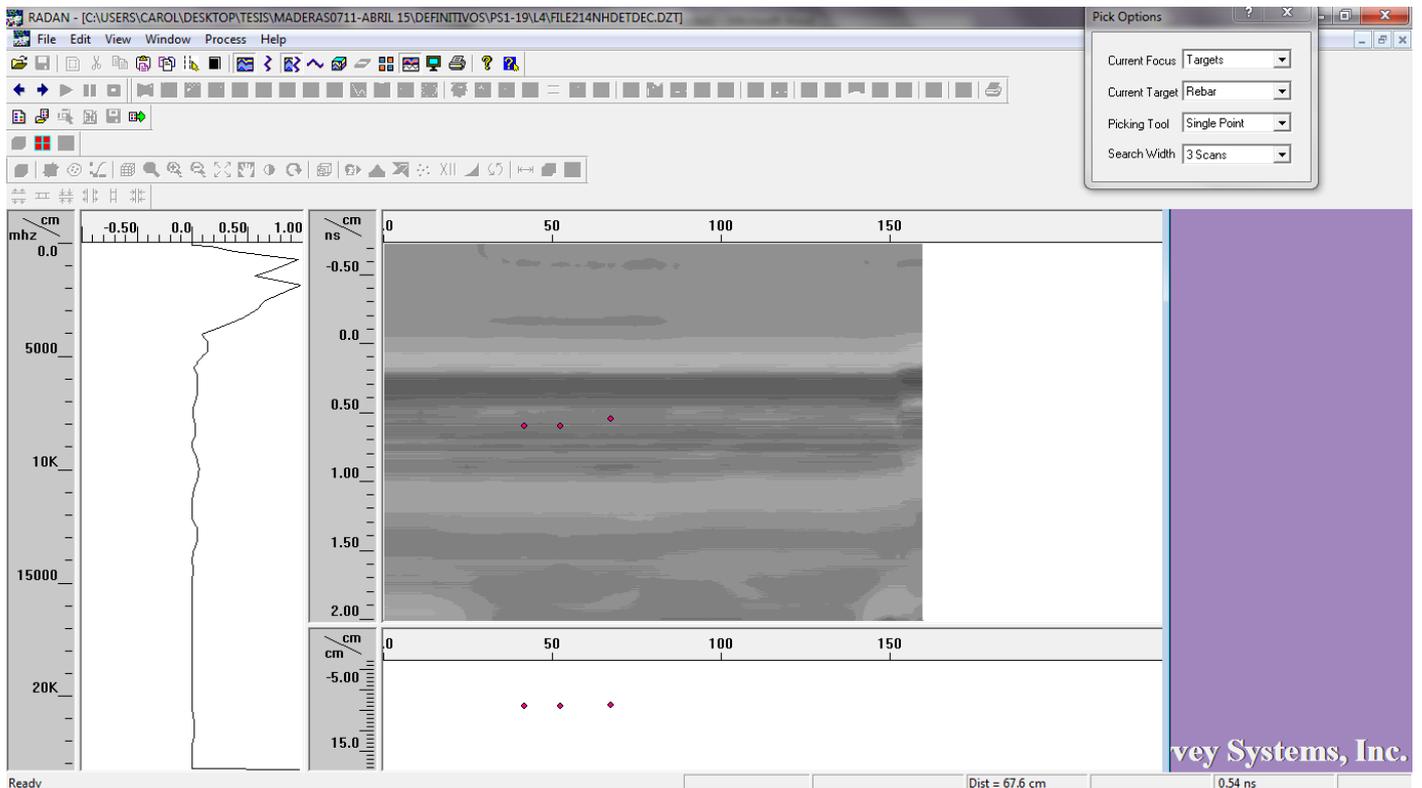


En $x = 52$ cm existe una zona continua de irregularidades ocultas:

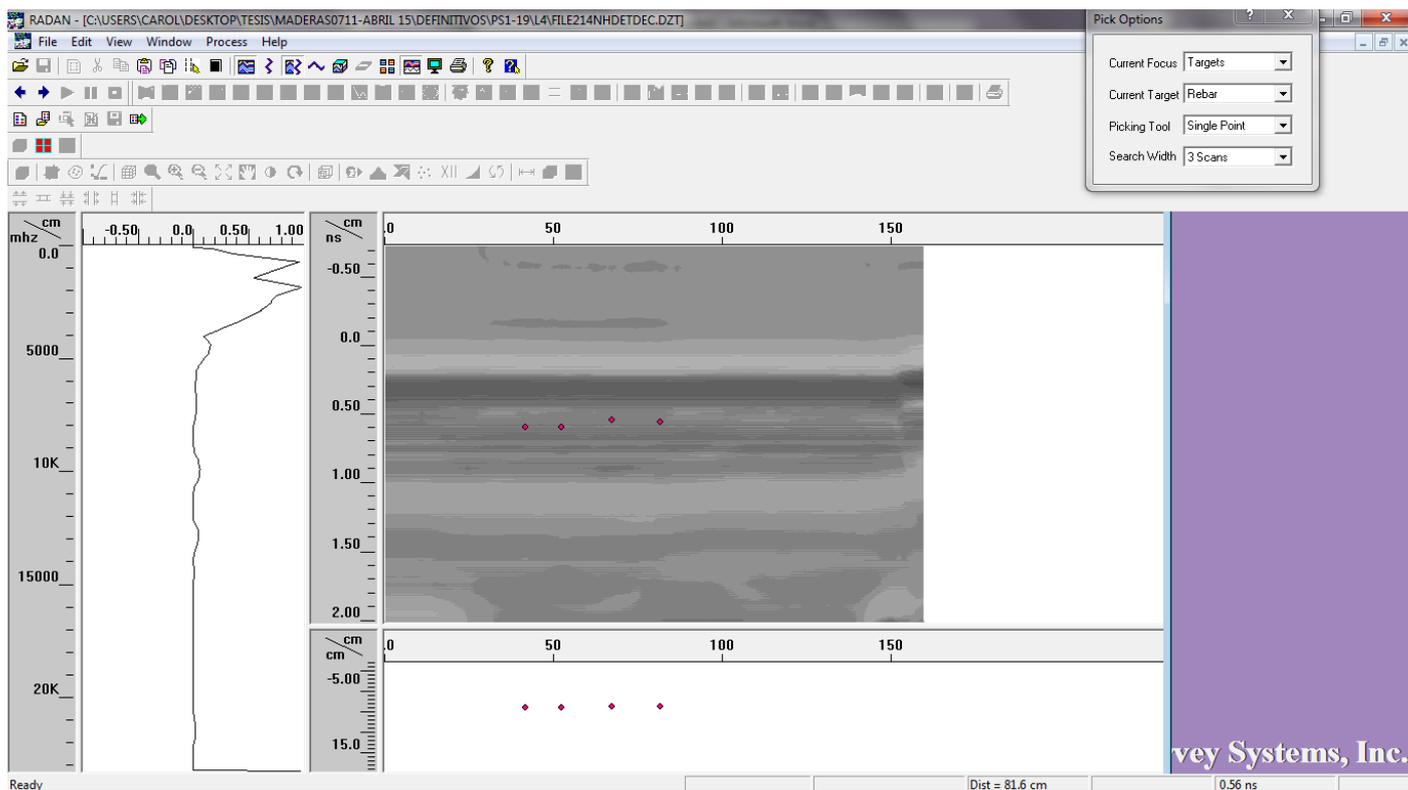


214 TT

En $x = 67$ cm continúan las irregularidades ocultas:

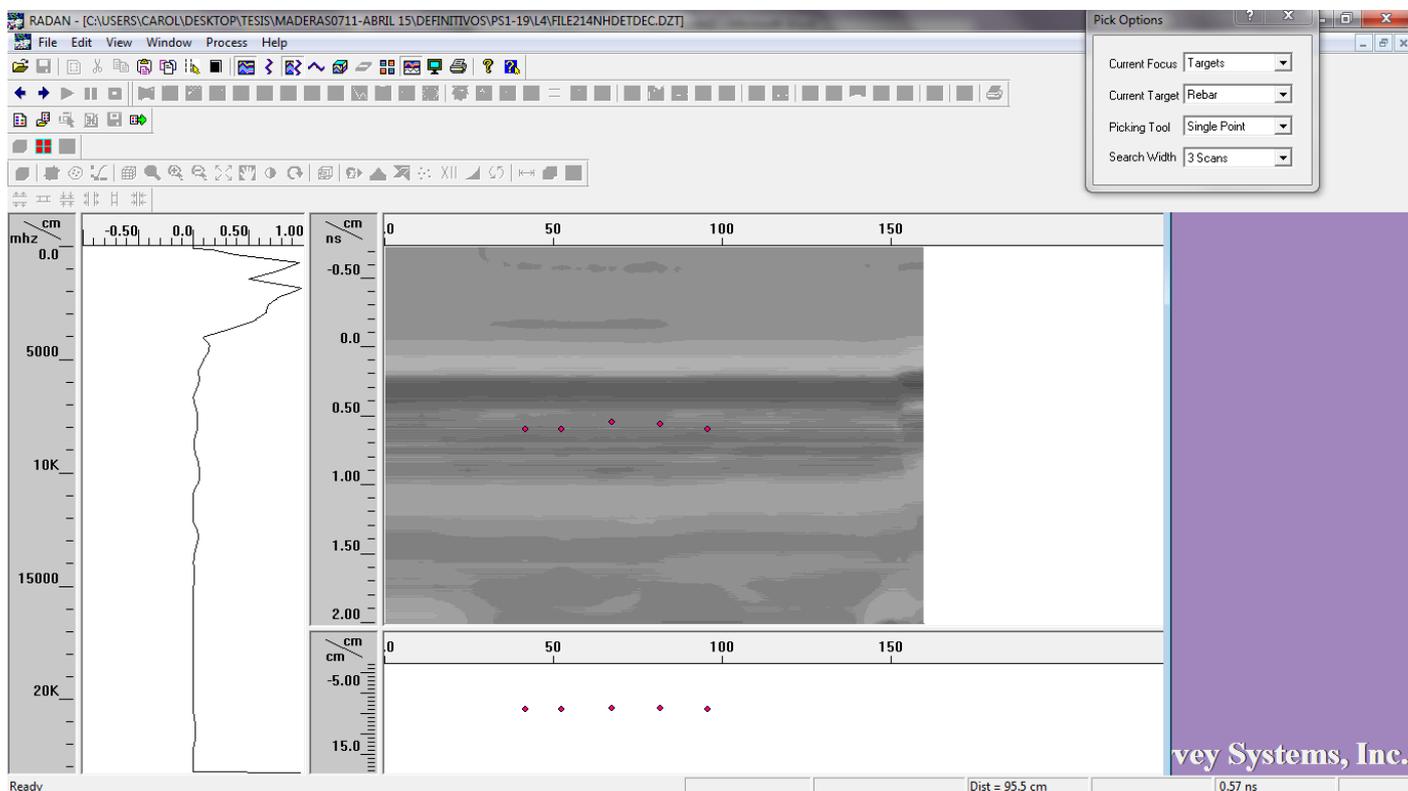


En $x=81$ cm detecta los nudos 4 y 5 de compresión:

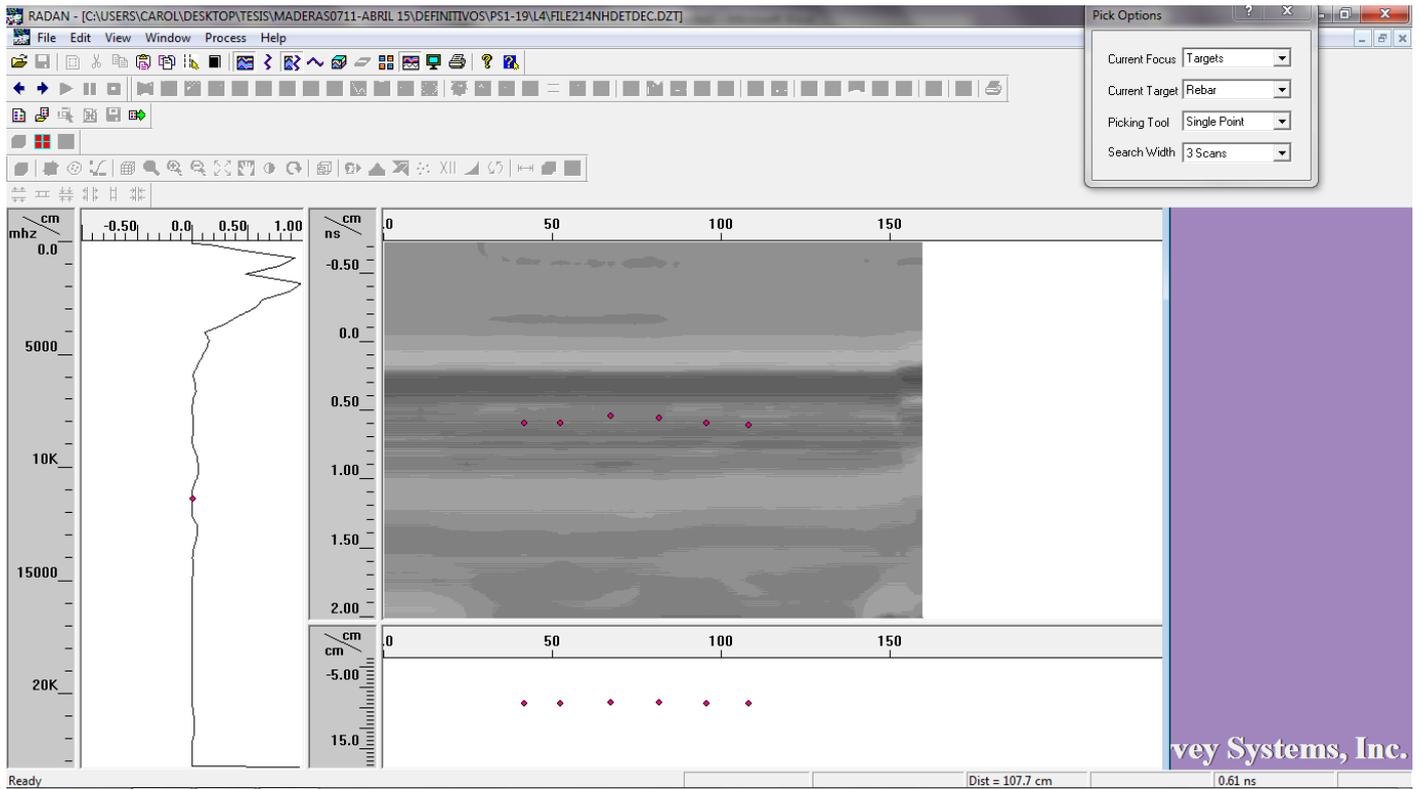


215 †

En $x=95$ cm detecta una zona de defectos ocultos:

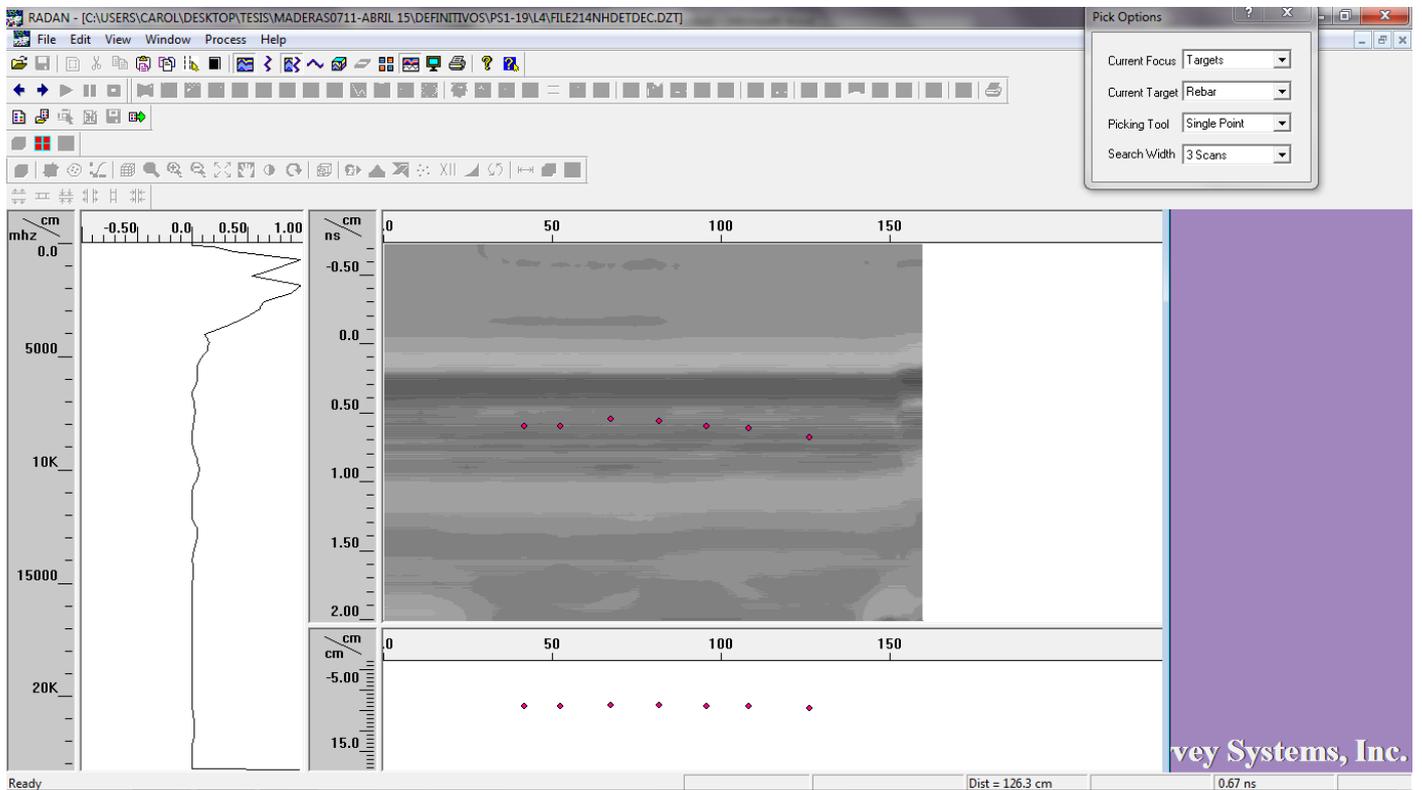


En $x=108$ cm sigue detectando algo oculto:



216 TT

En $x=126$ cm detecta el nudo 6 de compresión:



PS1-25



Cara tracción



Canto 1



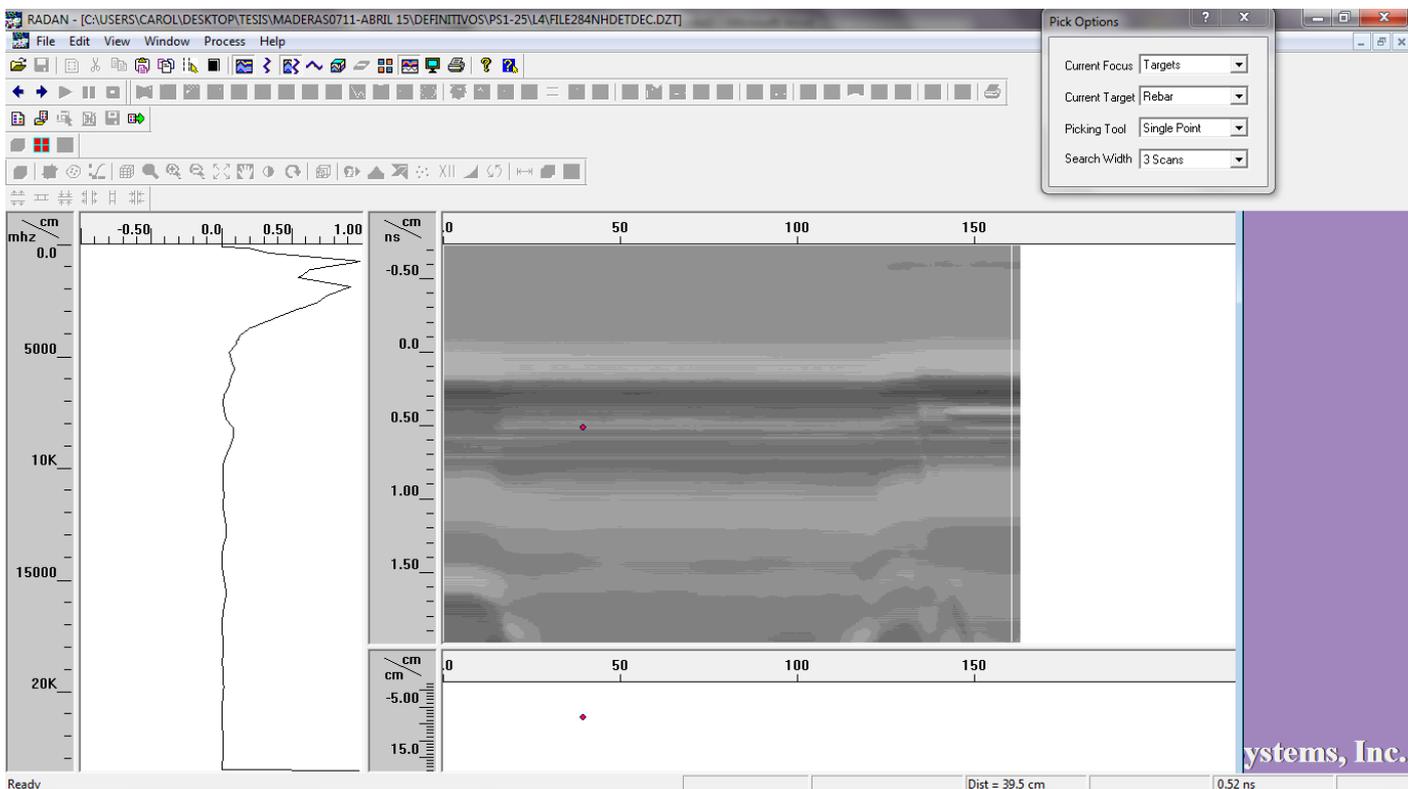
Cara compresión



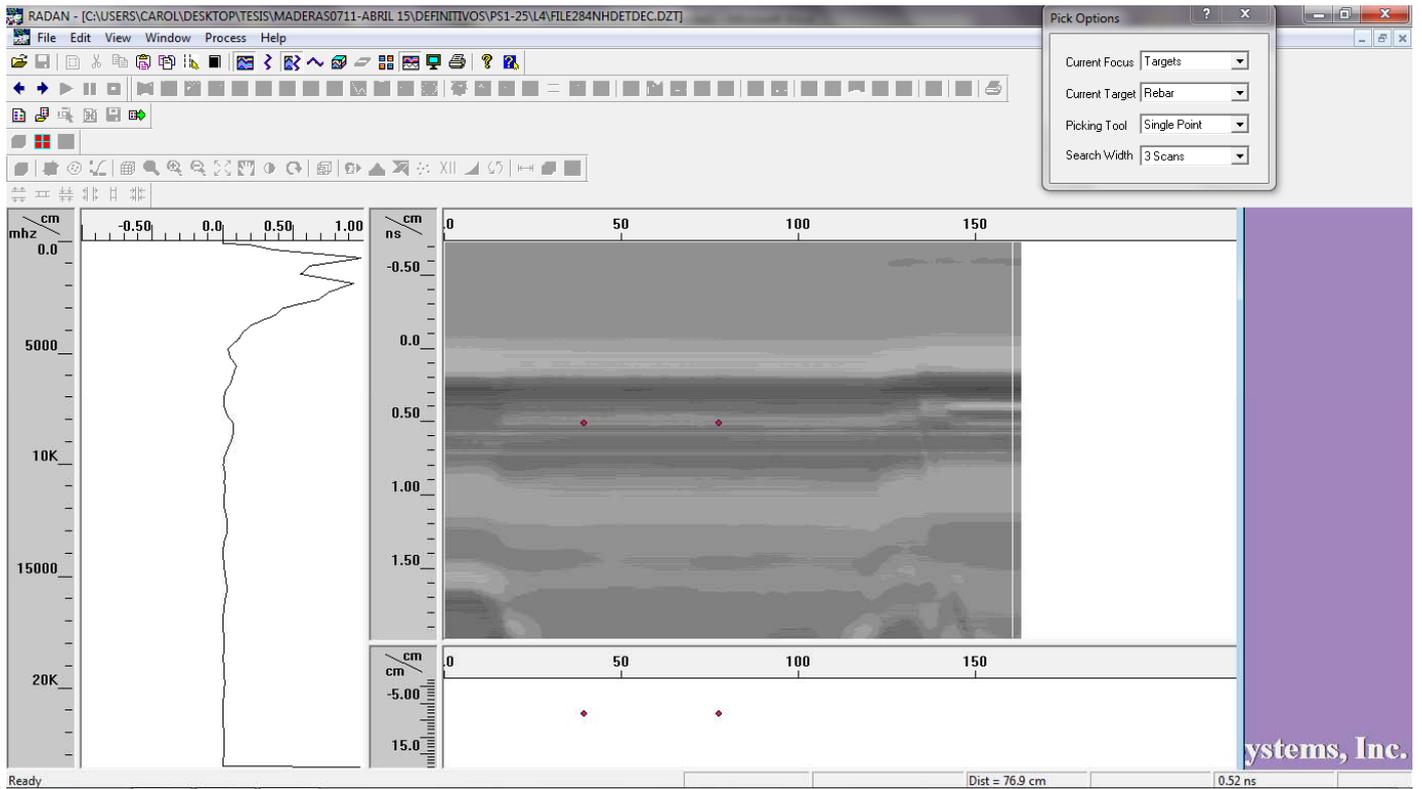
Canto 2

217 †

En $x=39,5$ cm detecta los nudos 1 y 2 de tracción, el nudo 1 del canto 1, el nudo 1 de compresión y el nudo 1 del canto 2:

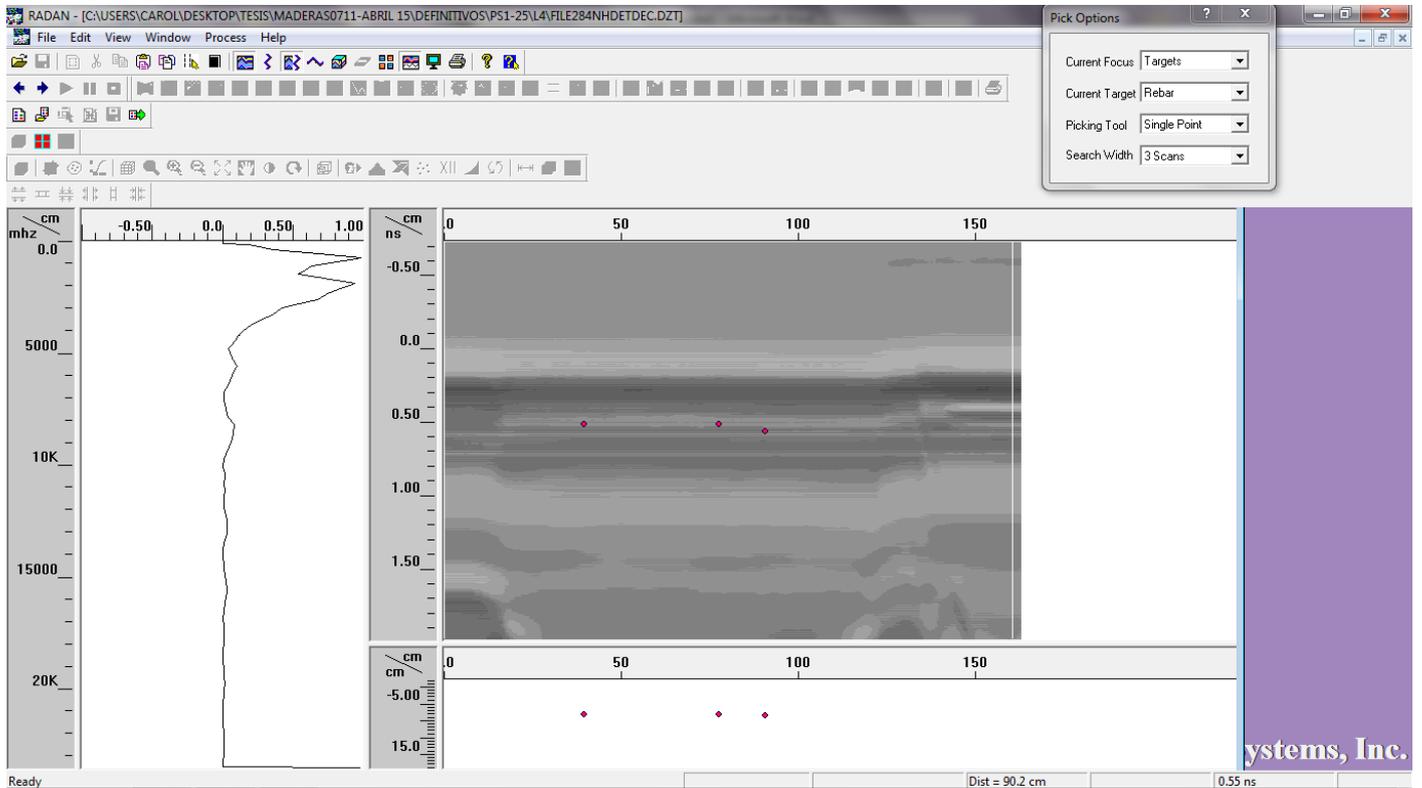


En $x=77$ cm detecta los nudos 3 y 4 tracción:

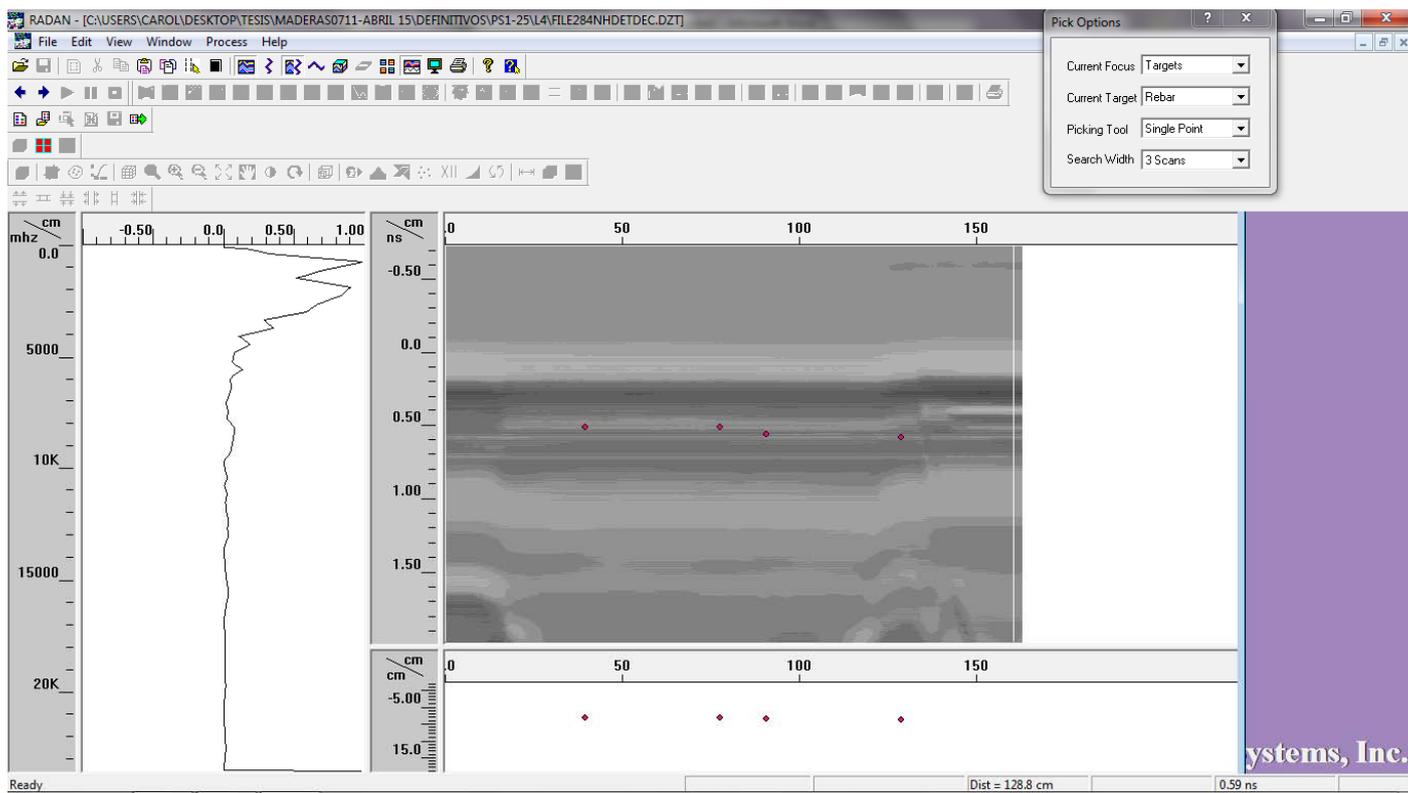


218 TT

En $x=90$ cm detecta alguna irregularidad oculta:



En $x=128$ cm detecta el nudo 5 de tracción:



PS1-26



Cara tracción



Canto 1



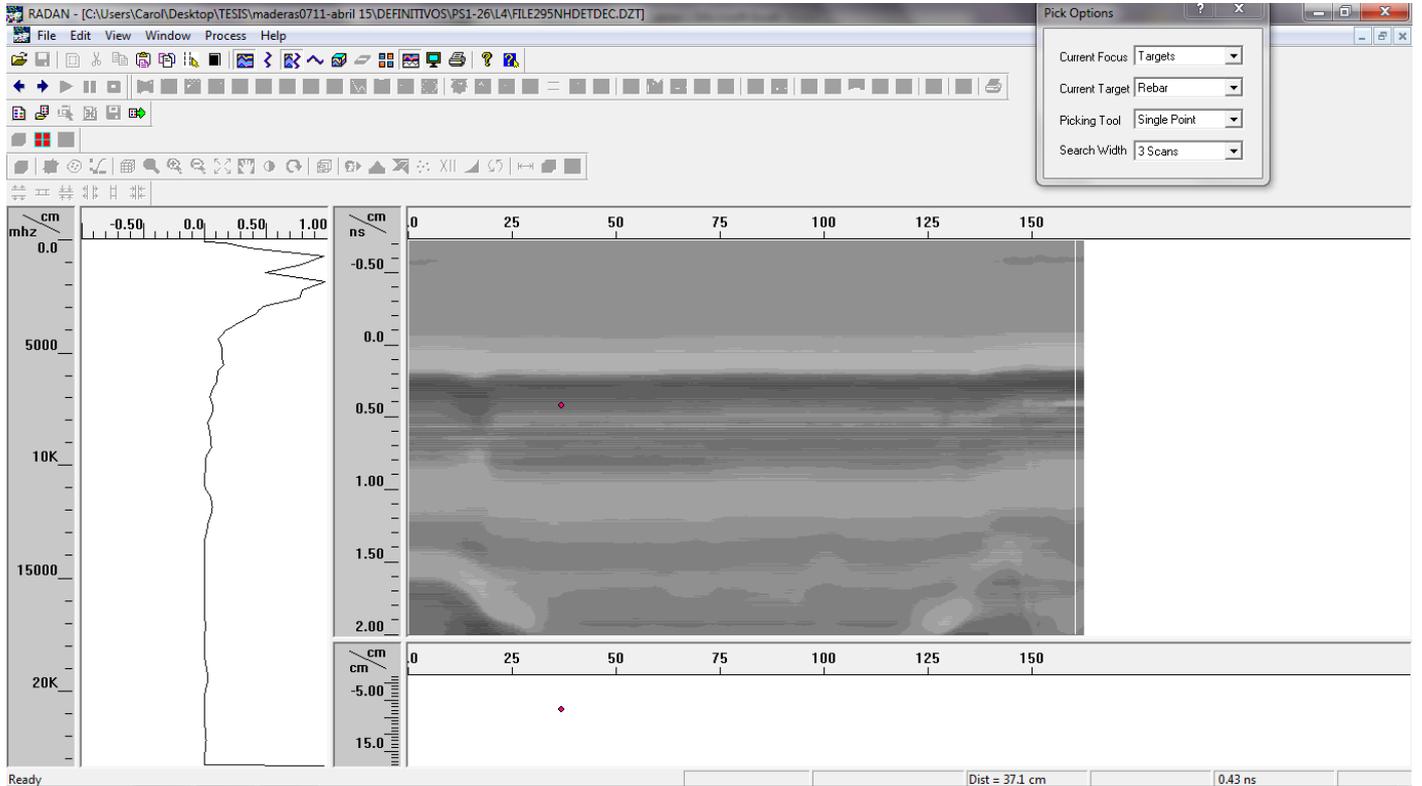
Cara compresión



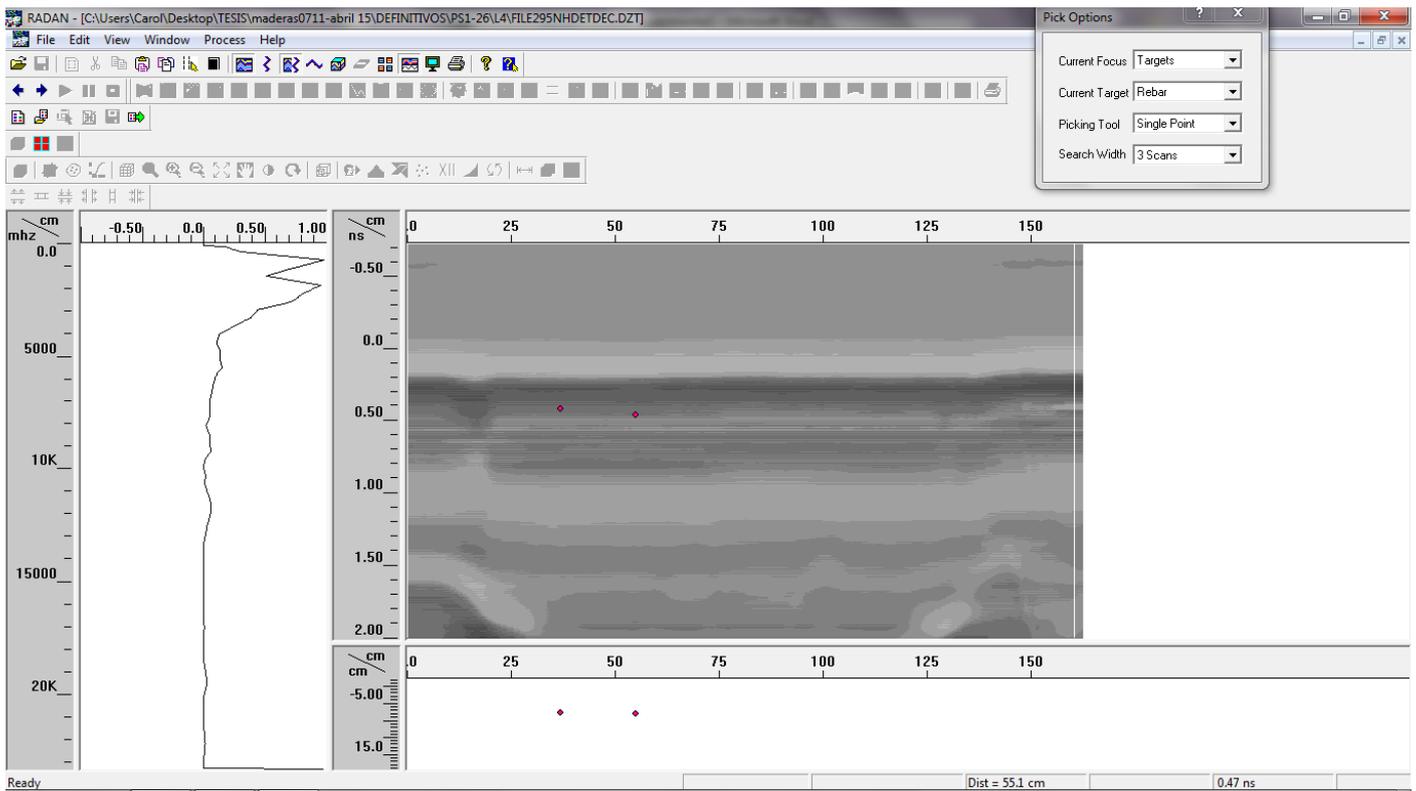
Canto 2

220 †

En $x=37$ cm detecta alguna irregularidad oculta:

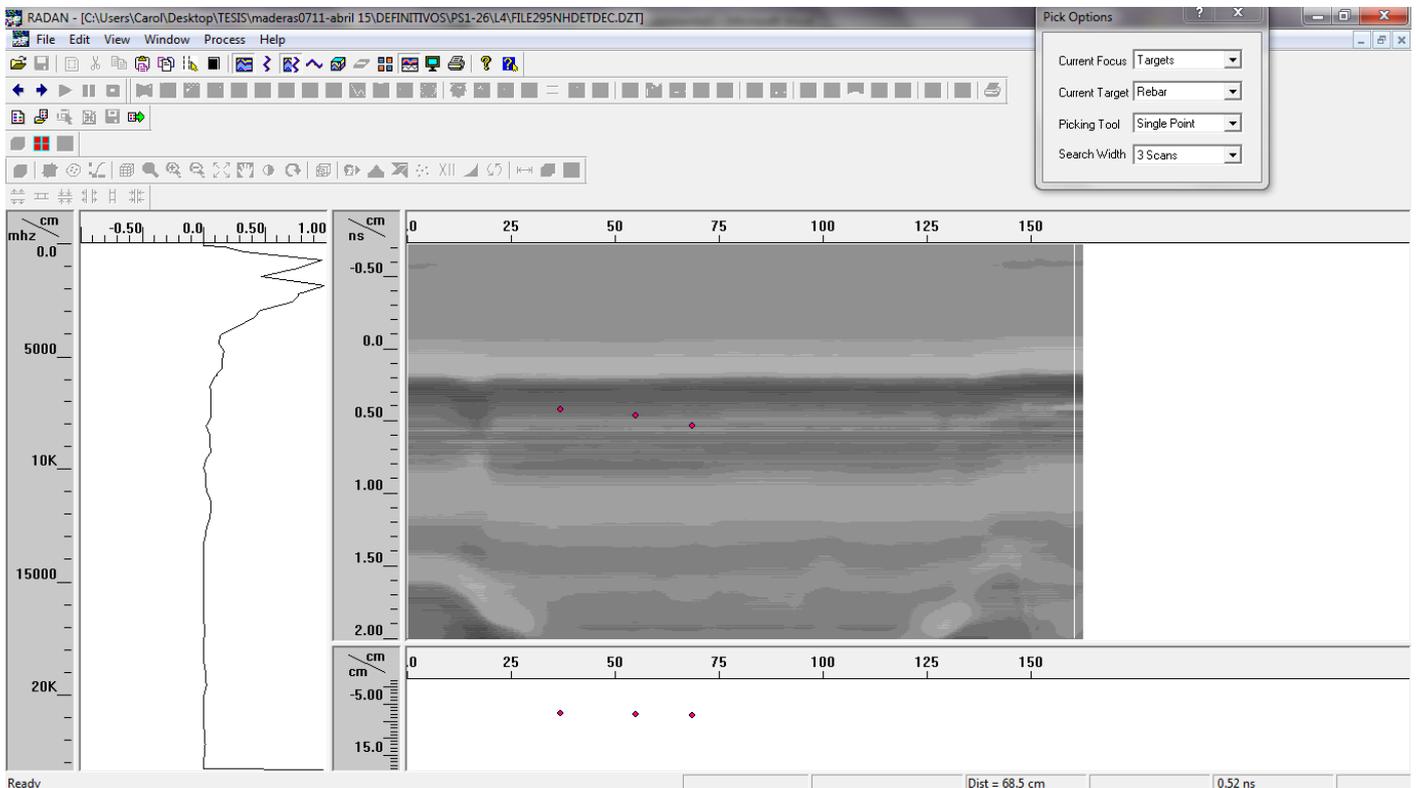


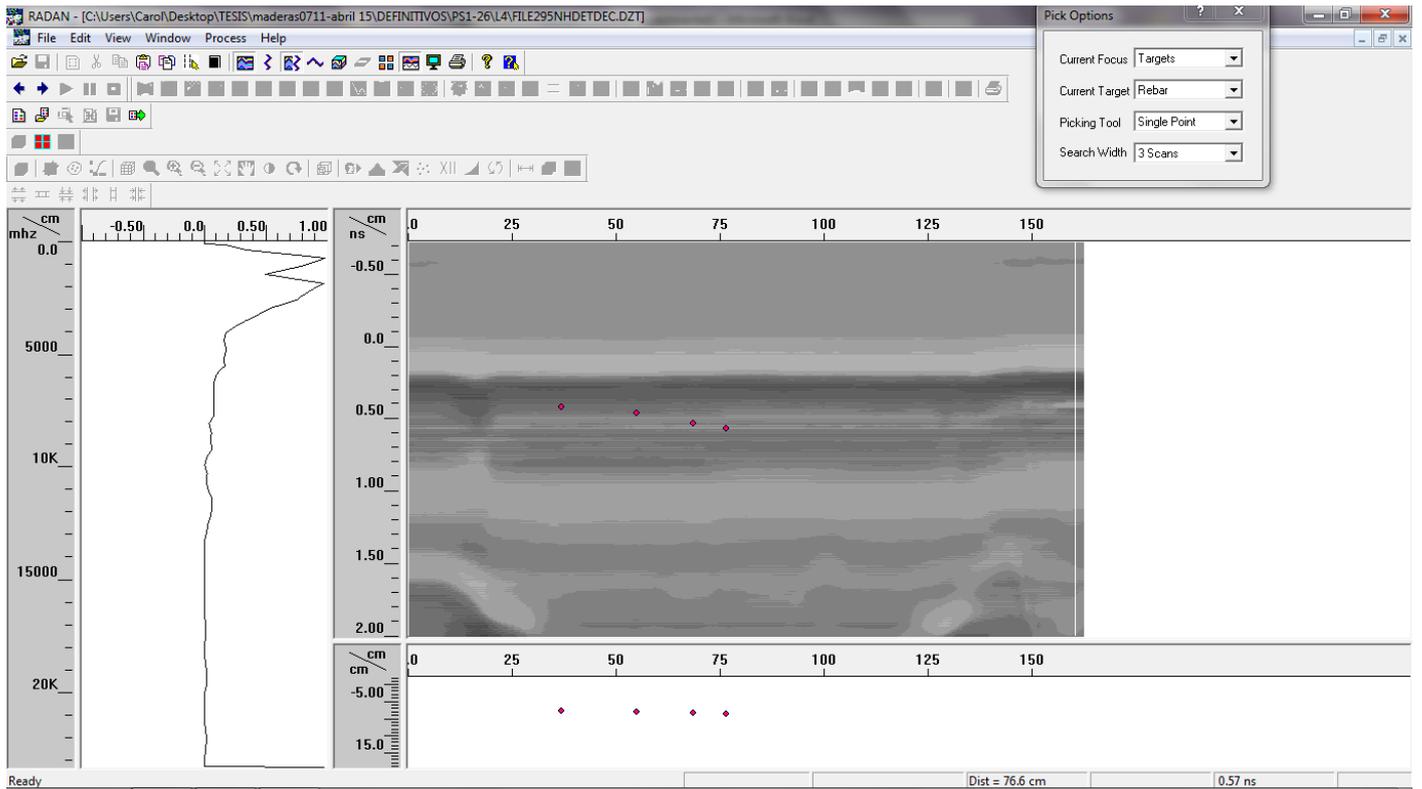
Dichas regularidades continúan hasta $x=55$ cm:



221 †

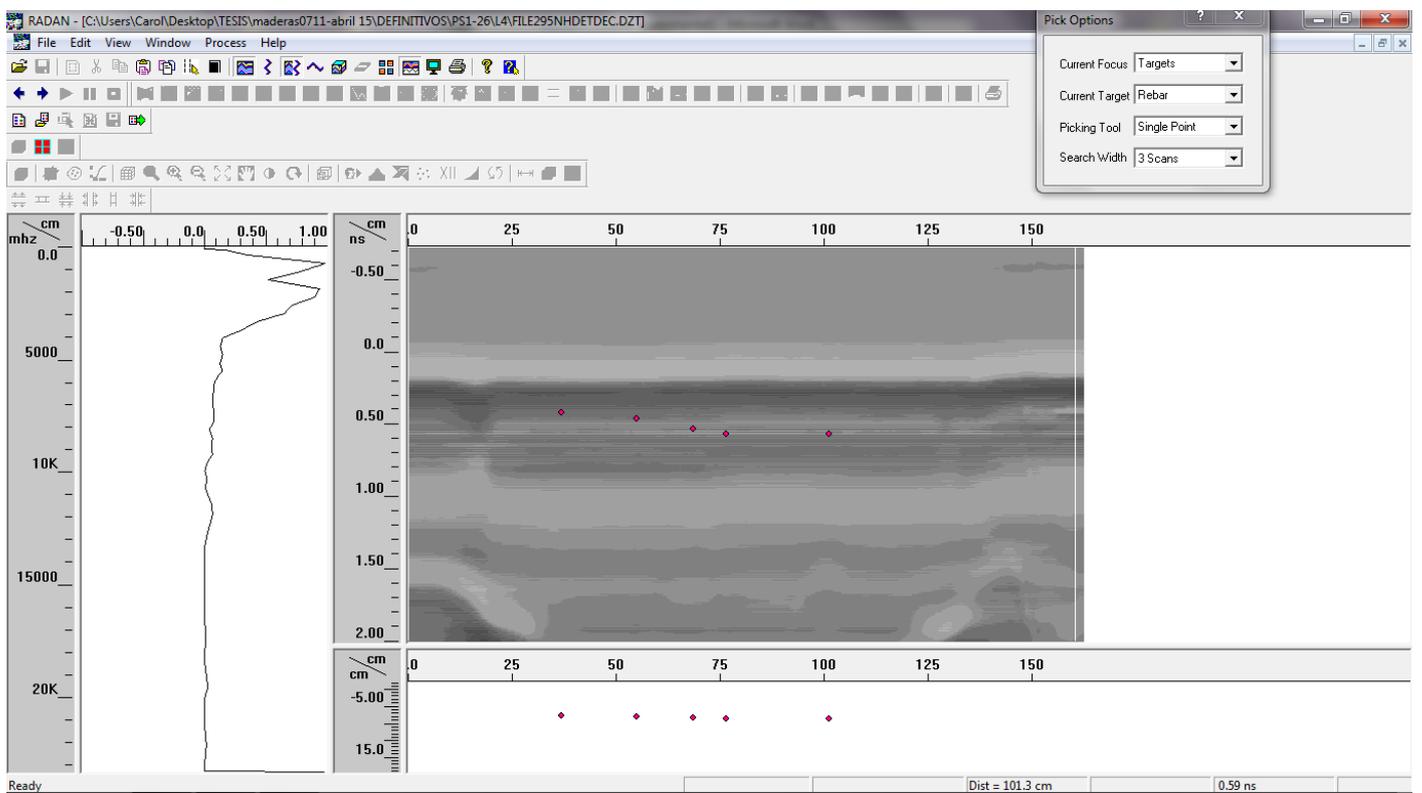
En $x=68$ cm detecta los nudos 3 y 4 de tracción, y 3 y 4 de compresión:



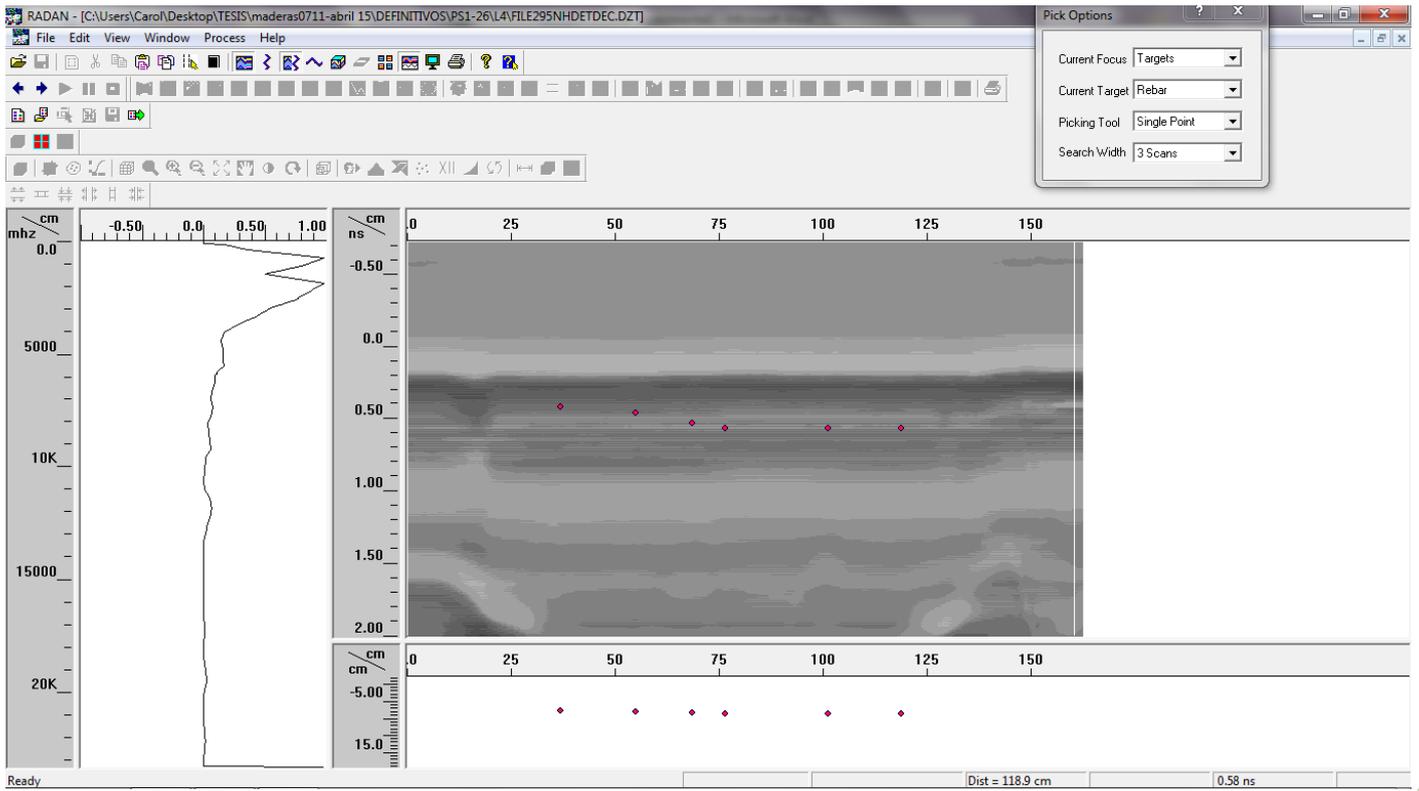


En $x=100$ cm detecta la presencia de irregularidades ocultas:

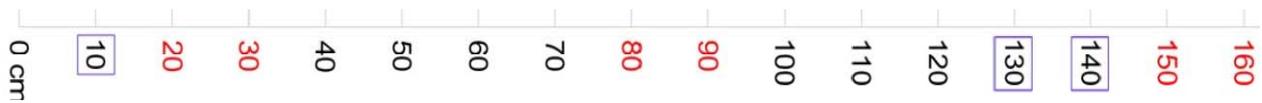
222



En x=117 cm detecta los nudos 5 de tracción, 1 del canto 1 y 5 de compresión:



PS1-28



Cara tracción



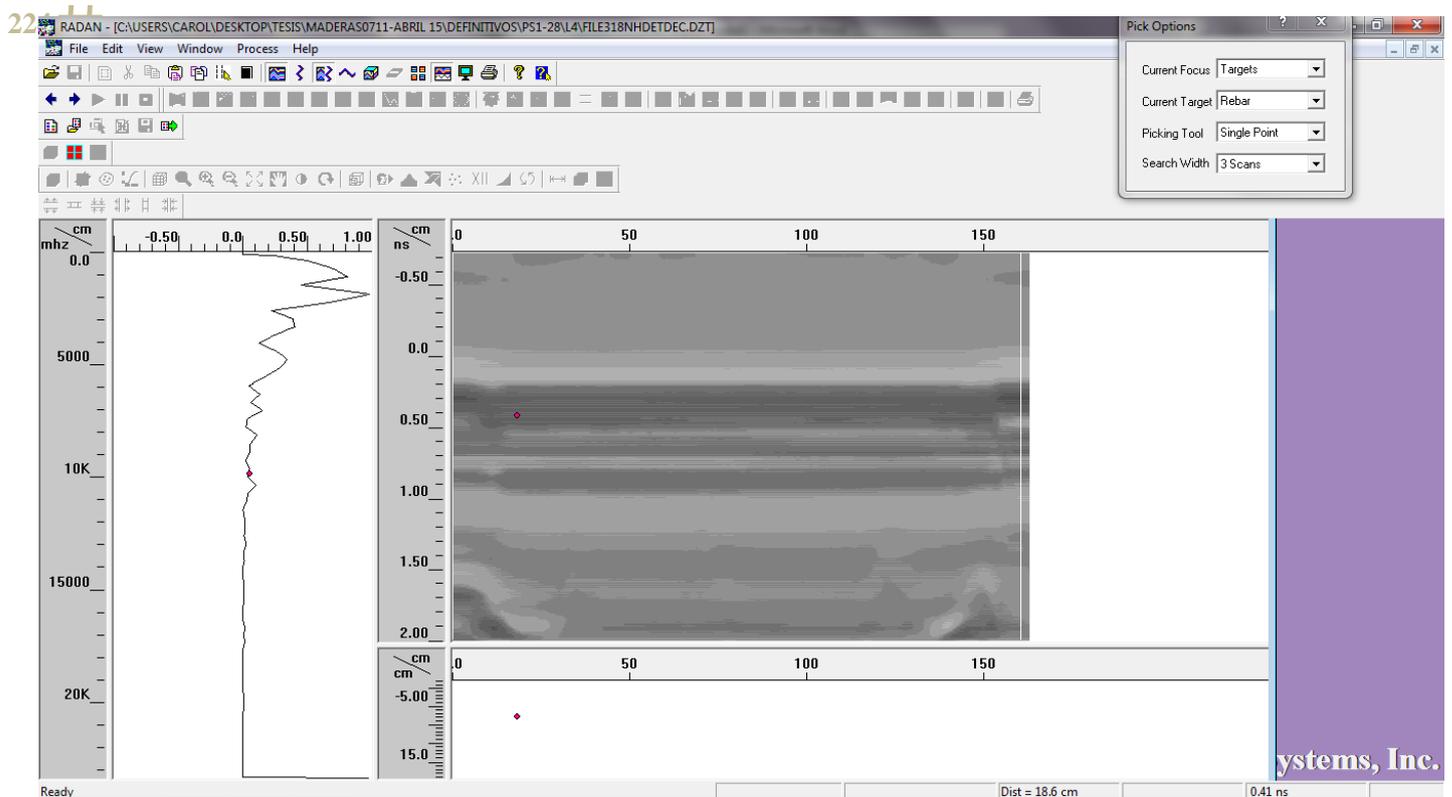
Canto 1



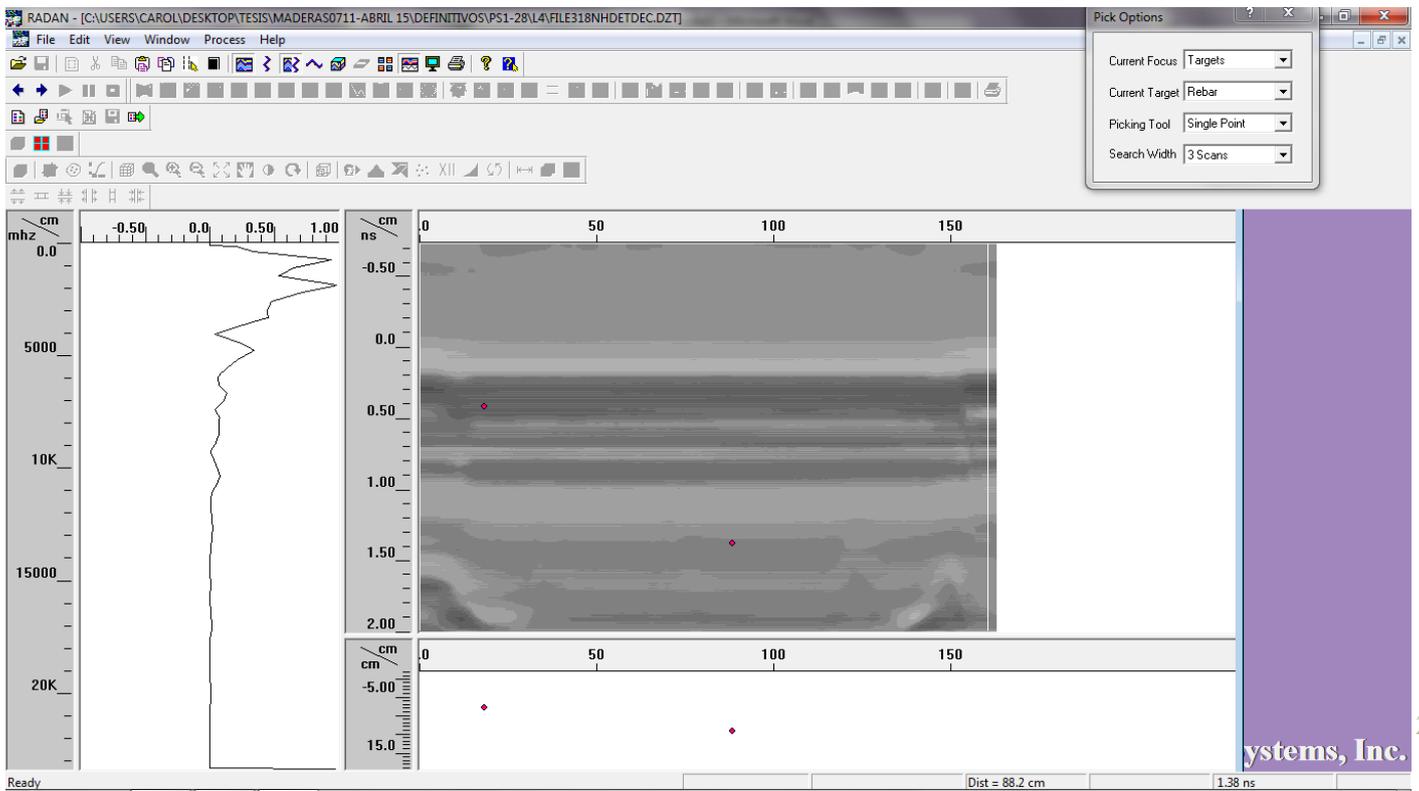
Cara compresión



En $x=18,6$ cm detecta la presencia de una irregularidad, ya que se produce un cambio en la inclinación del primer pico:

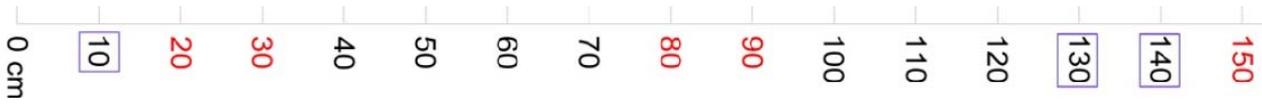


En $x=88$ cm detecta los nudos 4 y 5 de tracción, y 4 y 5 de compresión:



A.1.2. Análisis de las vigas del grupo PS2

PS2-3



Cara tracción



Canto 1

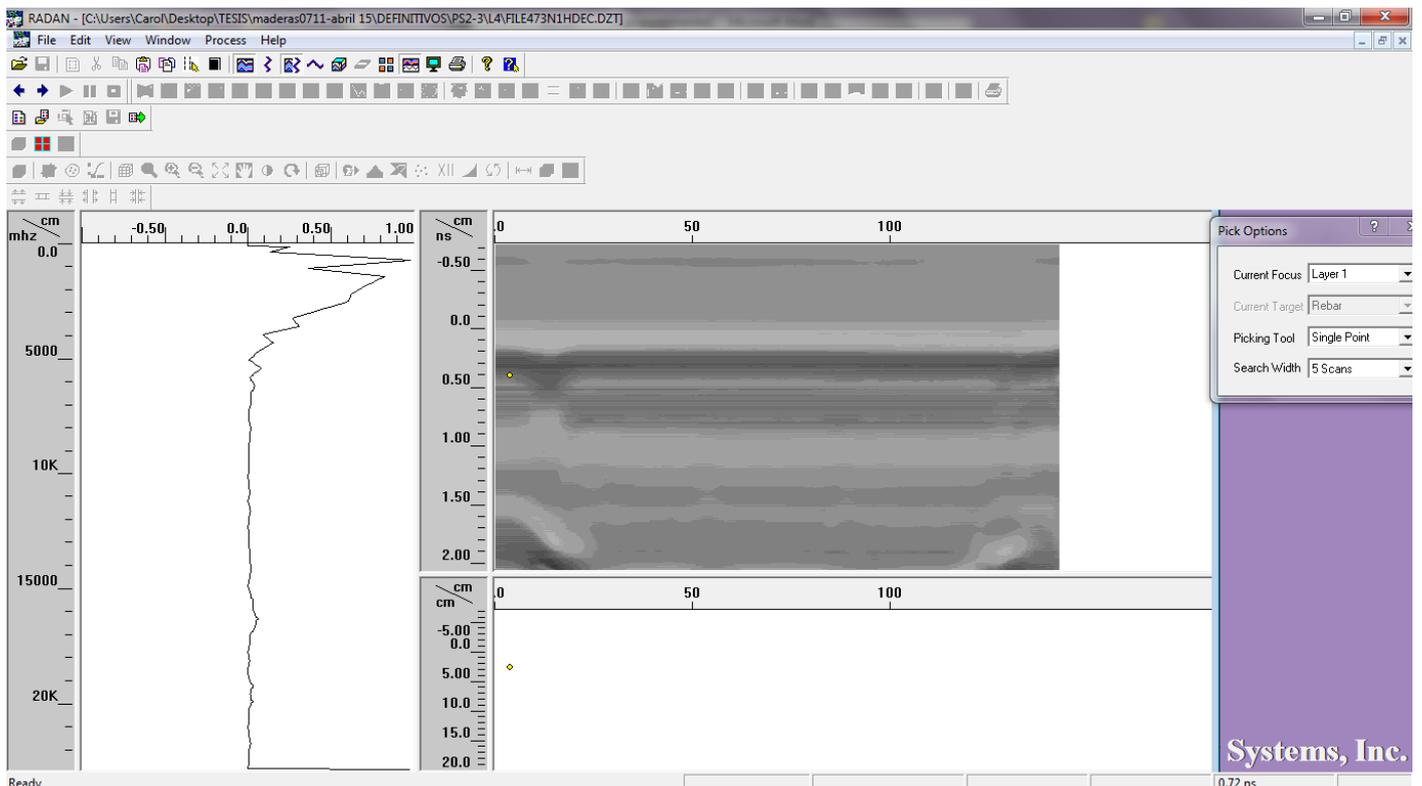


Cara compresión

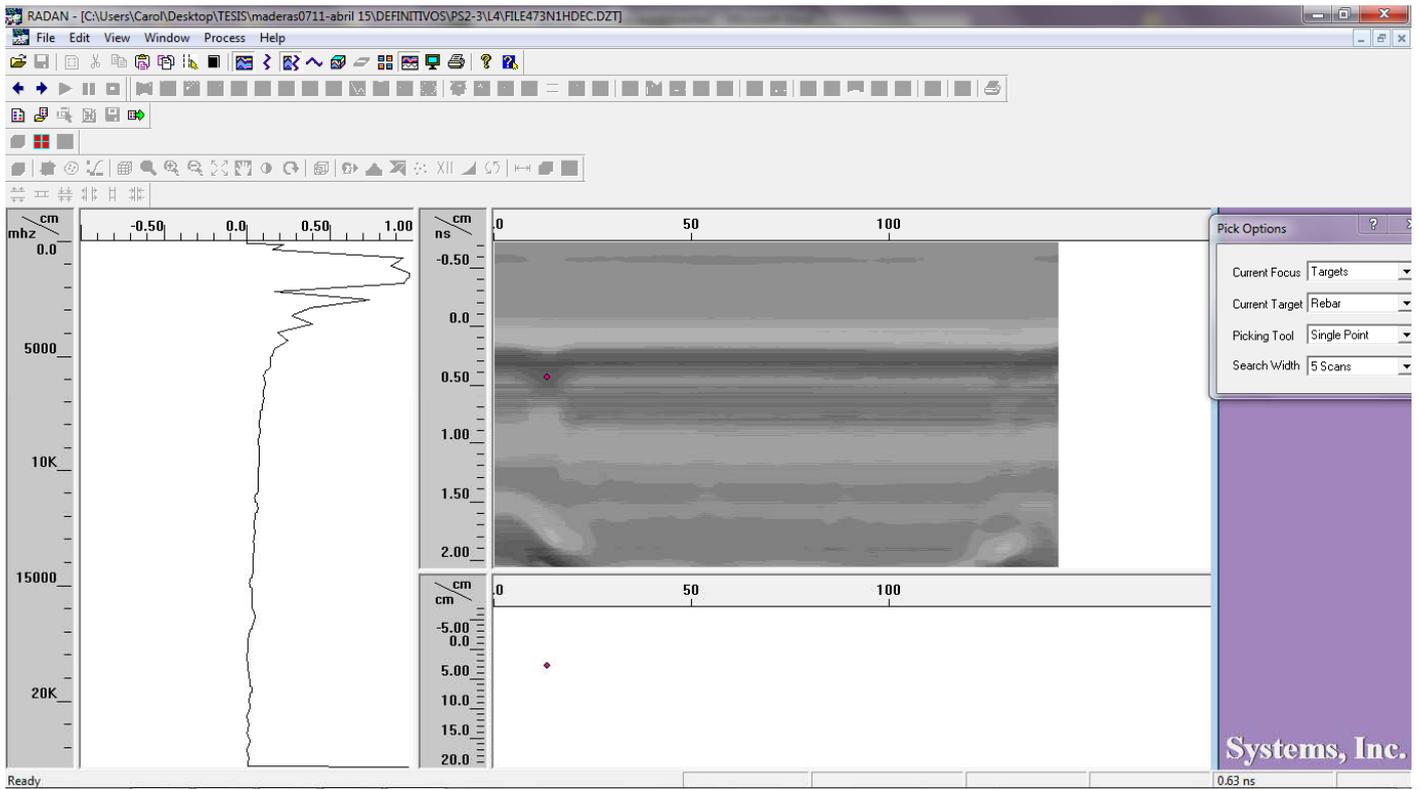


Canto 2

En $x = 3.9$ cm no detecta ningún nudo:

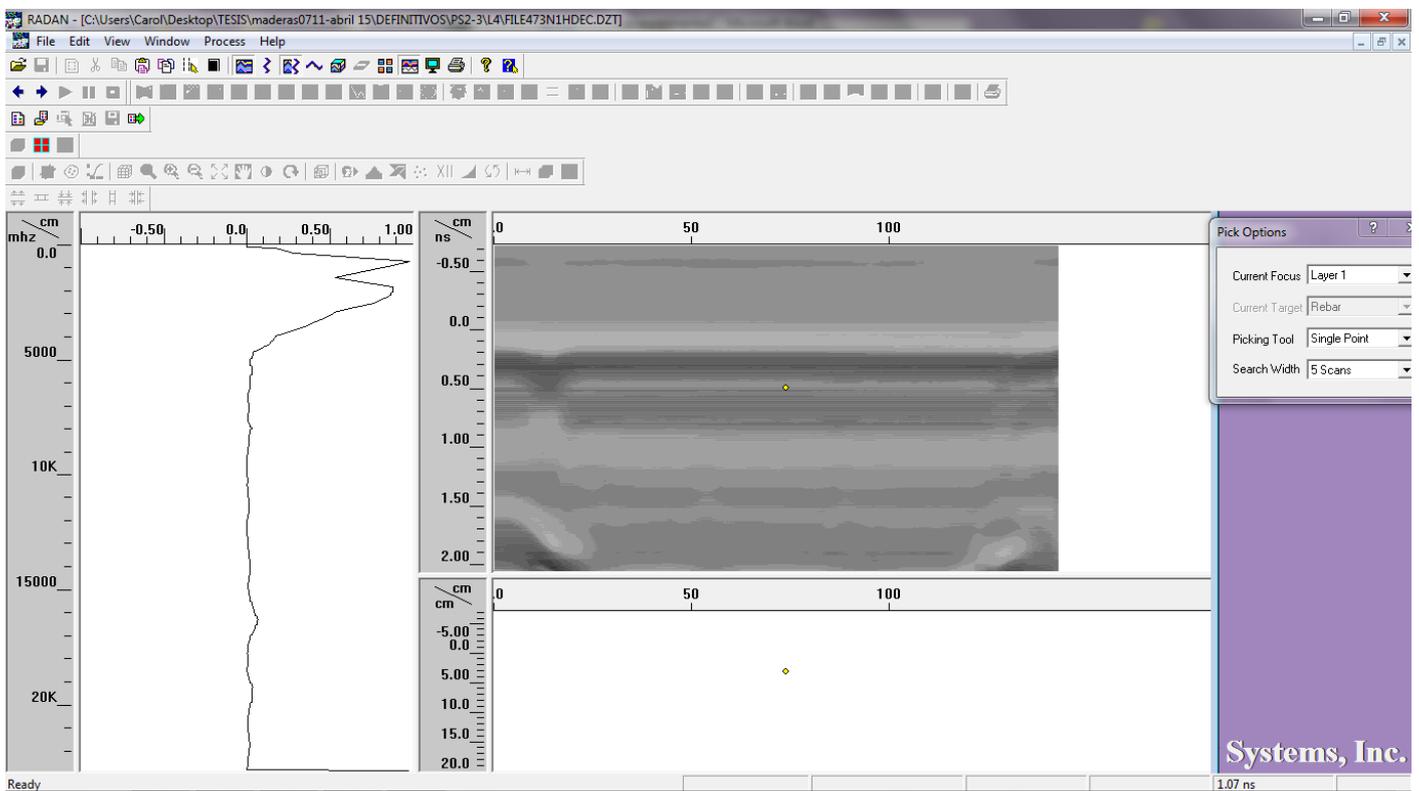


La primera singularidad se detecta en $x = 13.3$ cm, correspondiente a los nudos 1 y 2 de tracción:

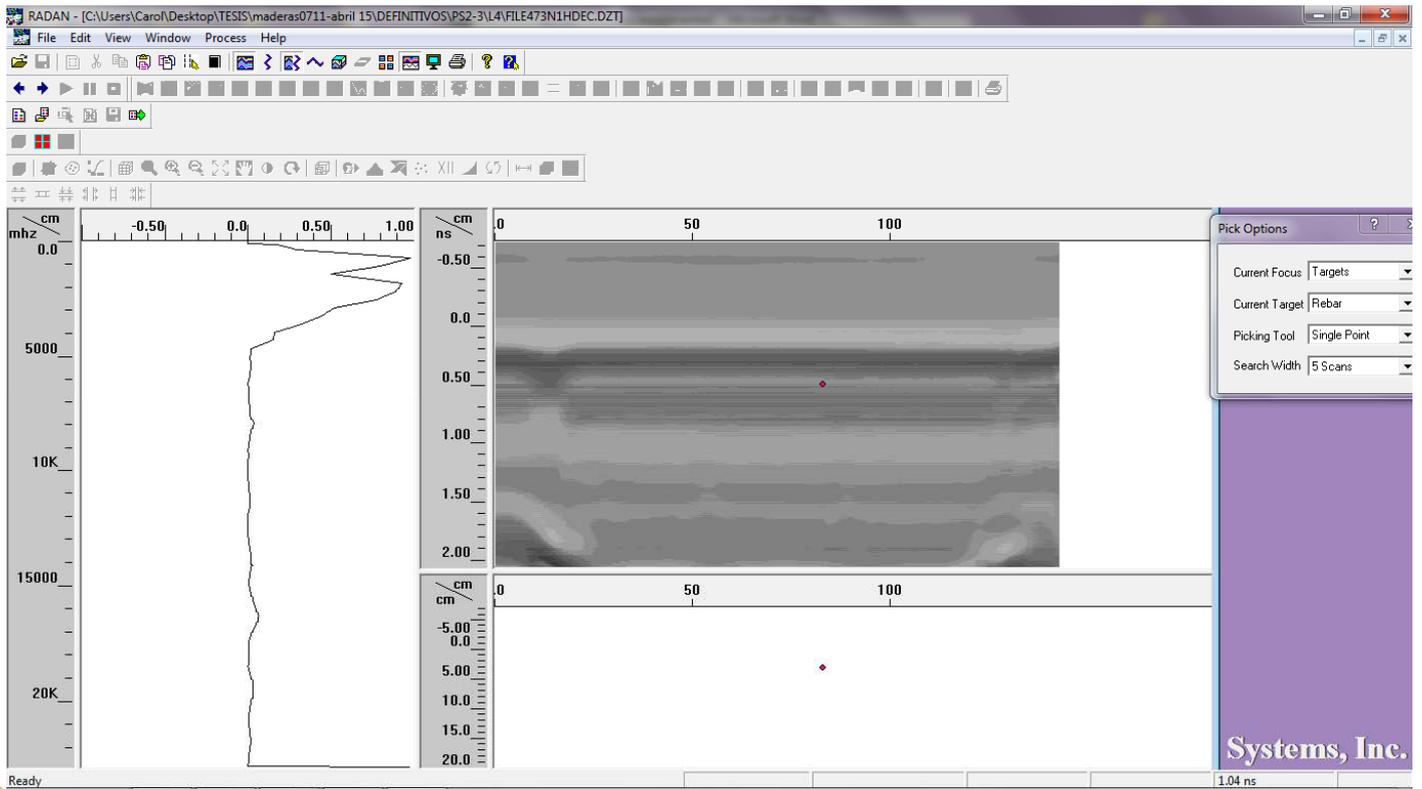


227 †

En $x = 26$ cm cambia la grafica del espectrograma y se mantiene hasta $x = 70$ cm sin detectar irregularidades:

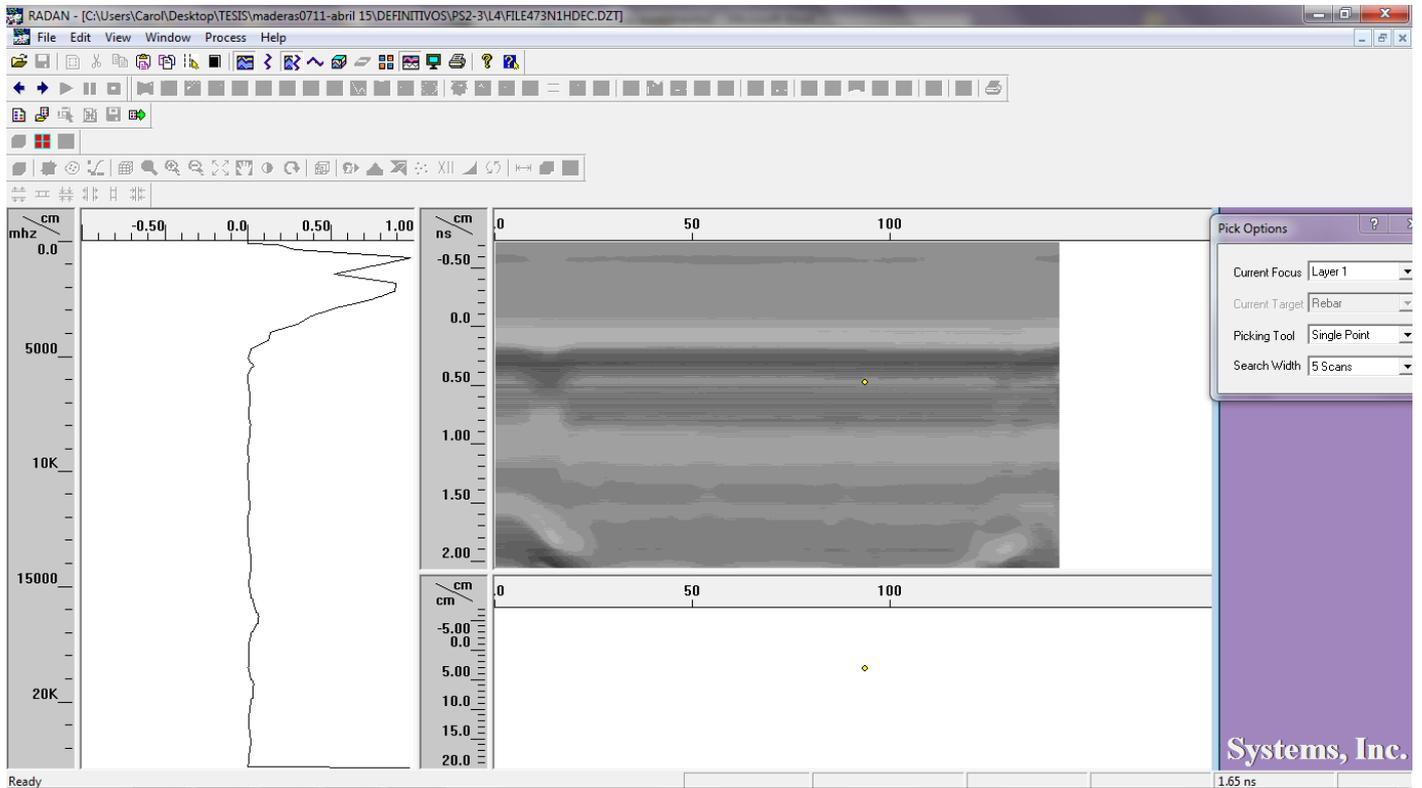


En el punto $x = 84,2$ cm hay un cambio en los picos, lo cual indica una irregularidad oculta:

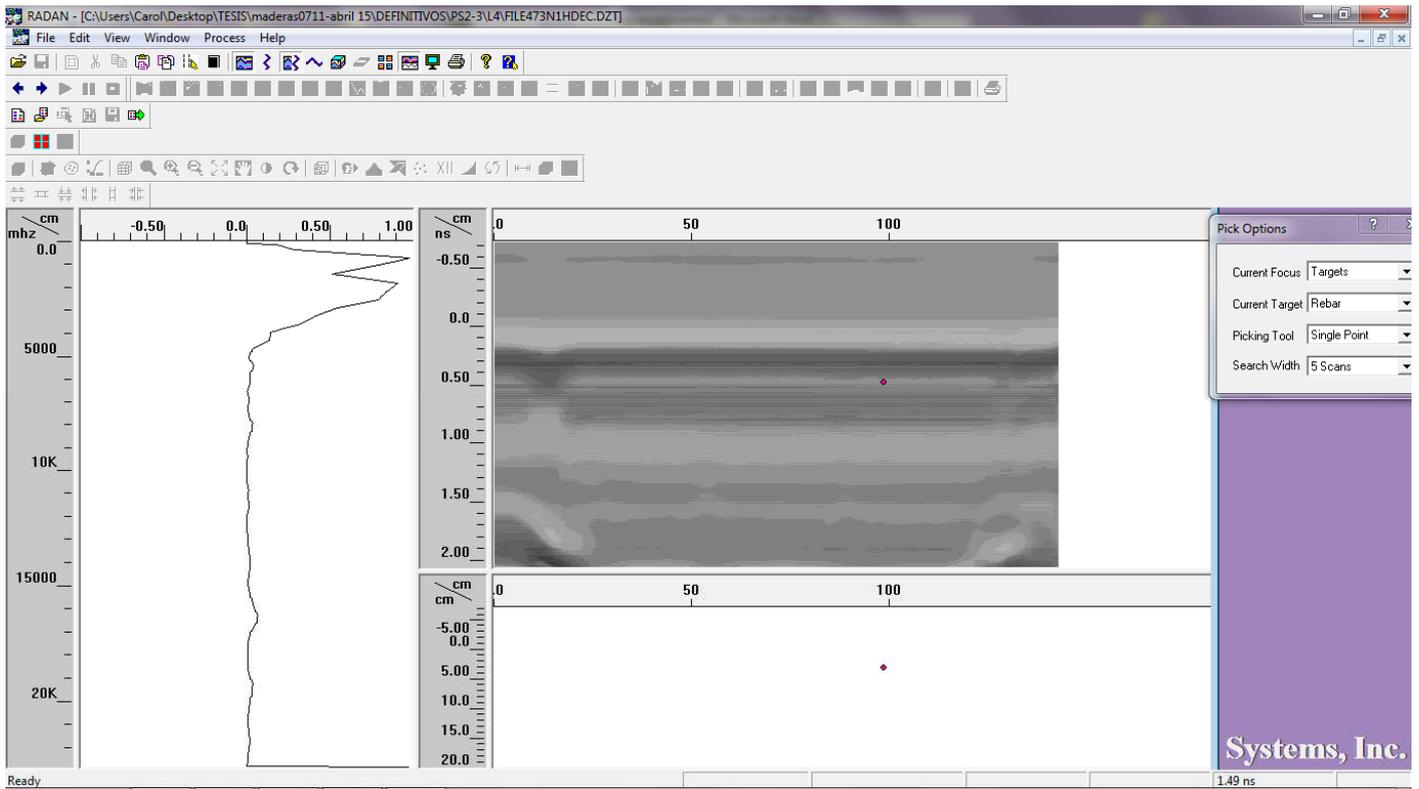


228 TT

En $x = 91,2$ cm vuelve a no haber nada:

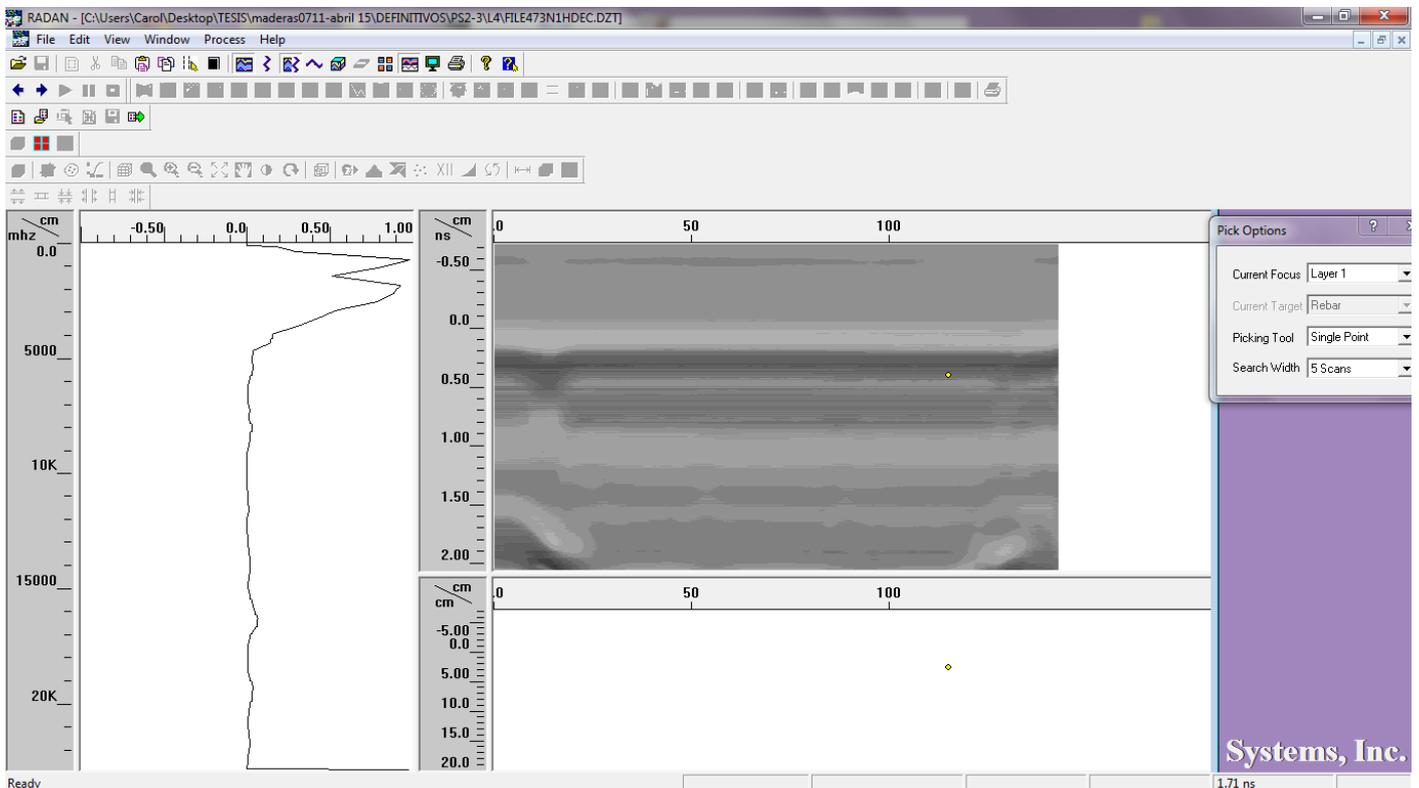


En $x=96$ cm vuelve a cambiar ligeramente el pico indicando la presencia de los nudos 5 y 6 de tracción:

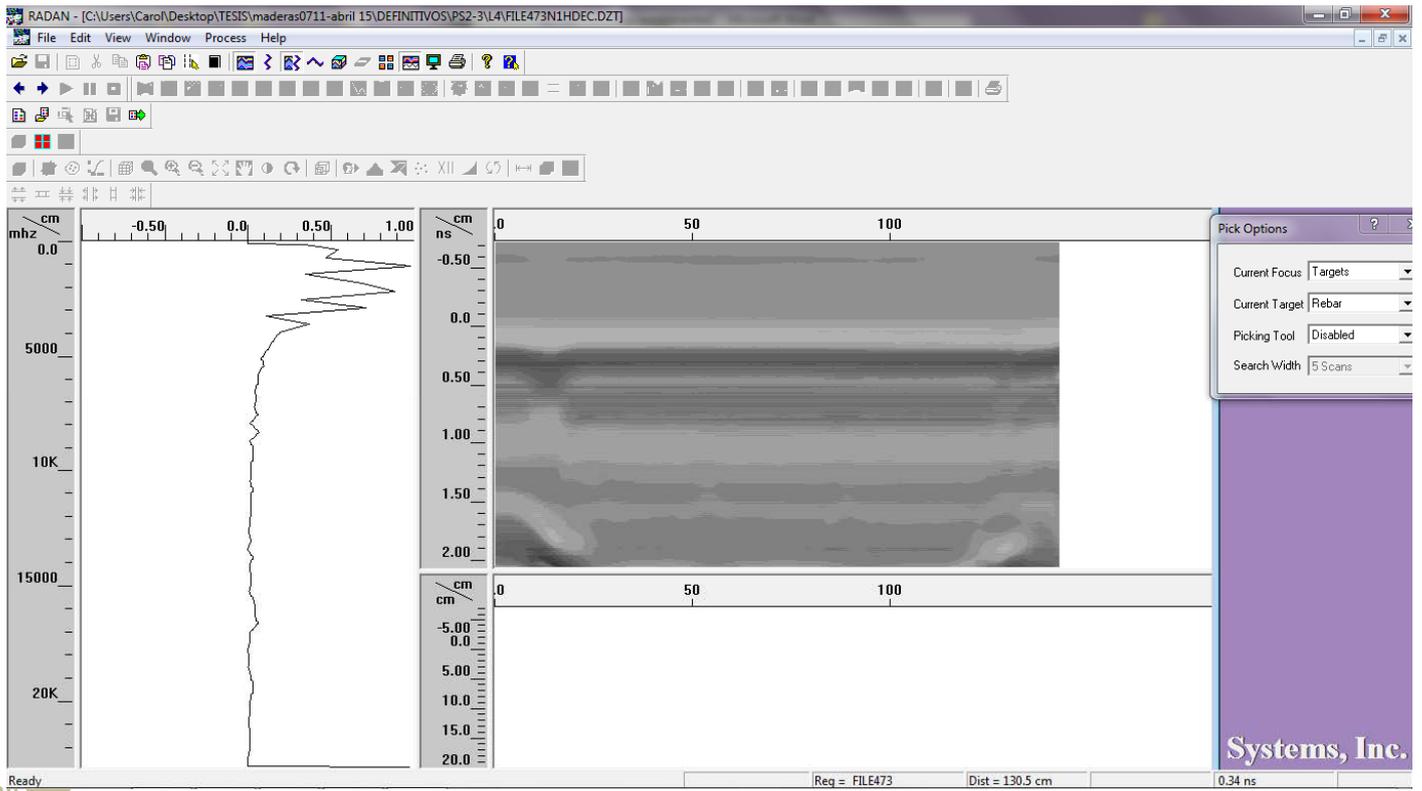


229 †

En $x=113$ cm indica que no hay presencia de singularidades:



En $x = 130\text{cm}$ detecta la presencia de los caballetes:



PS2-4



Cara tracción



Canto 1

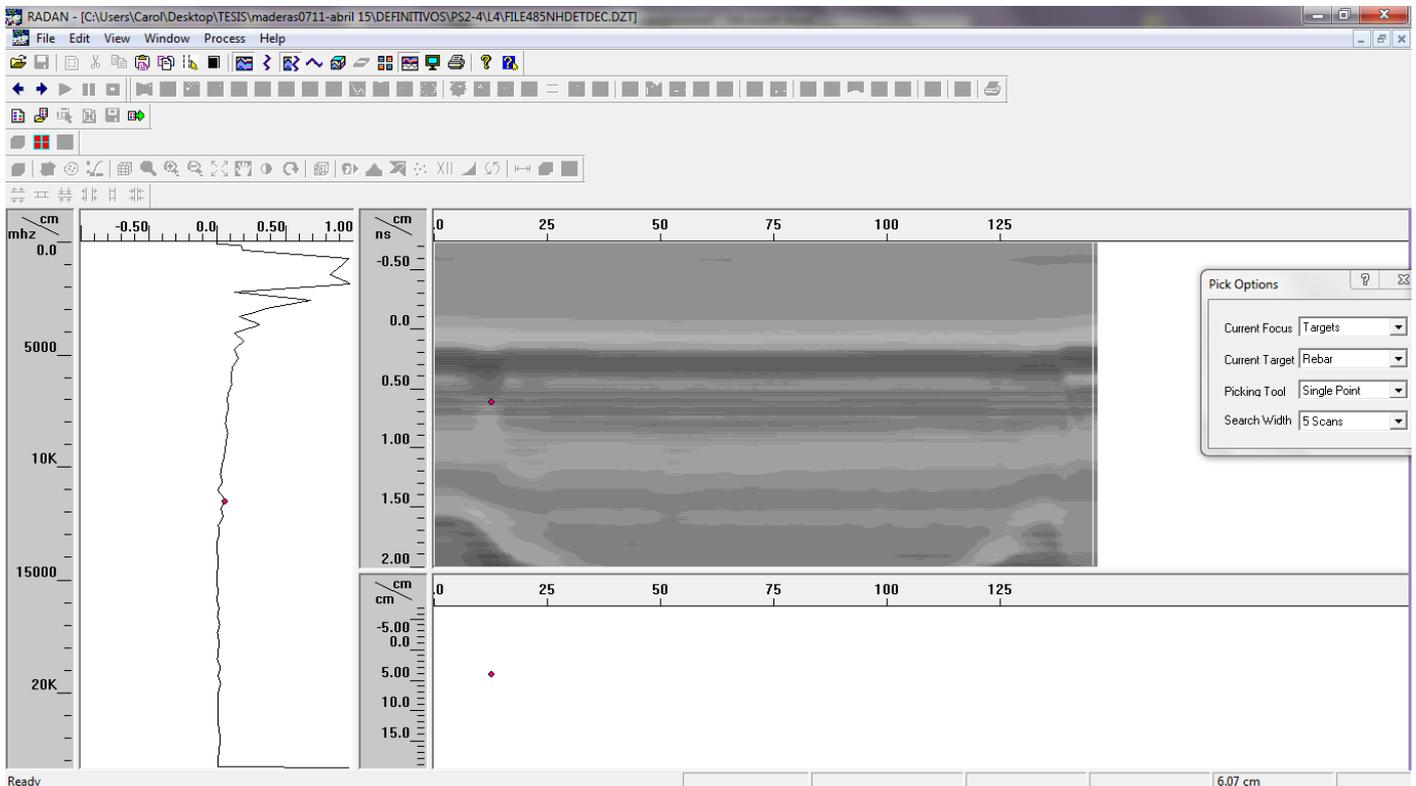


Cara compresión

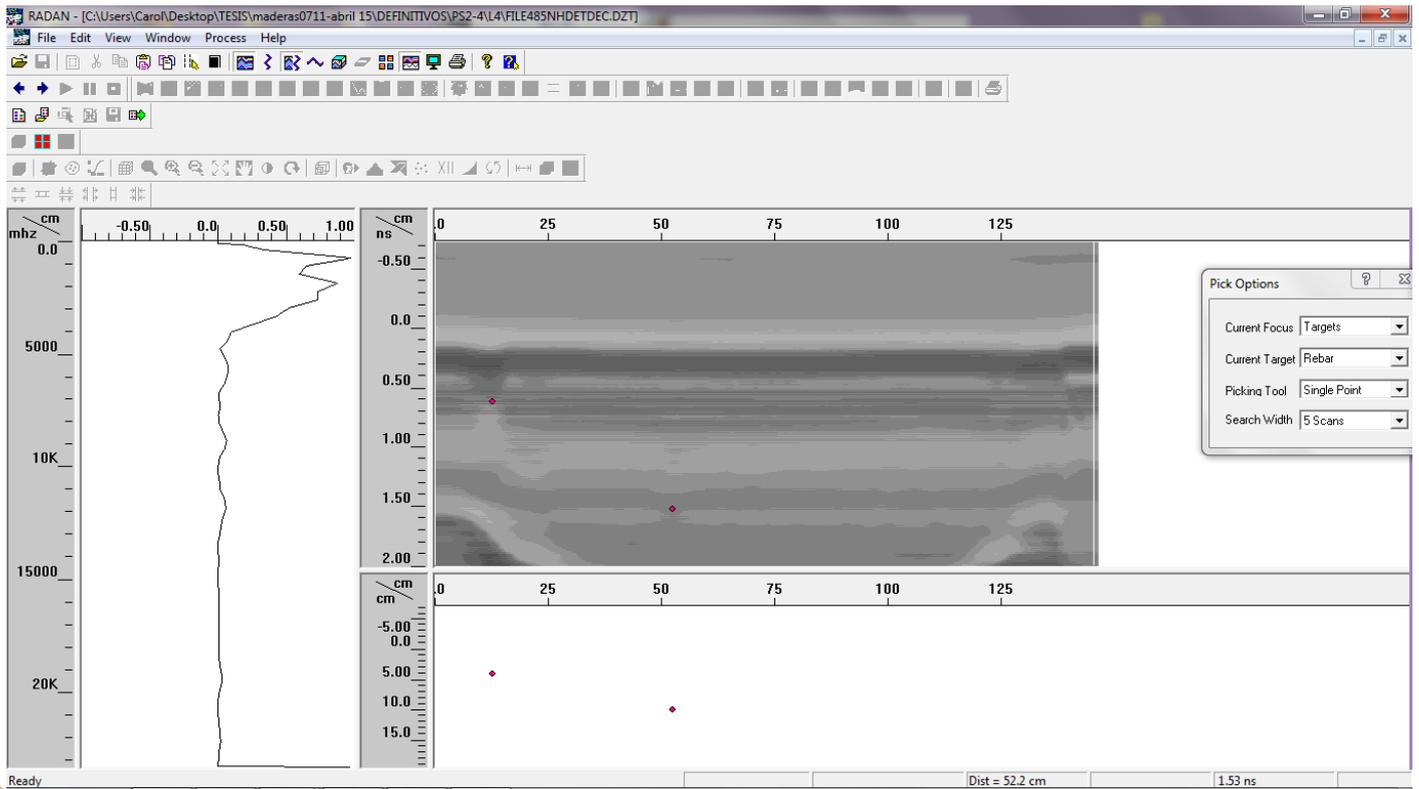


Canto 2

En $x = 12,3$ cm detecta el nudo 2 de tracción:

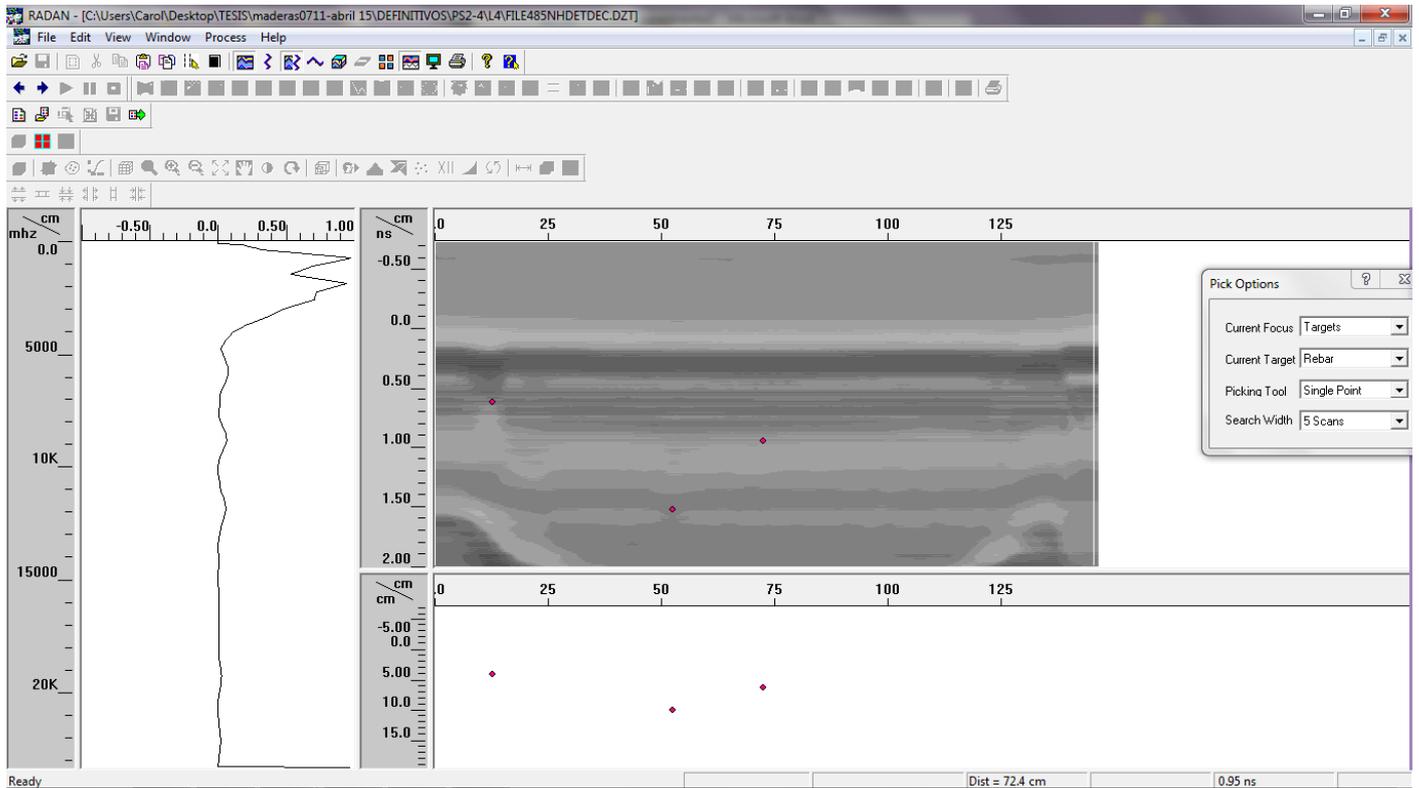


En $x=52$ cm detecta al nudo 1 del canto 2:

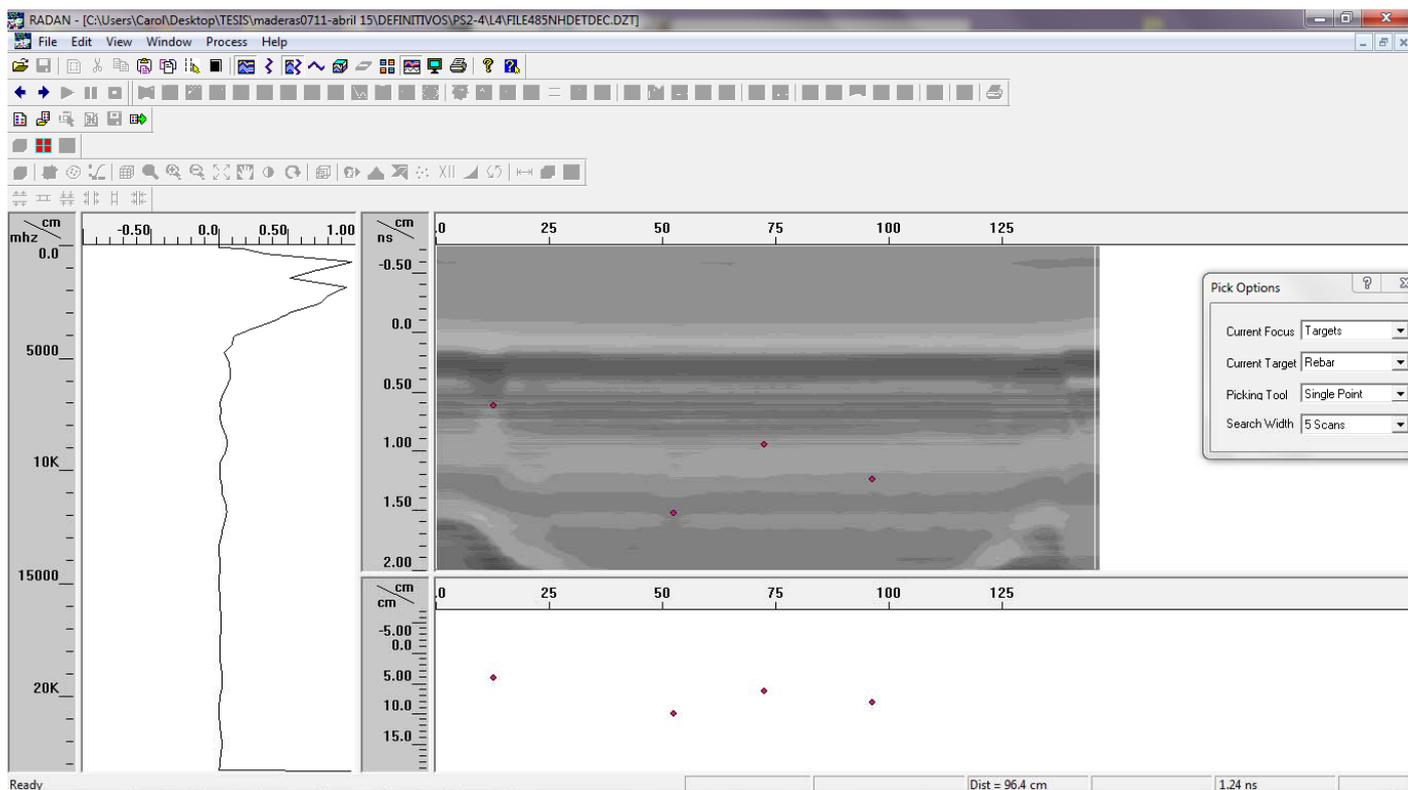


232 TT

En $x= 72,2$ cm detecta el nudo 3 de tracción y el 2 del canto 2:

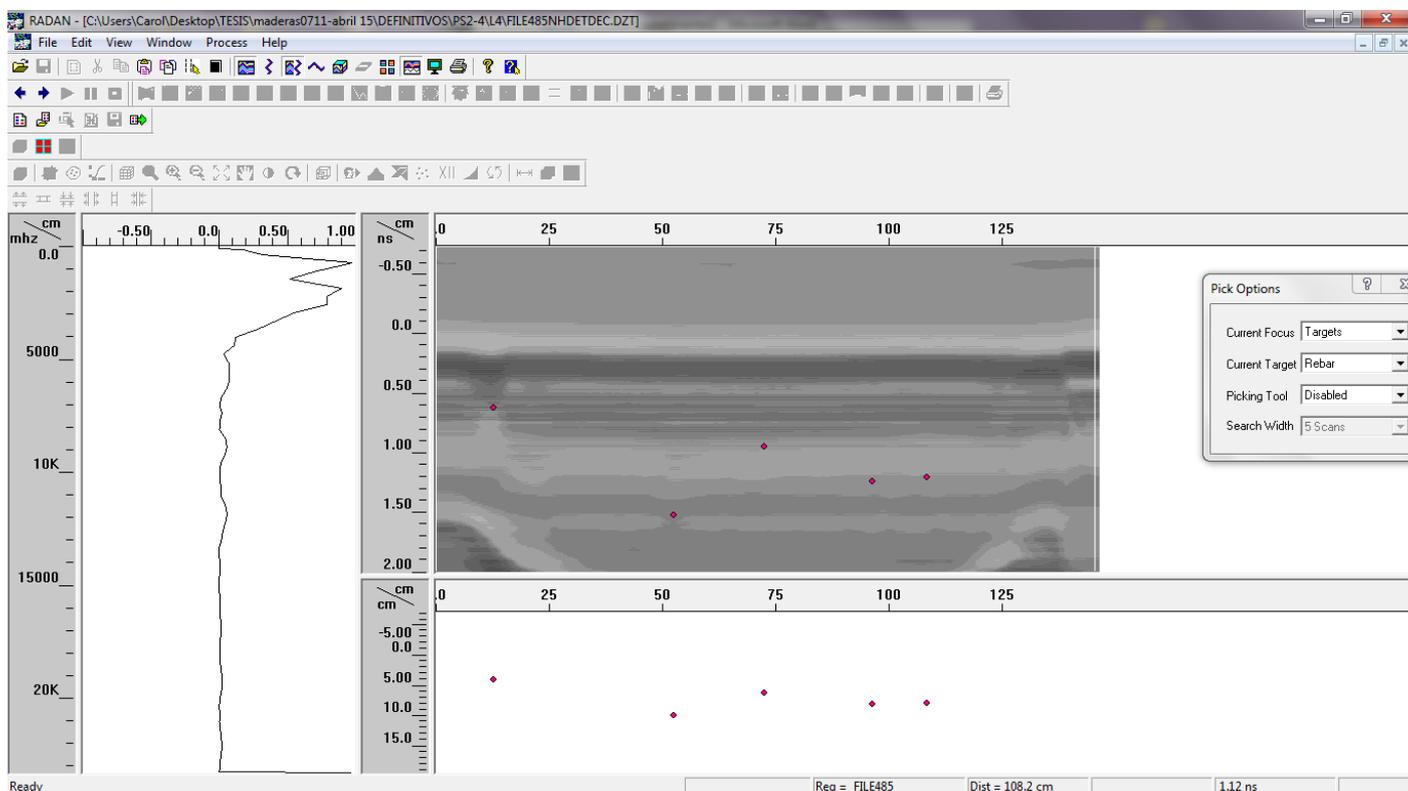


En $x = 96,2$ cm detecta la presencia de una irregularidad oculta:

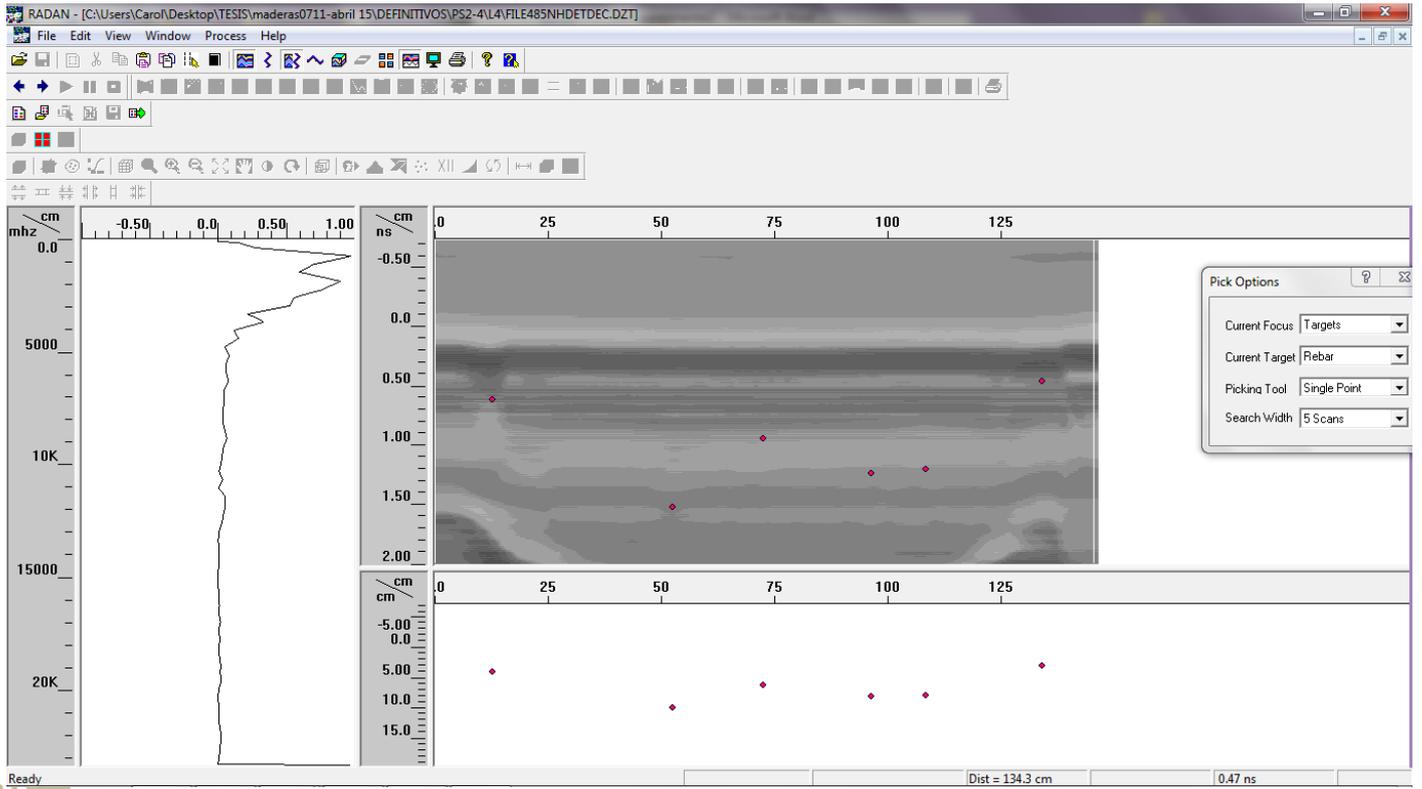


233

En $x = 108$ cm detecta el nudo 1 de compresión, el 3 y el 4 de tracción y el 2 del canto 1:



En x=134 cm detecta el nudo 5 de tracción y el 3 del canto 1:



PS2-9



Cara tracción



Canto 1



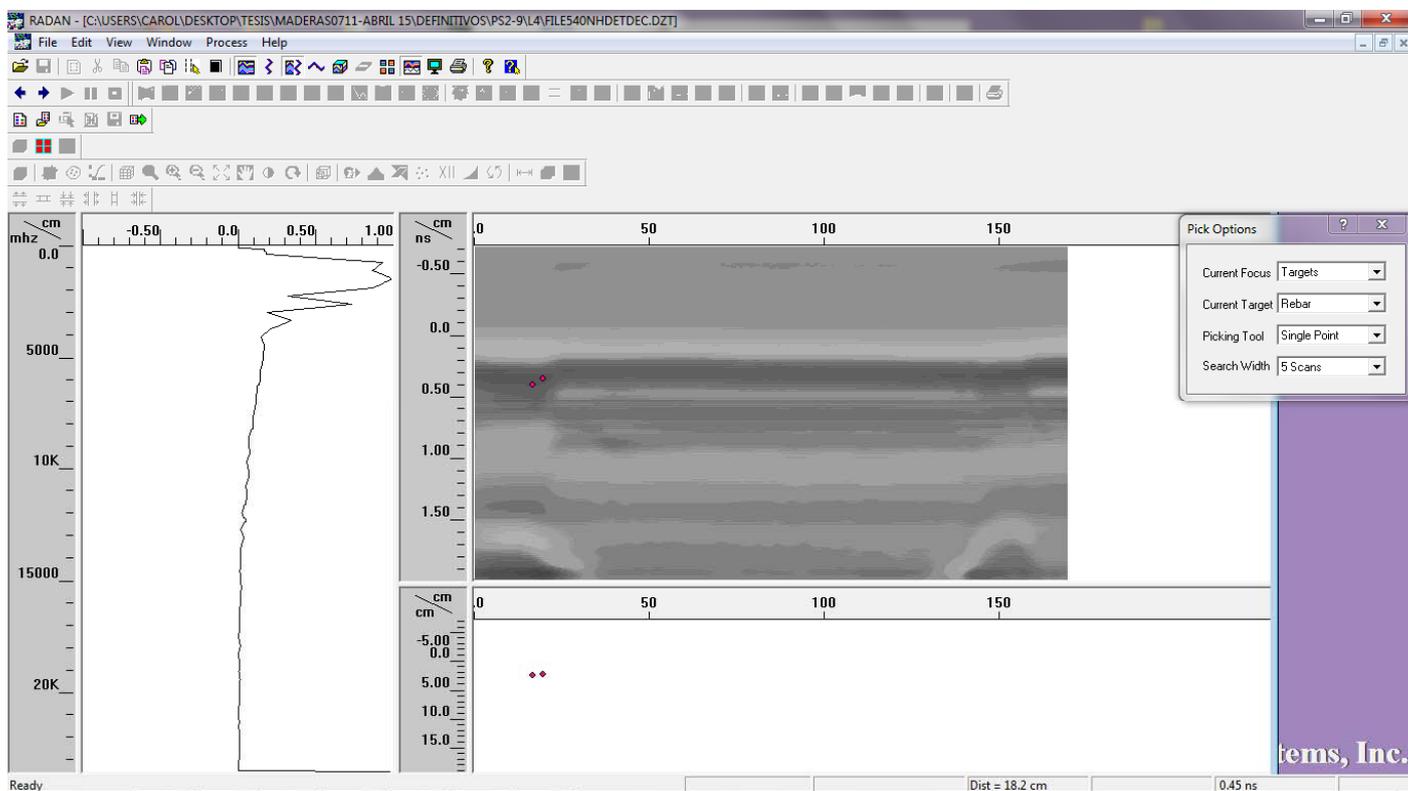
Cara compresión



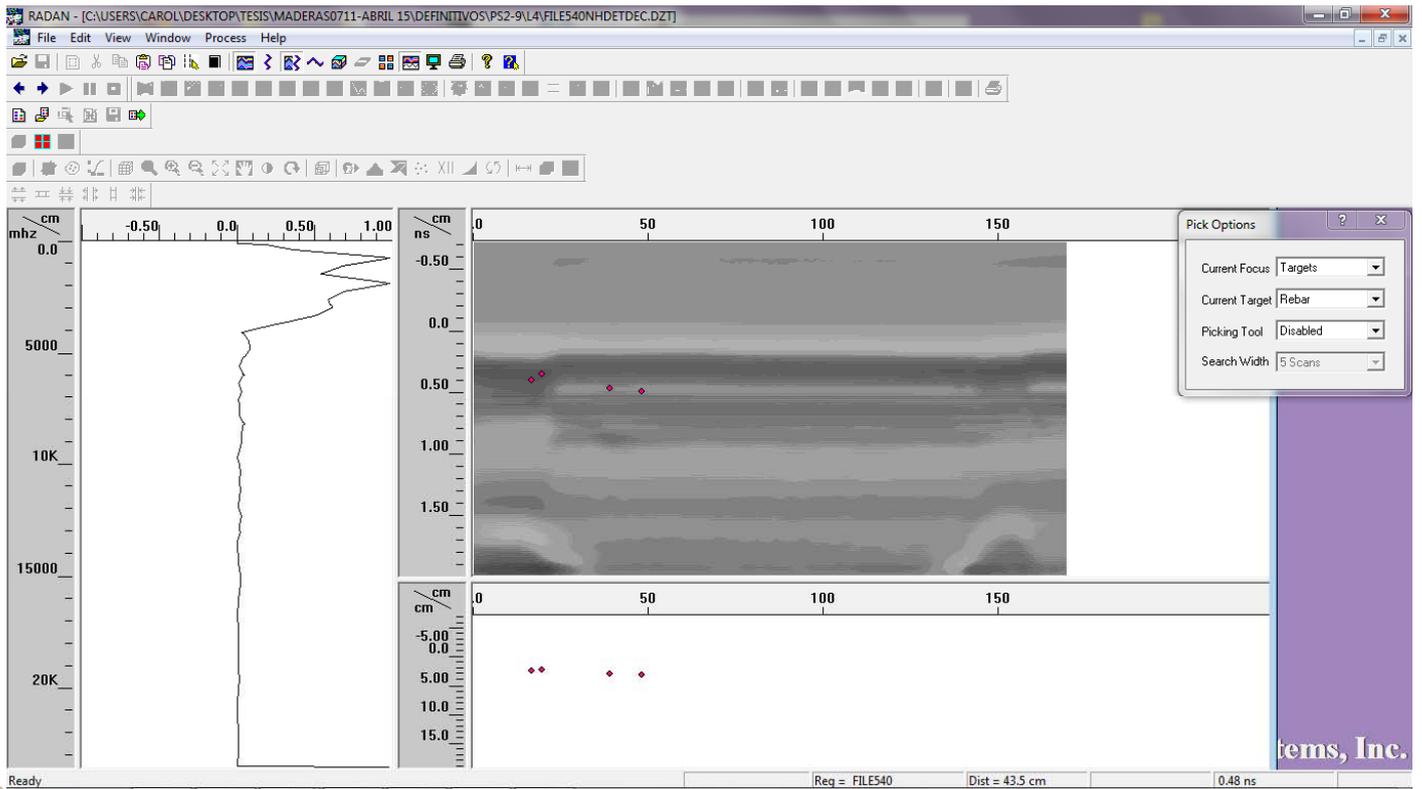
Canto 2

235+

De $x=15$ cm a $x=20$ cm detecta el nudo 1 de tracción, y el 2, 3 y 4 de compresión:

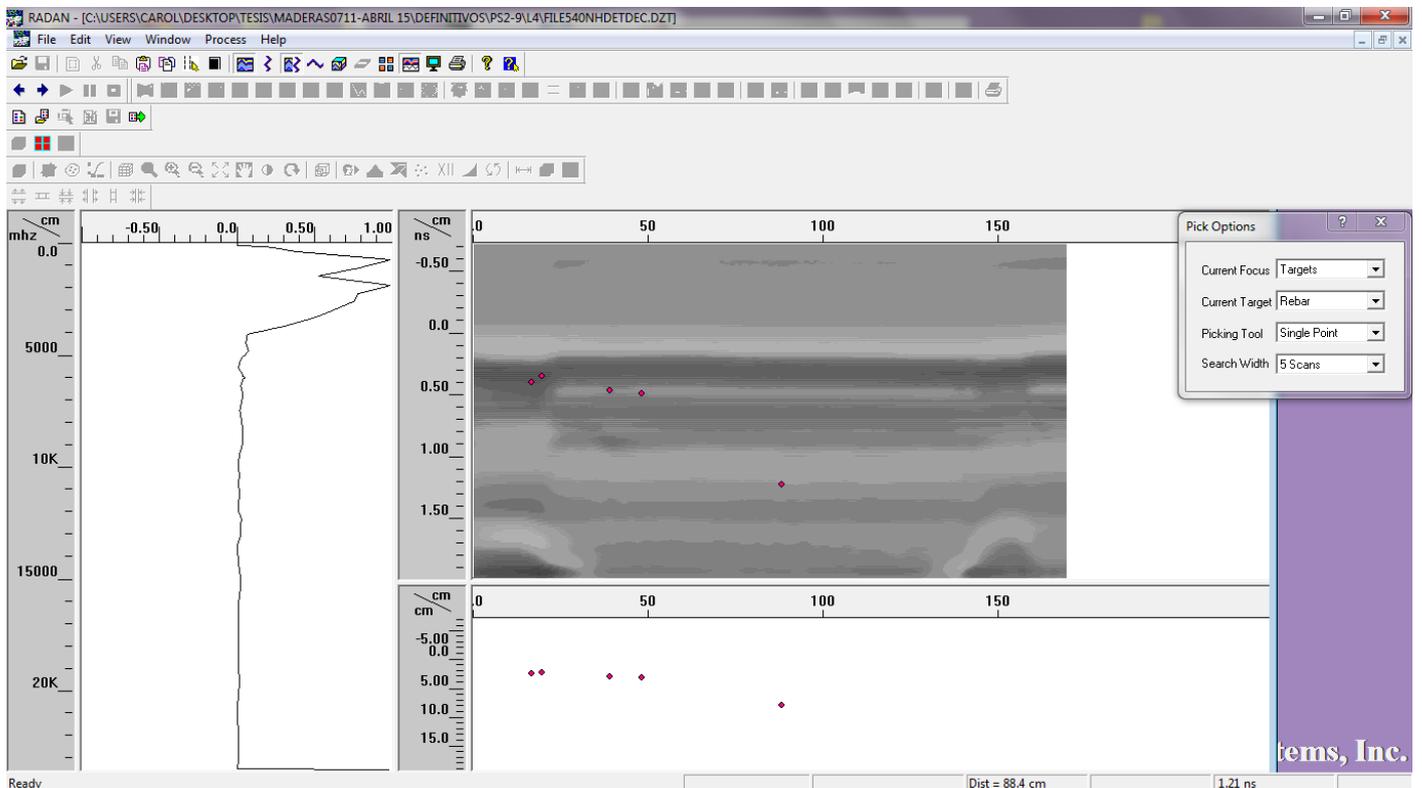


Desde $x=39$ cm a $x=48$ cm detecta los nudos 5,6 y 7 de compresión:

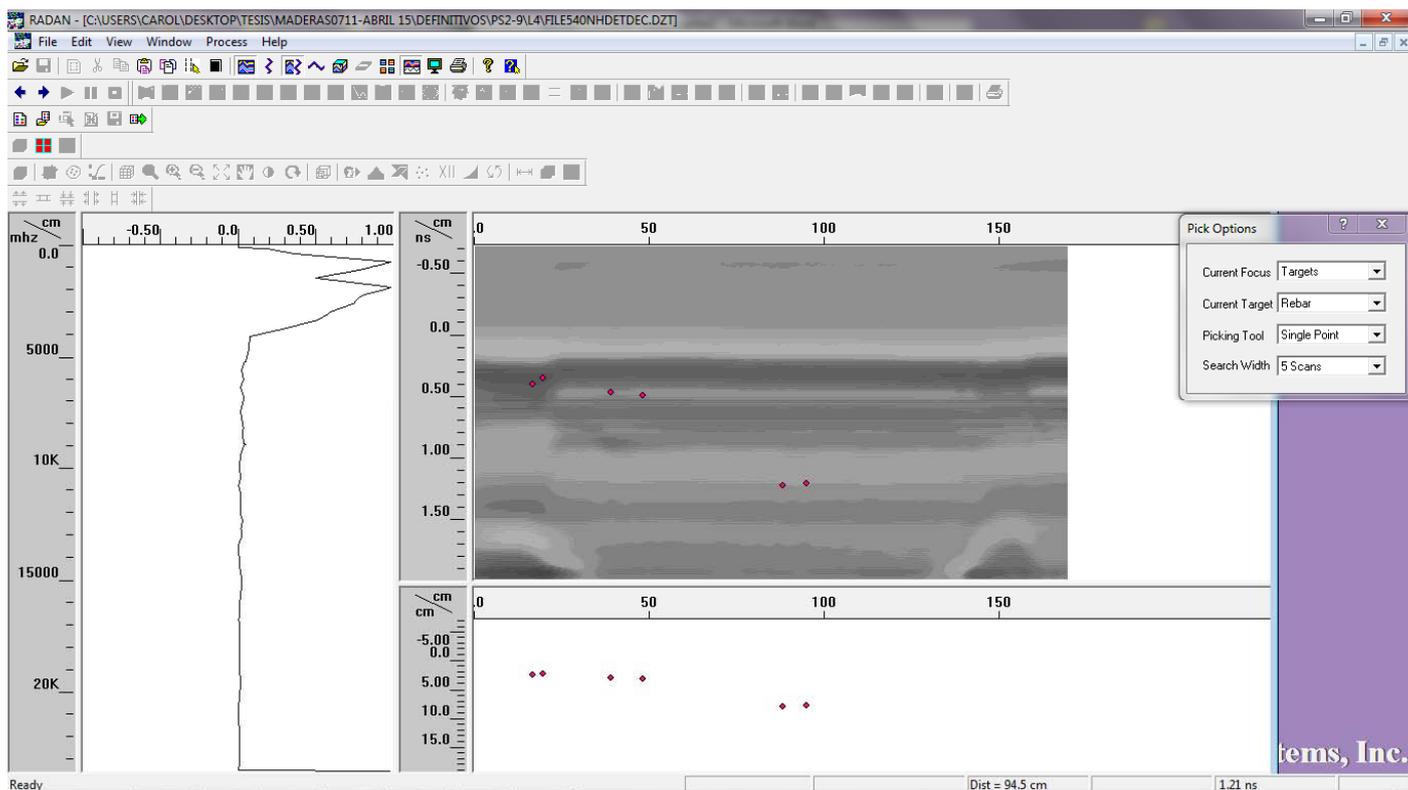


236

En $x=88$ cm detecta el nudo 2 de tracción, 1 del canto 1, y 8, 9 y 10 de compresión:

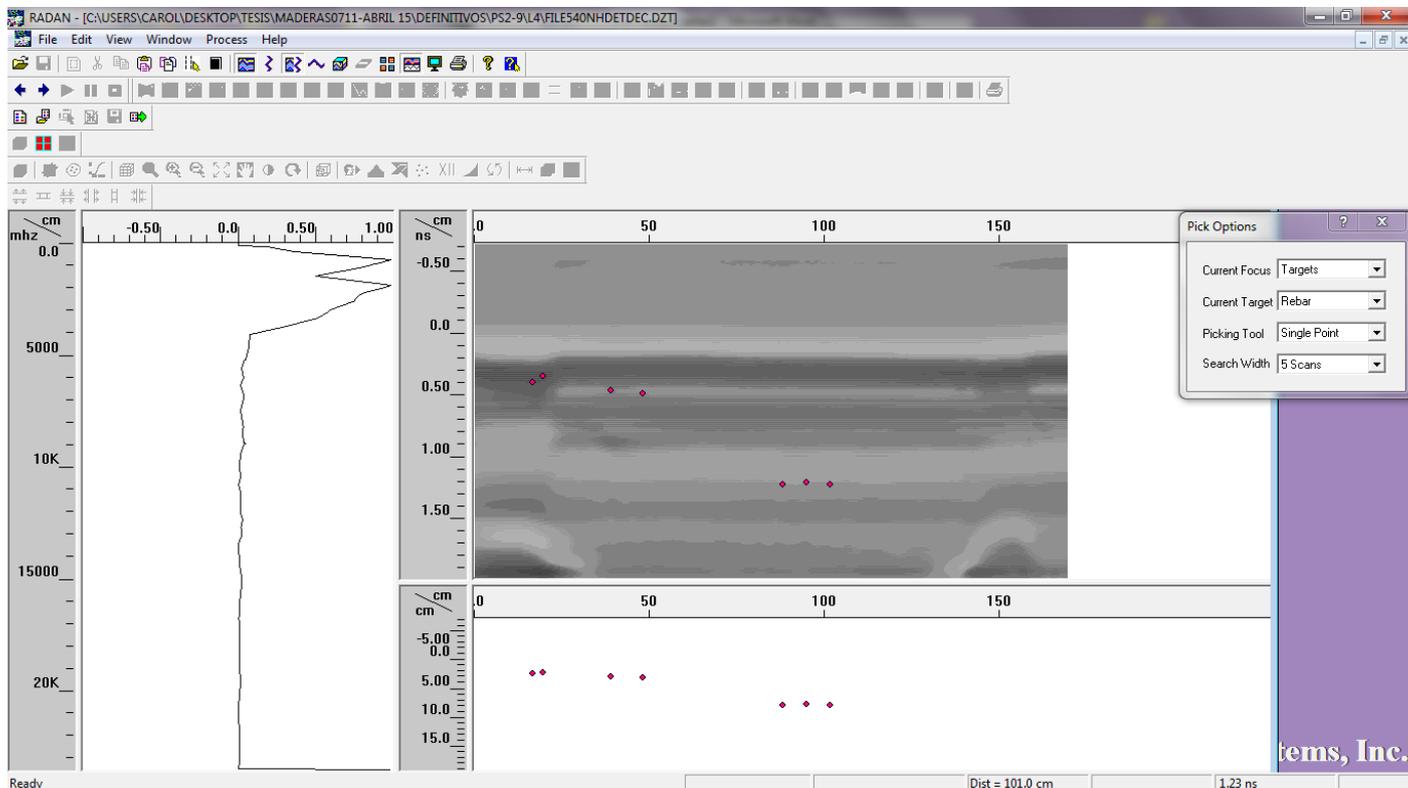


Hasta x=93 cm no se detectan nudos:

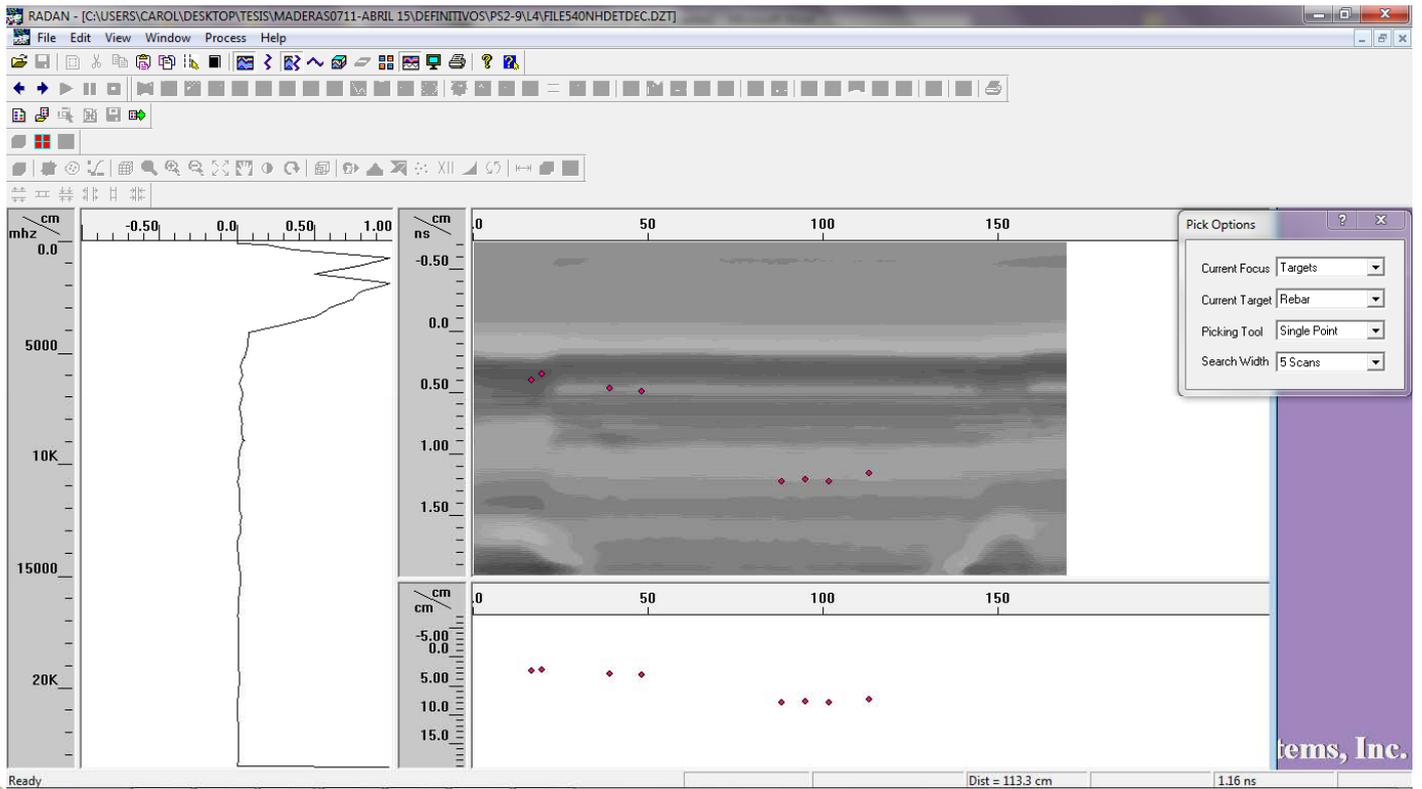


237 †

En x=102 cm detecta una presencia de irregularidades:

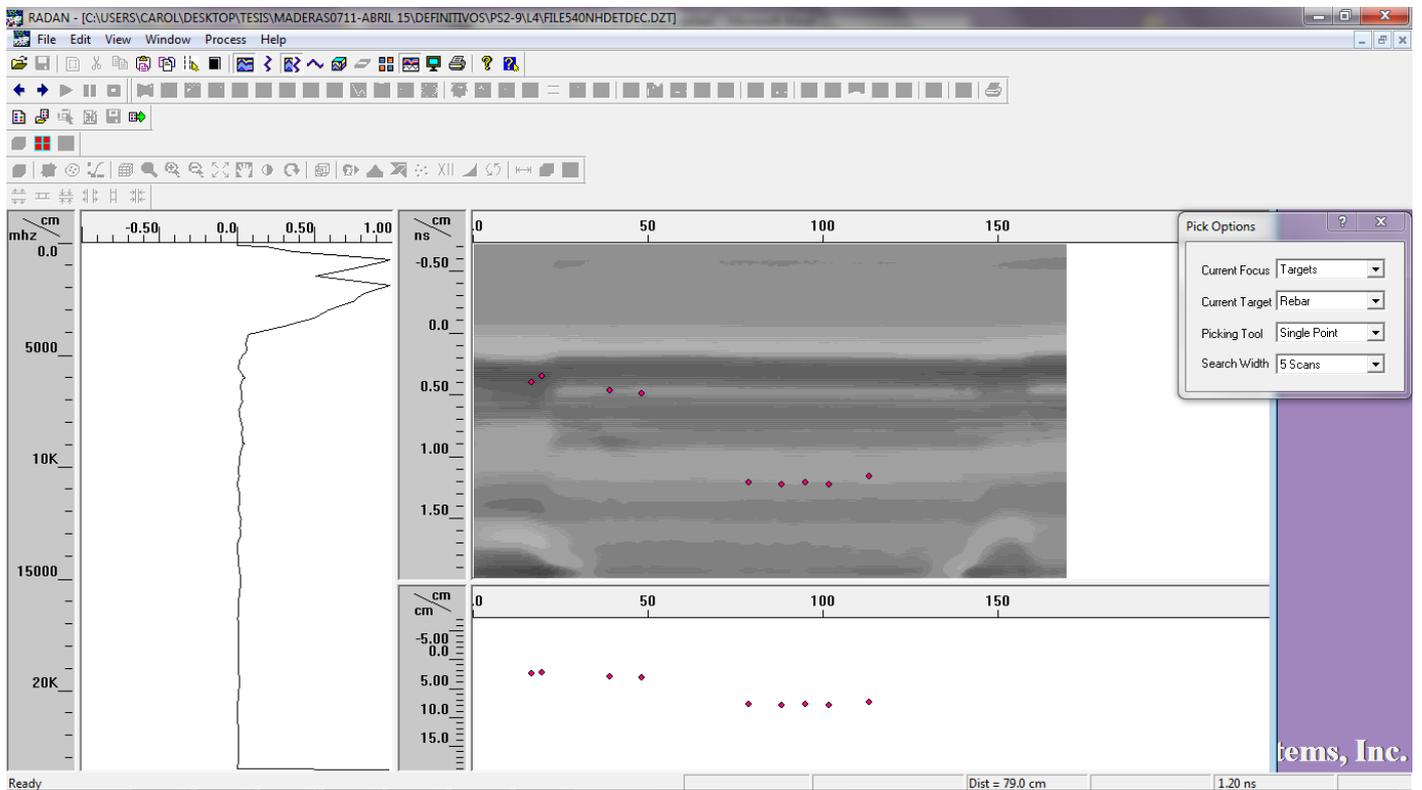


En $x=114$ cm detecta los nudos 3 y 4 de tracción, el 2 del canto 1, y el 11, 12, 13 y 14 de compresión:

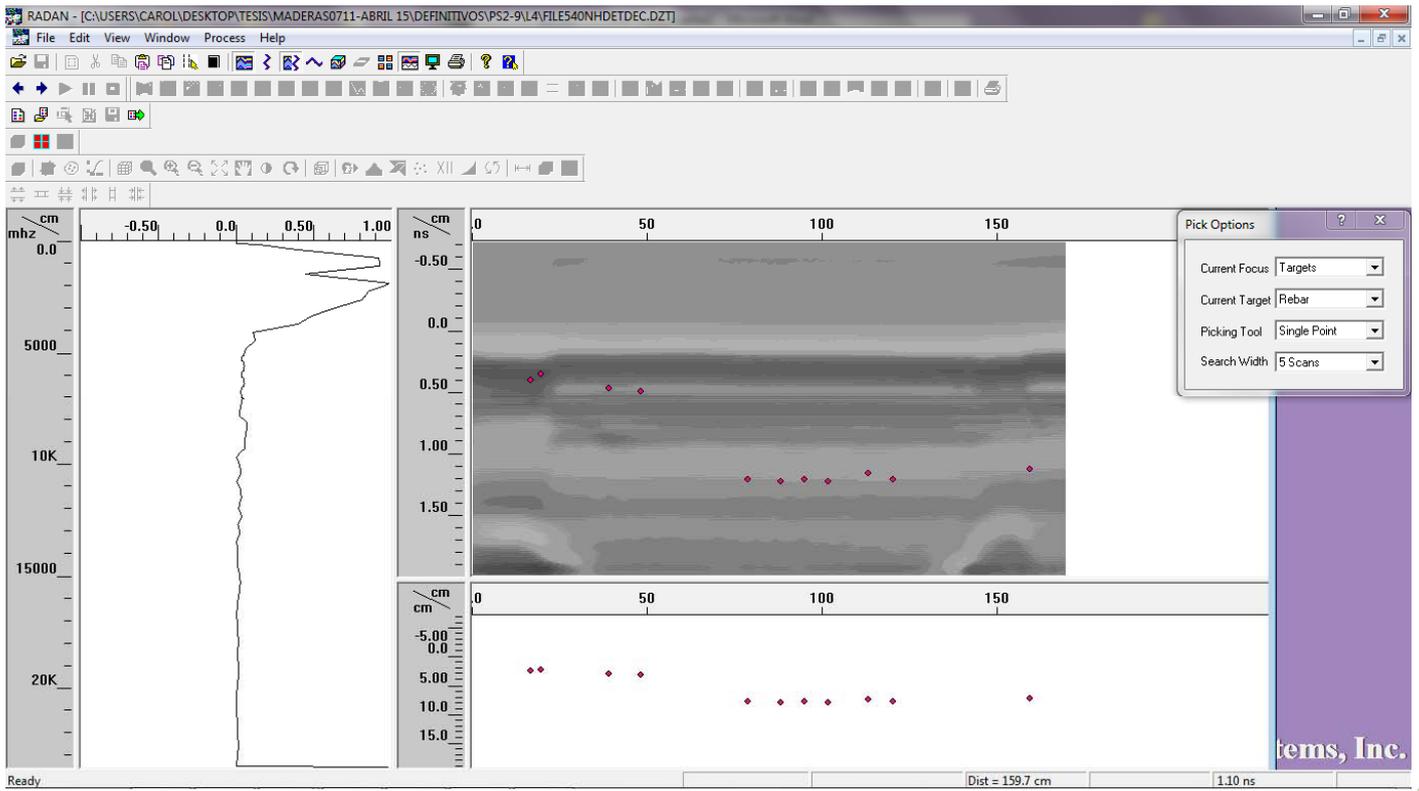


238

Comprobando y volviendo atrás, en $x=79$ cm se detecta la presencia de irregularidades ocultas:



En x=159 cm detecta el nudo 3 del canto 1 y el nudo 15 de compresión:



tems, Inc.

PS2-10



Cara tracción



Canto 1

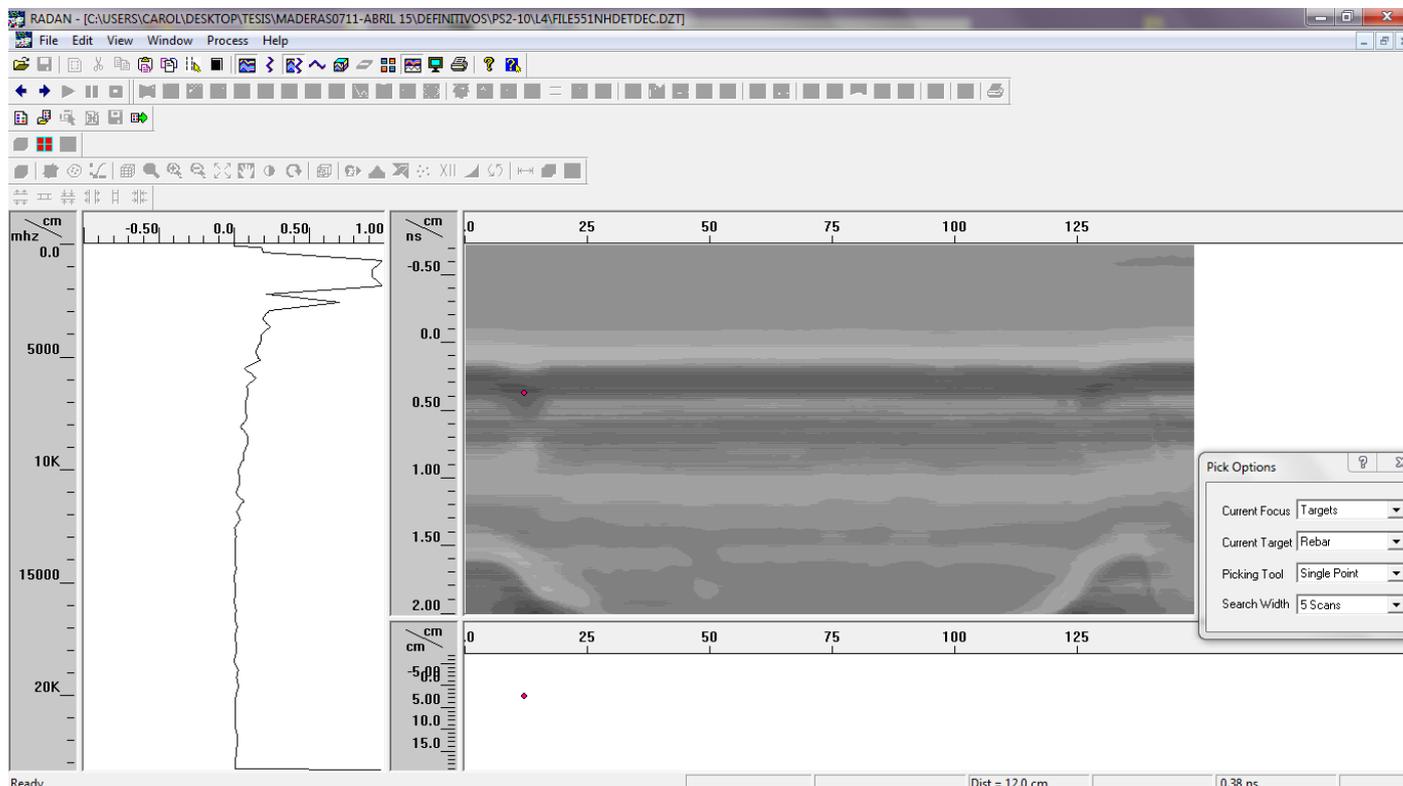


Cara compresión

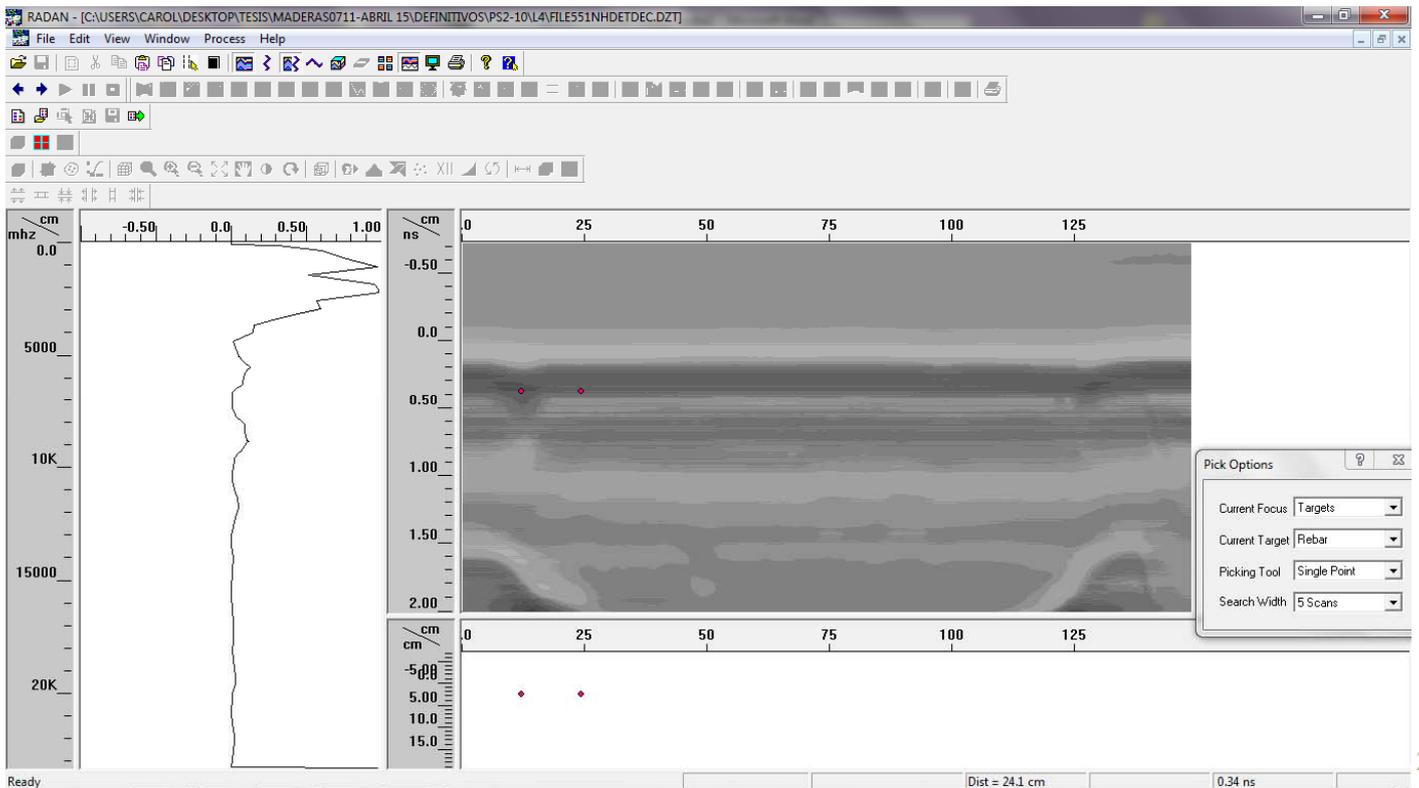


Canto 2

240  12,5 cm detecta posiblemente los nudos 1 y 2 de compresión, sin embargo también se hace presente la respuesta espectral del caballete, quedando distorsionada la detección de los caballetes:

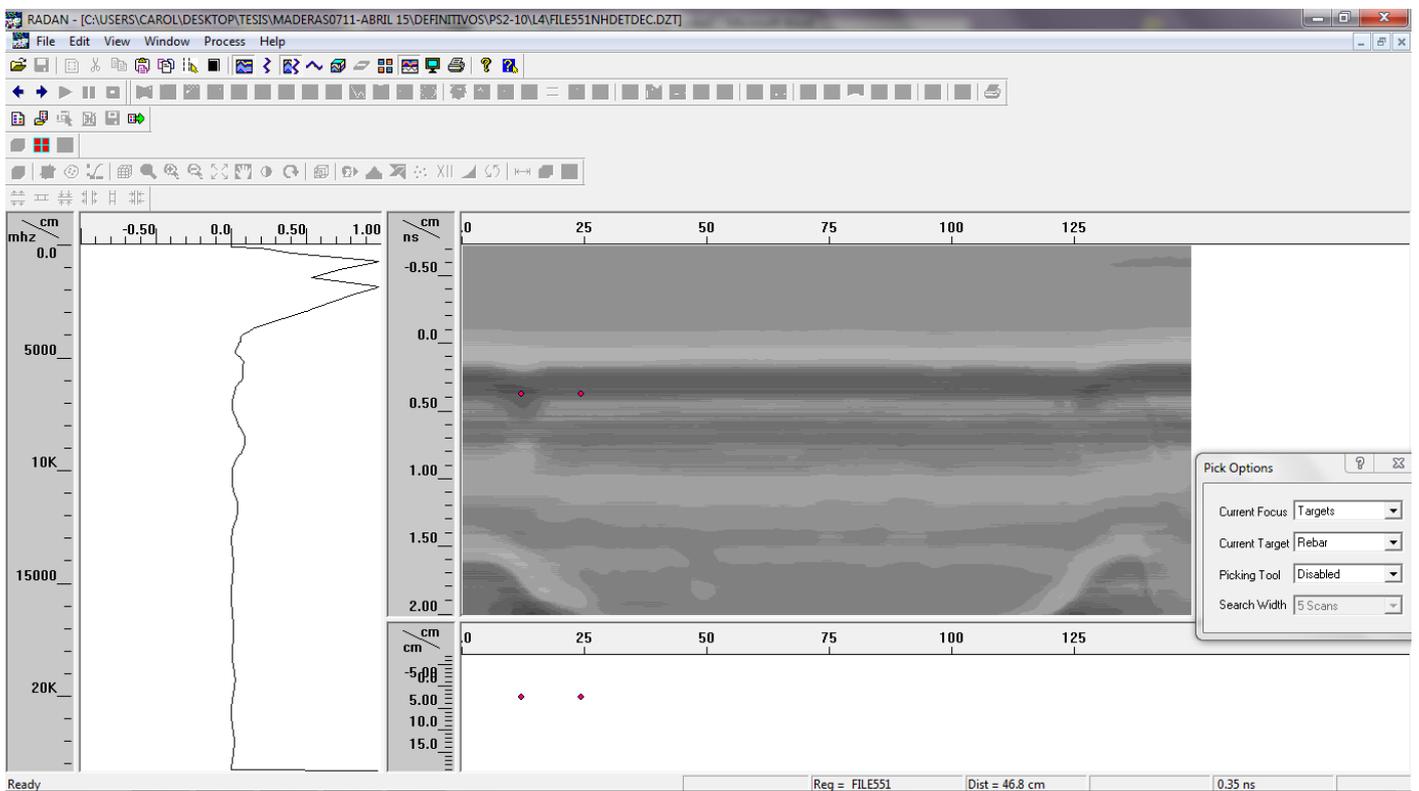


Hasta x 24.5, 34.5 reales, GPR identifica nudos. De 12.5 a 24.5. Probablemente el nudo 2 de compresión:

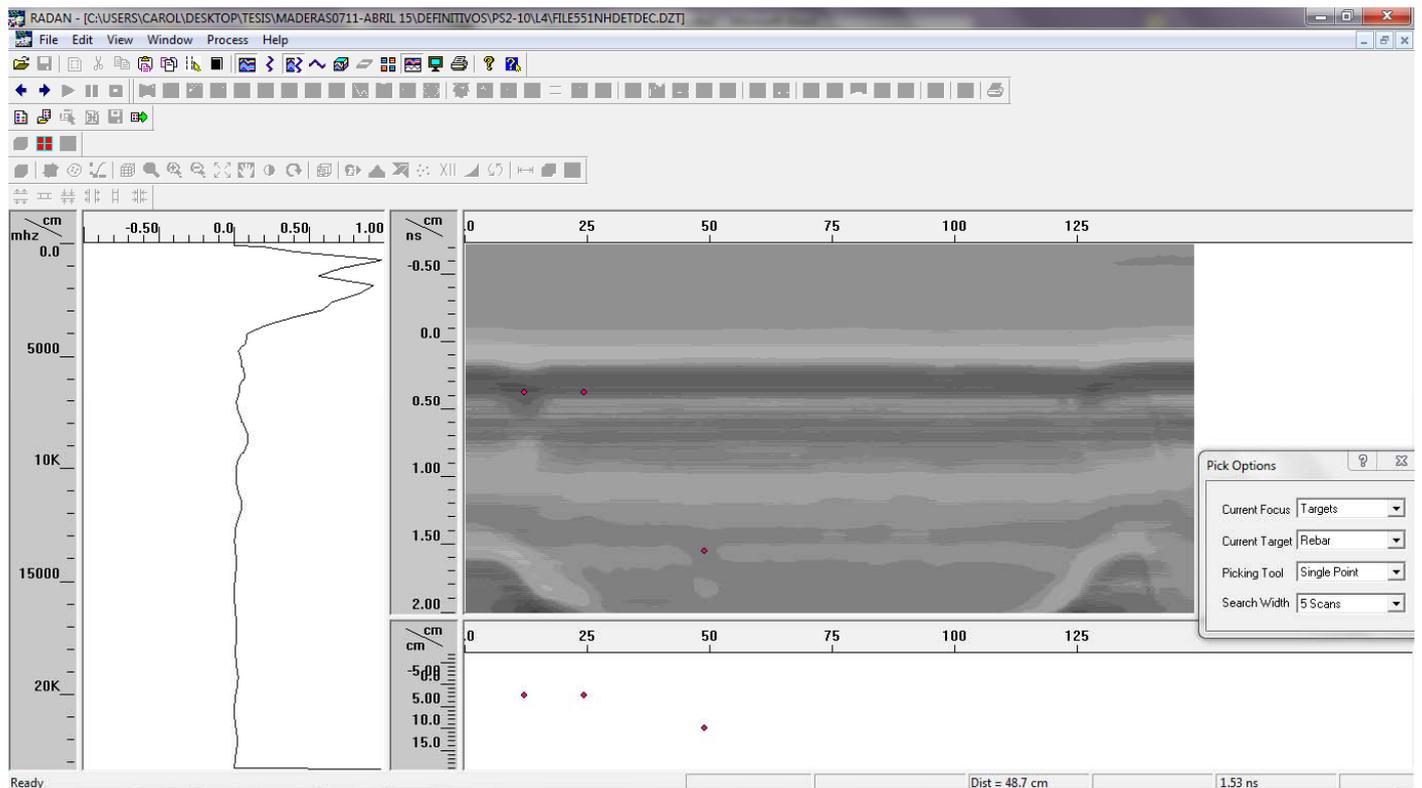


241+

Hasta x=46 cm no detecta ninguna irregularidad:

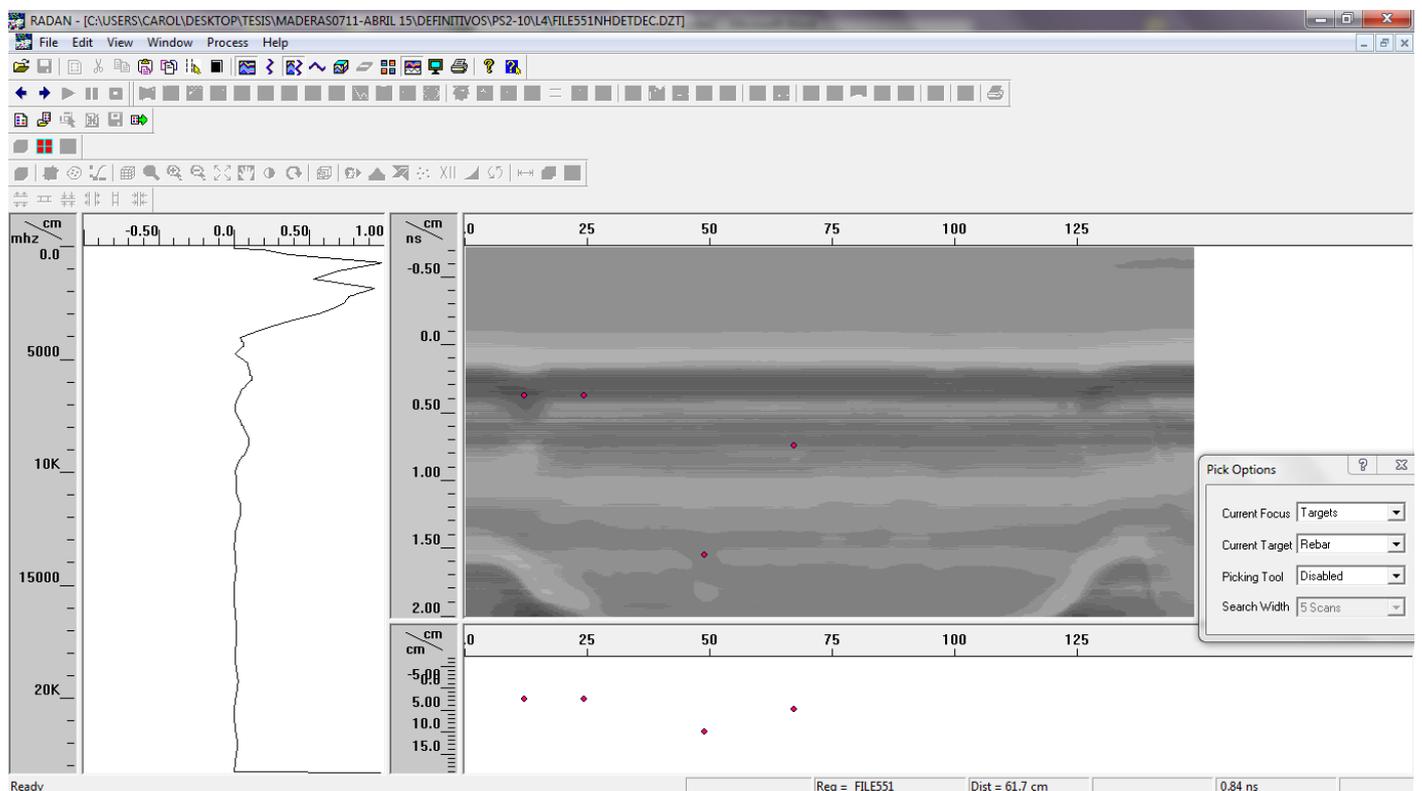


En $x=51.2$ cm detecta los nudos 2 y 3 de tracción, el nudo 1 del canto 1 y el nudo 2 del canto 2:

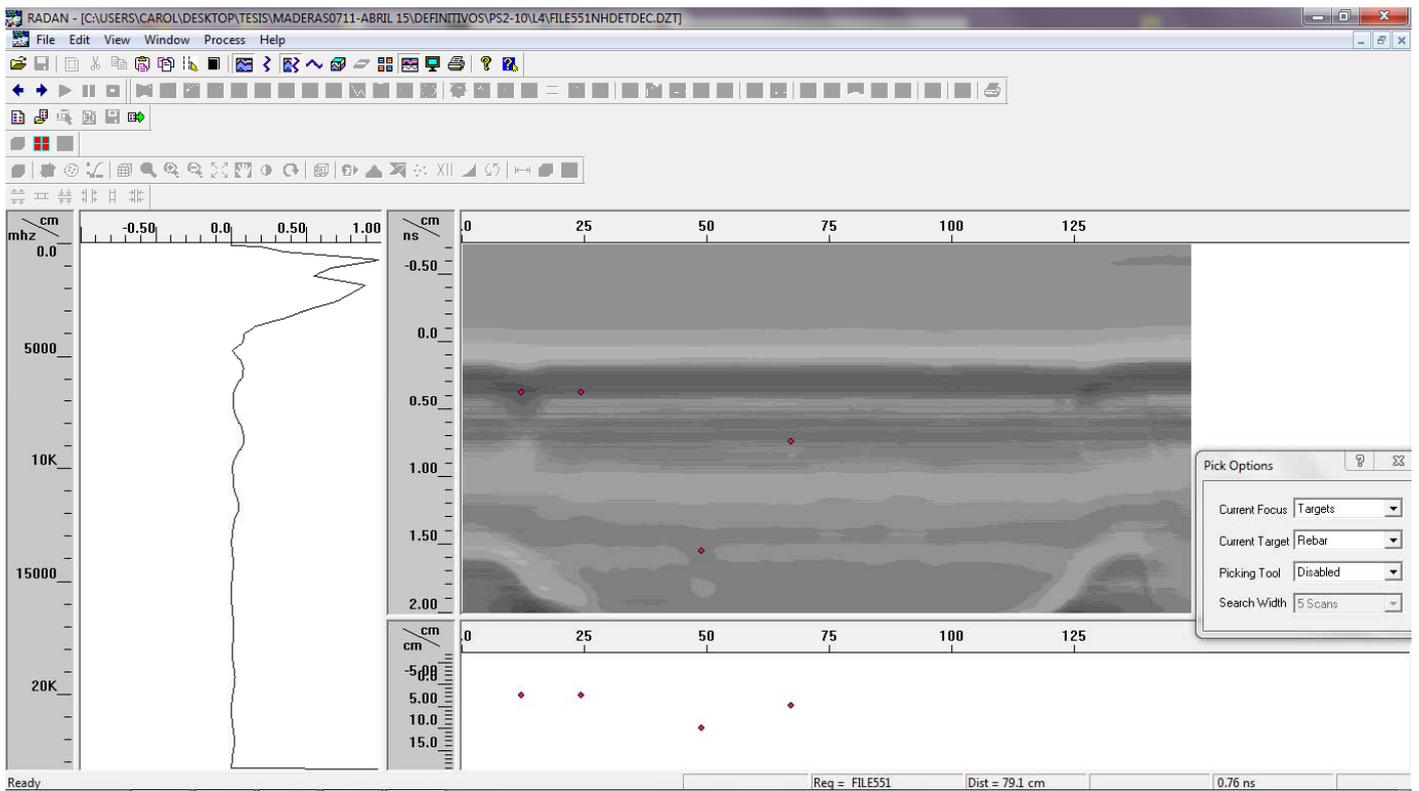


242 TT

De $x=50$ cm a $x=70$ cm el espectro indica que hay alguna singularidad oculta:

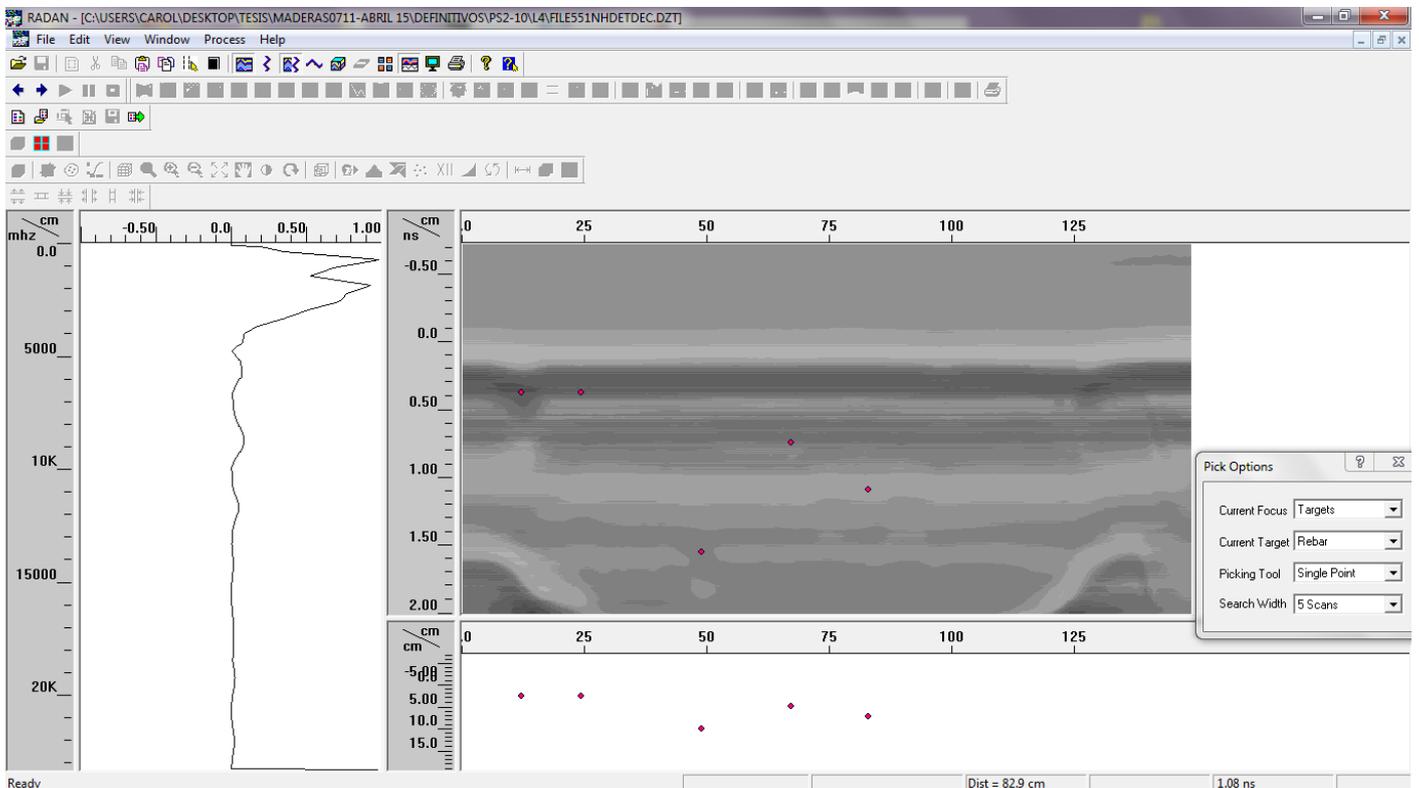


A partir de $x=80$ cm indica que ya no hay presencia de irregularidad oculta:

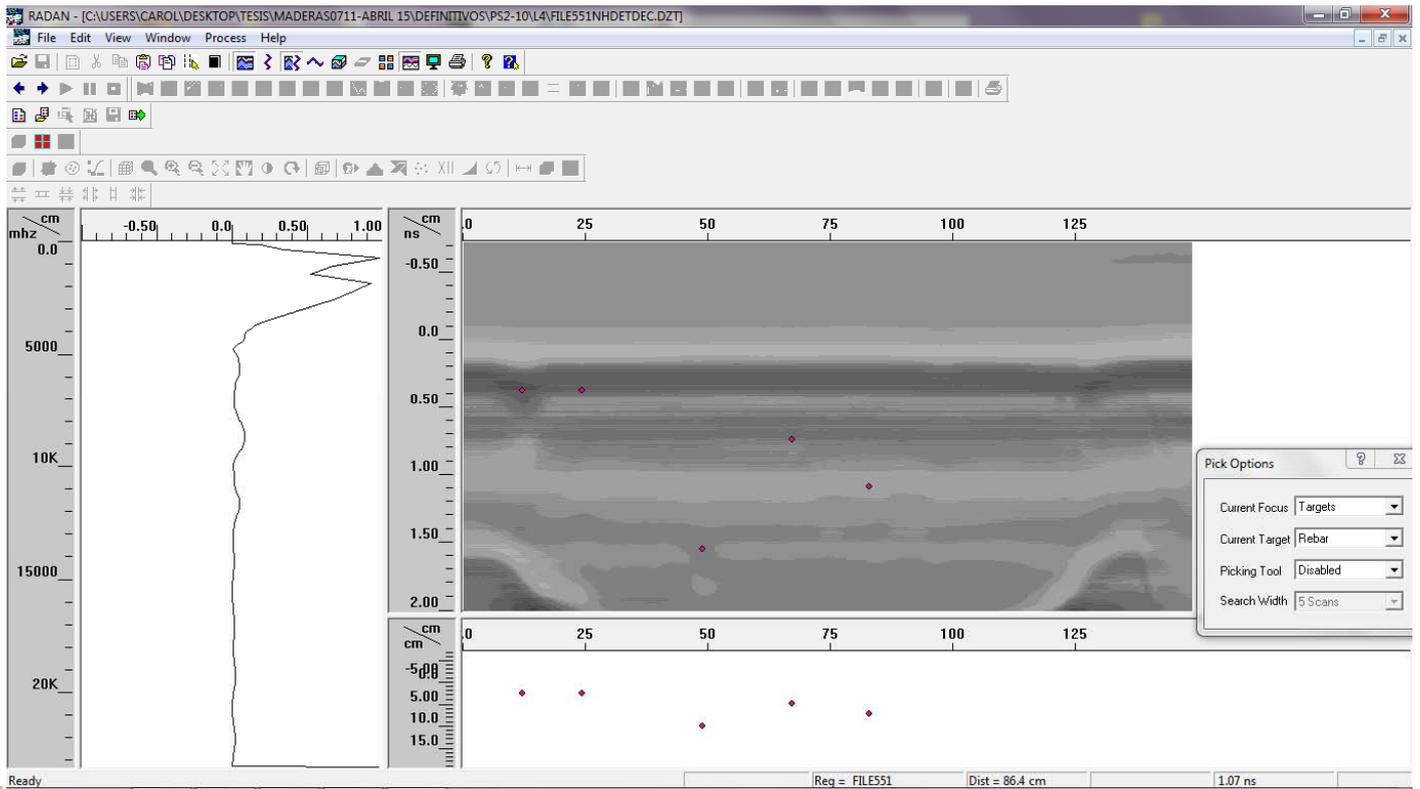


243

Y en $x=83$ cm detecta el nudo 4 de tracción o bien la fenda presente en la cara de compresión.

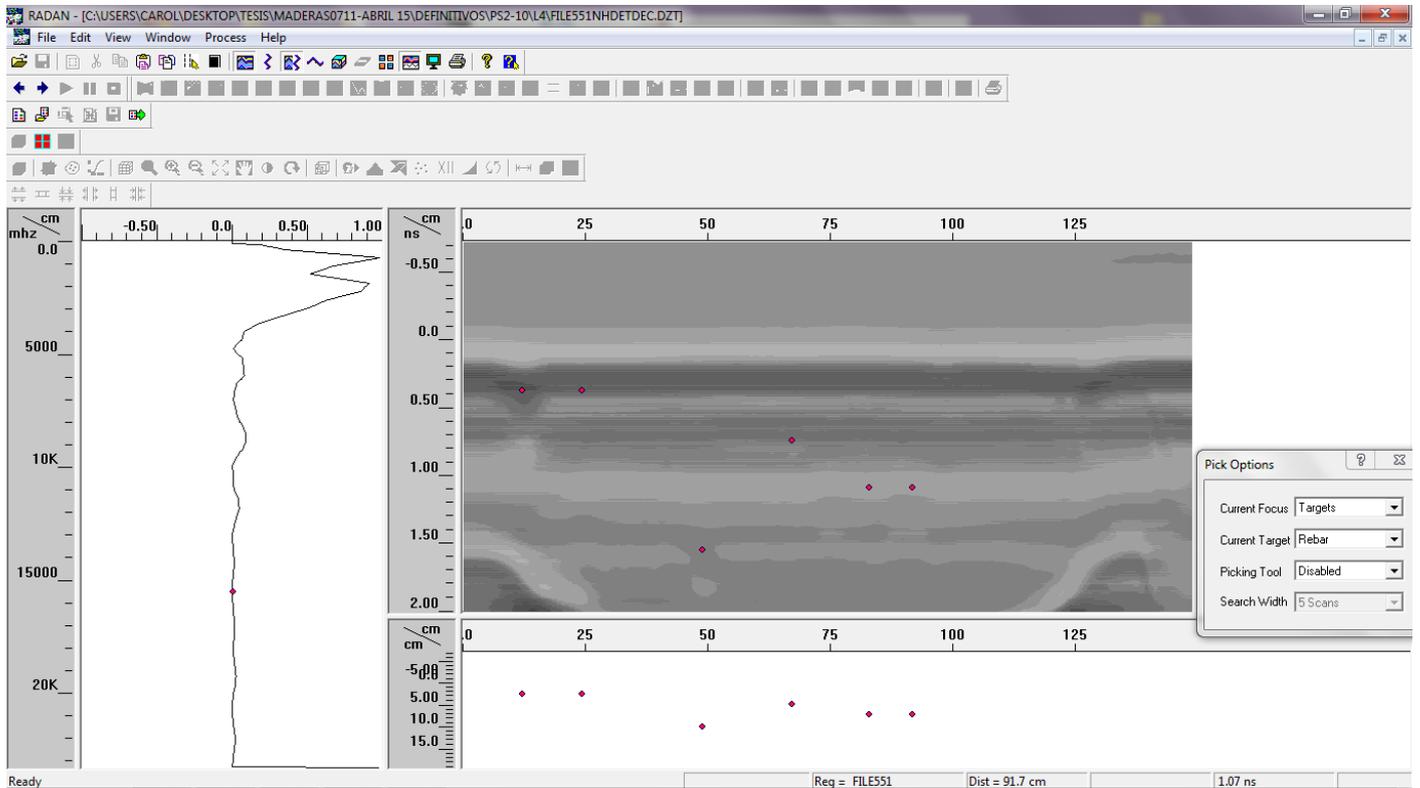


Posteriormente no detecta ninguna irregularidad:

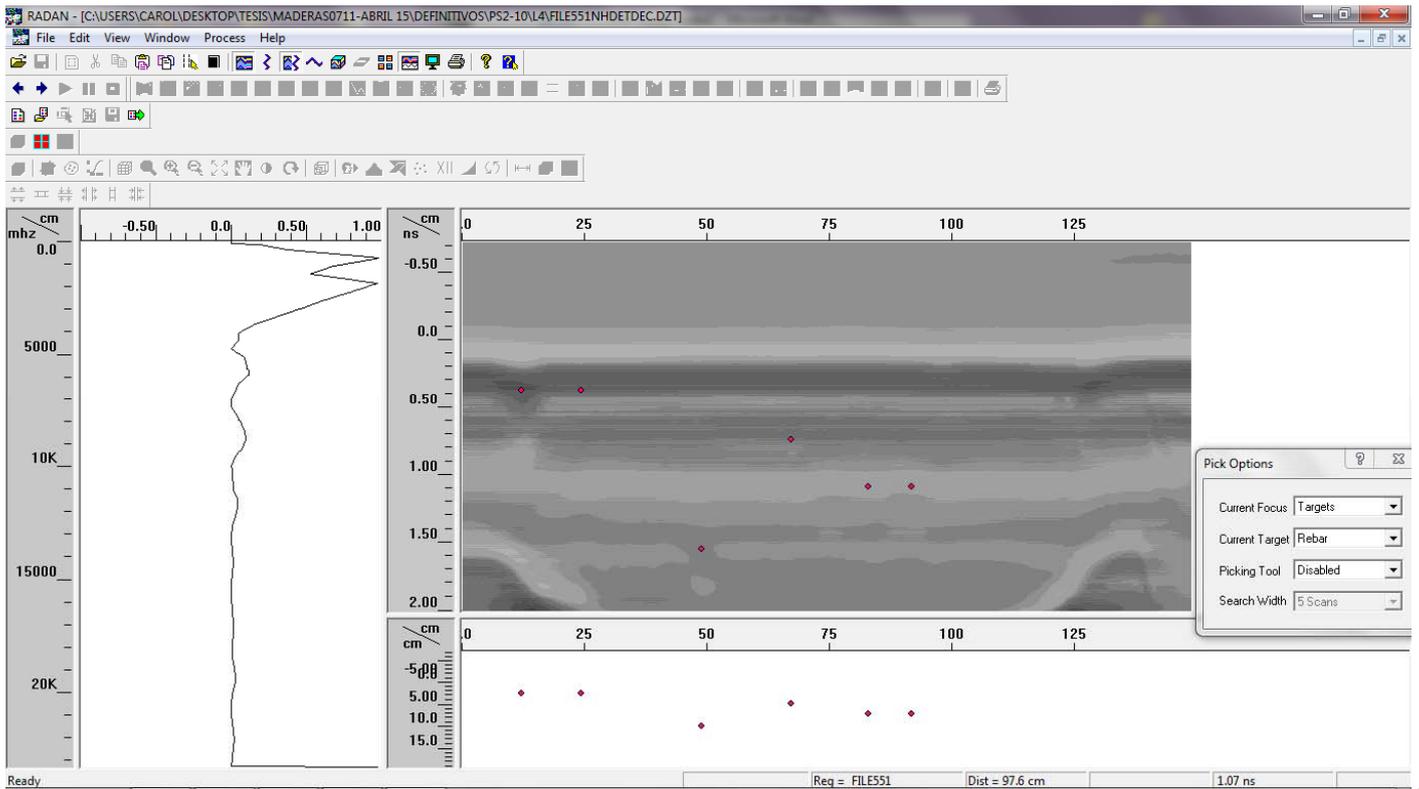


244 TT

En x=91,7 cm indica tímidamente la presencia del nudo 5 de tracción y del 2 del canto 1:

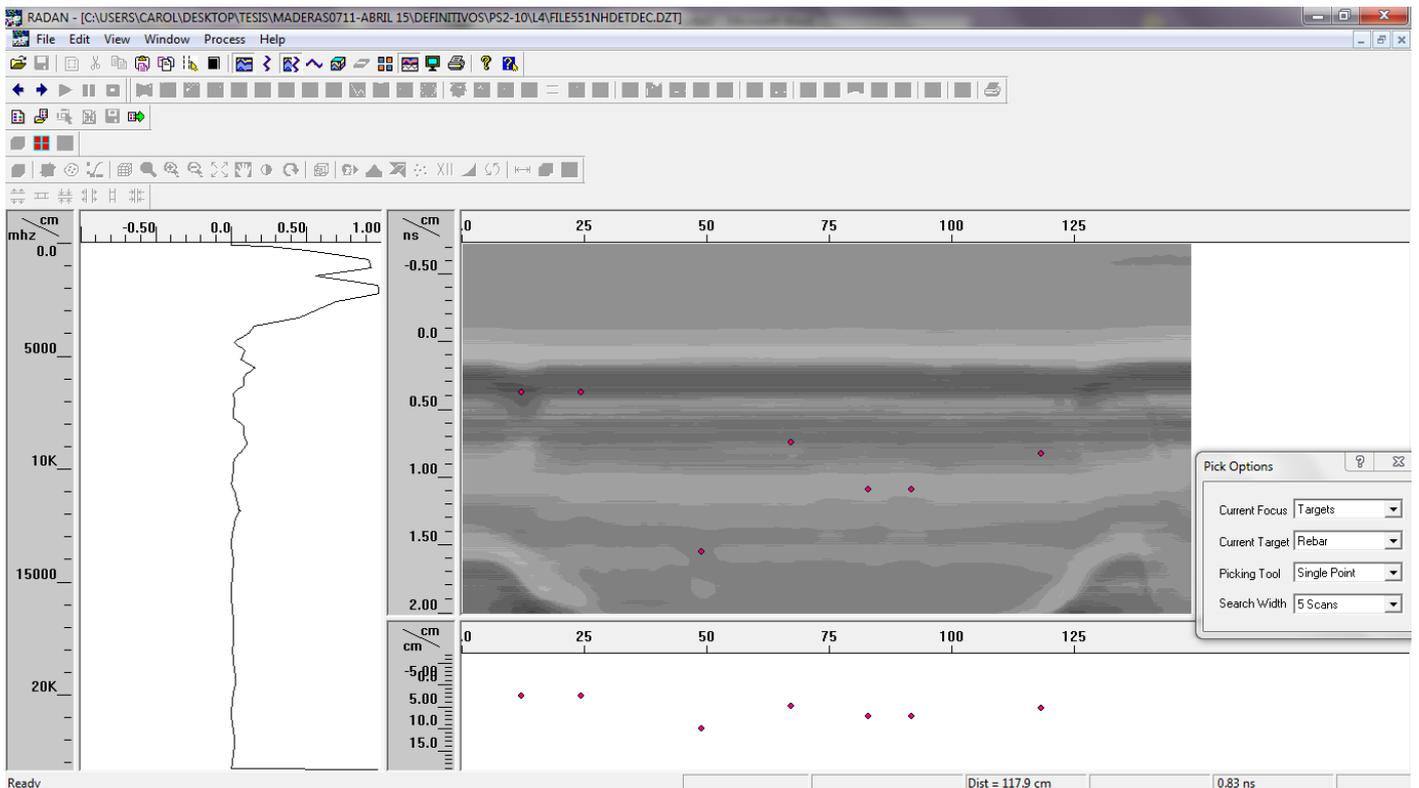


En $x=97$ cm no detecta la presencia de irregularidades:

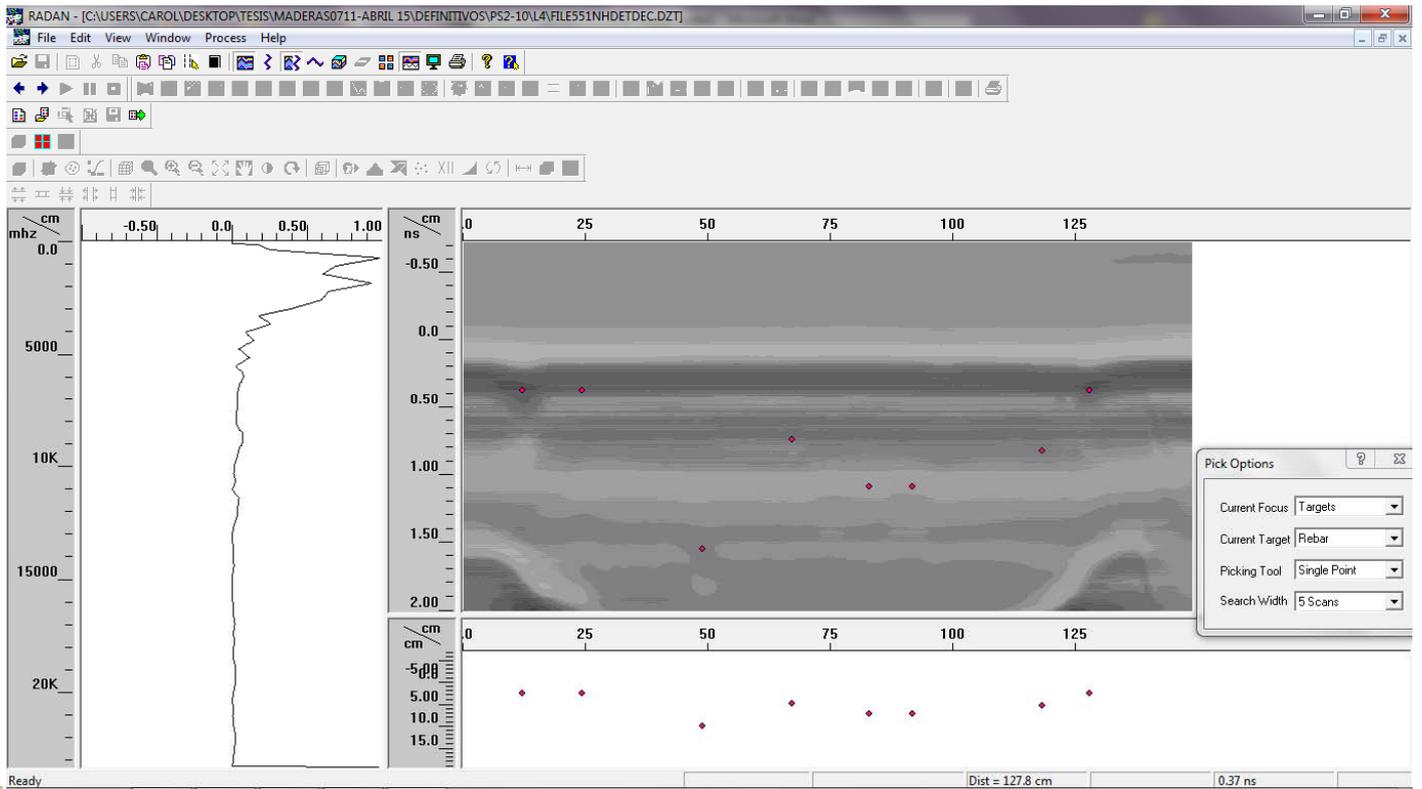


245

En $x=117$ cm detecta el nudo 7 de tracción, del 3 del canto 1, el 3 del canto 2 y el 3 y 4 de compresión:

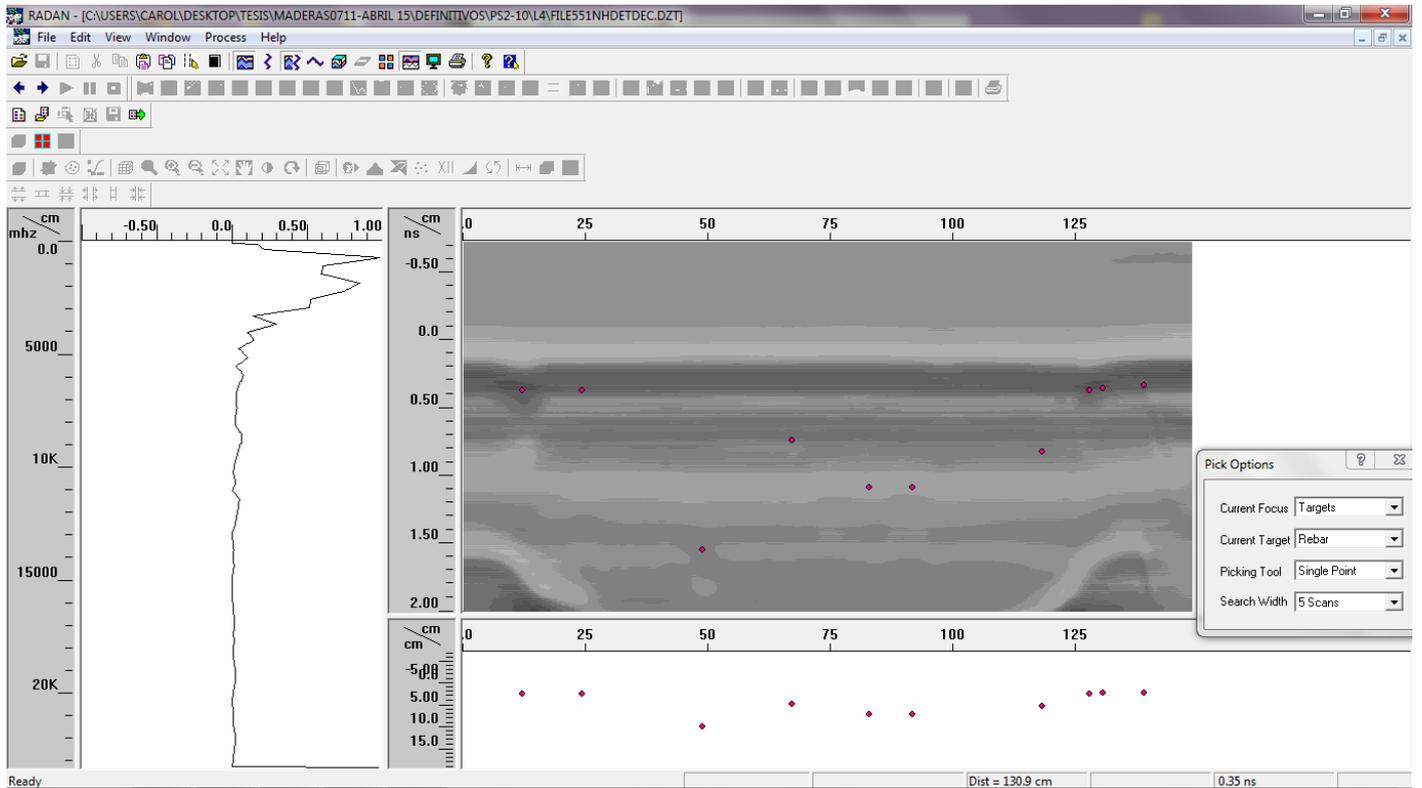


En $x=127$ cm detecta el nudo 3 del canto 1 y el nudo 3 del canto 2:

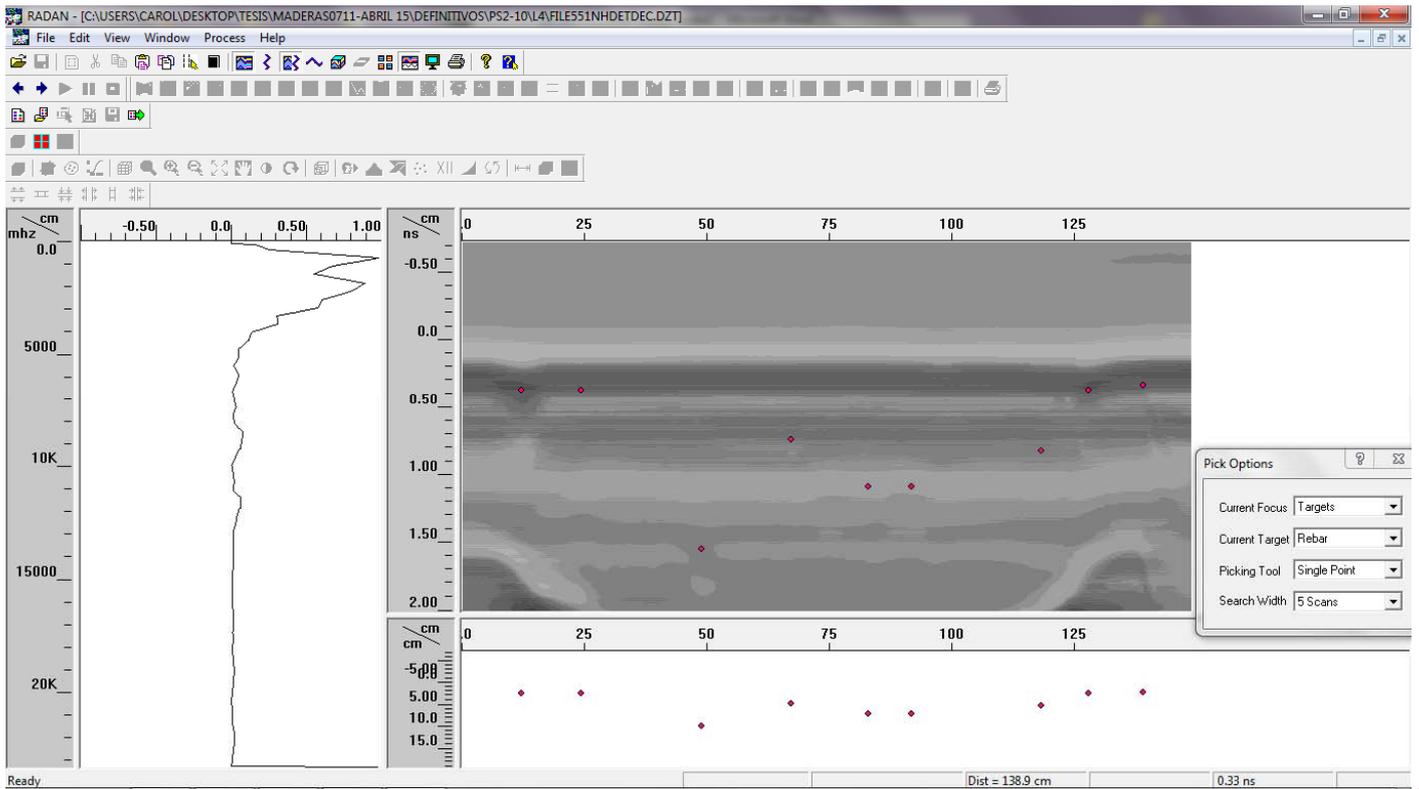


246 TT

En $x=130$ cm detecta una irregularidad oculta:

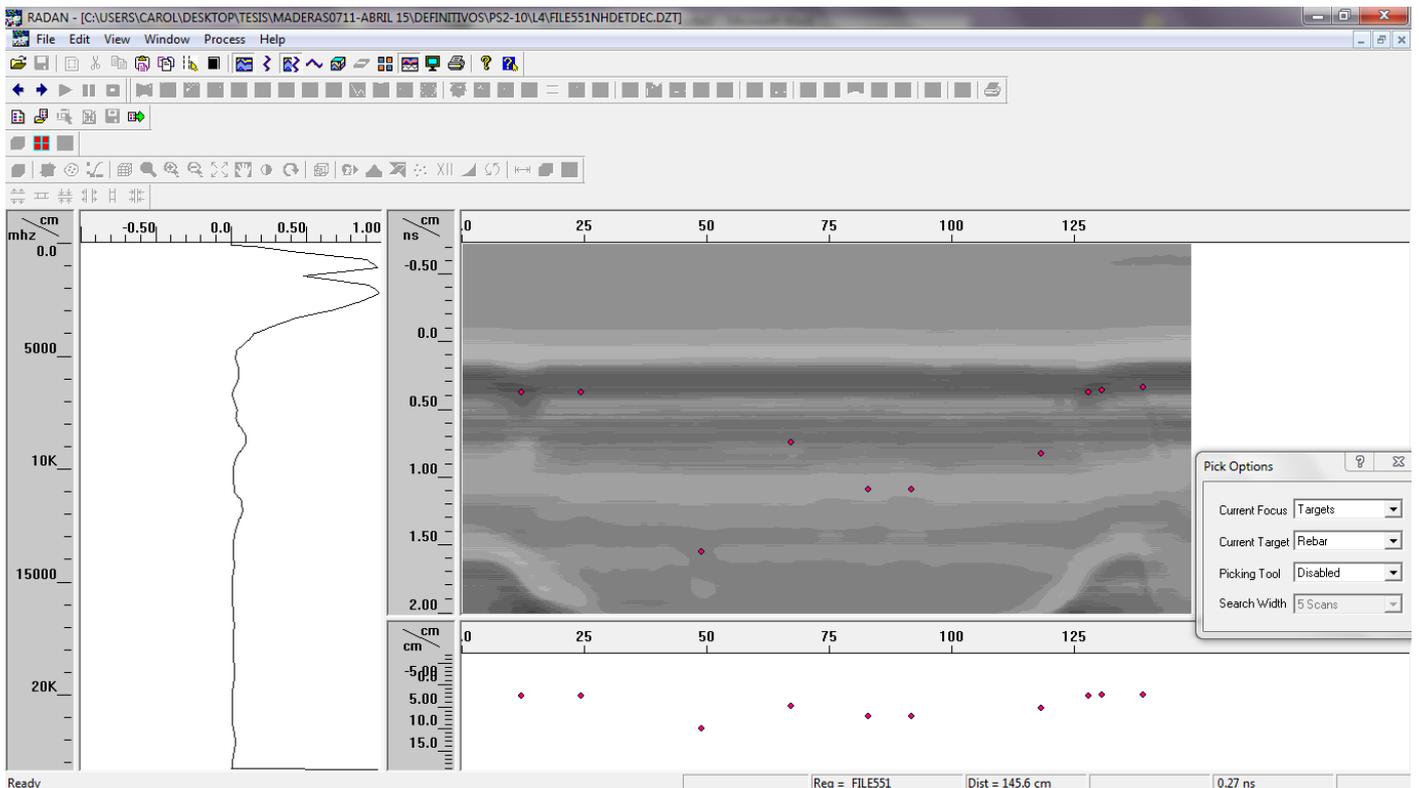


En $x=148$ cm hay una irregularidad oculta que se detecta de manera contundente:

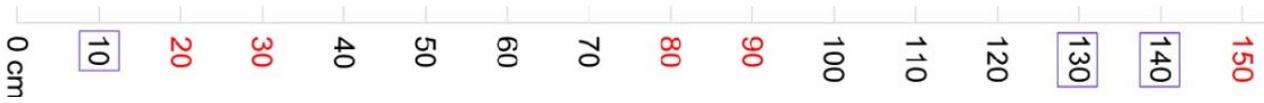


247

Al final de la viga ya no detecta nada:



PS2-11



Cara tracción



Canto 1

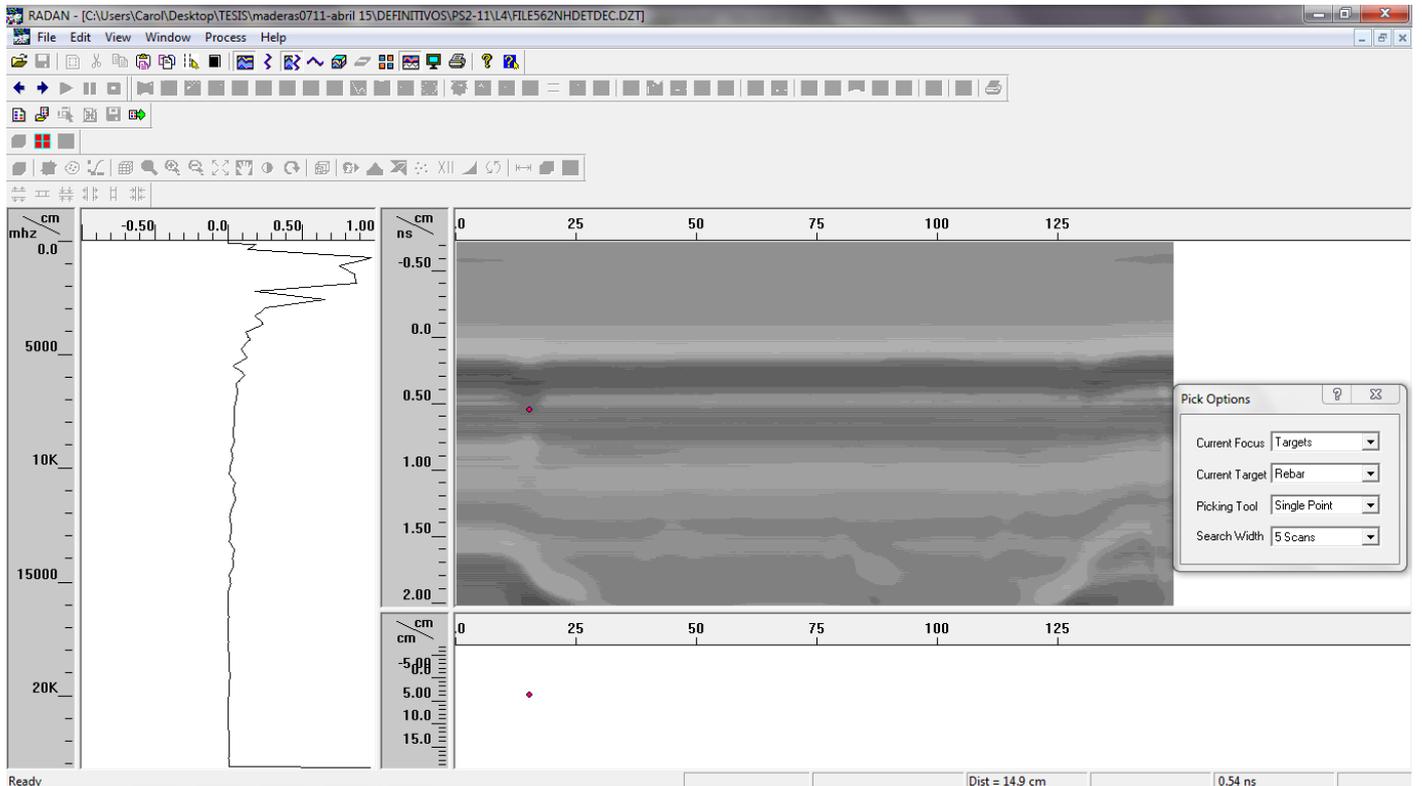


Cara compresión

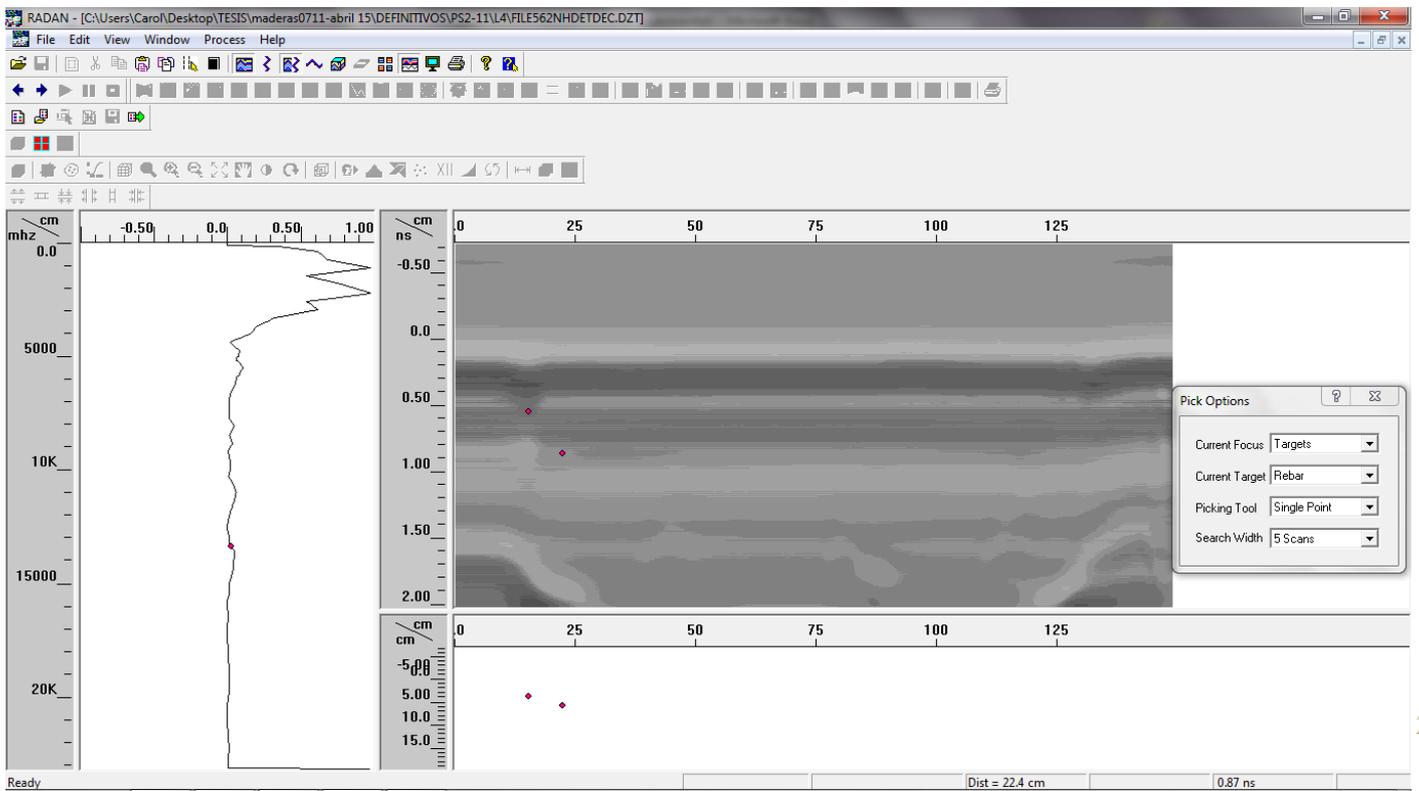


Canto 2

En $x=25$ cm detecta una irregularidad oculta:

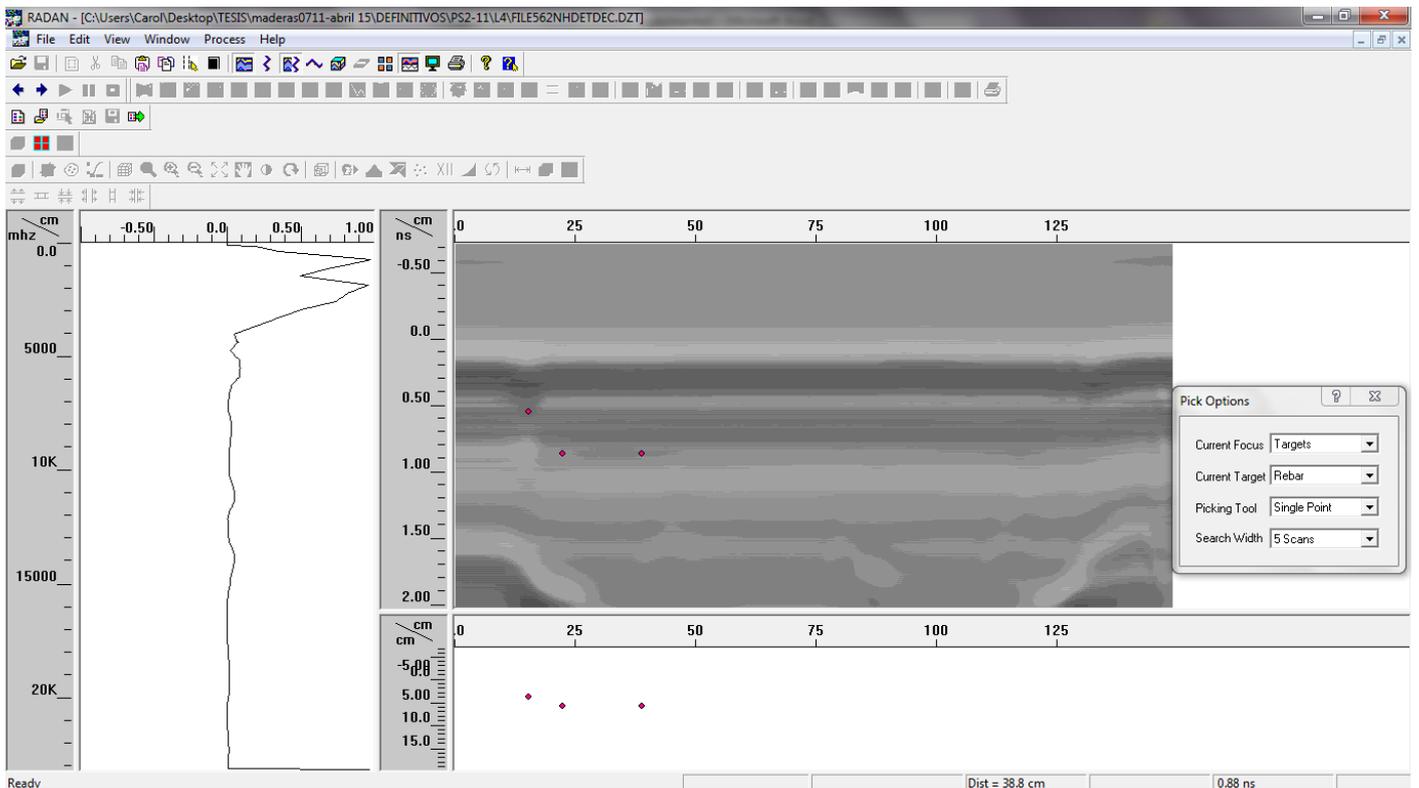


En $x=23$ cm se detecta el nudo 3 de tracción:

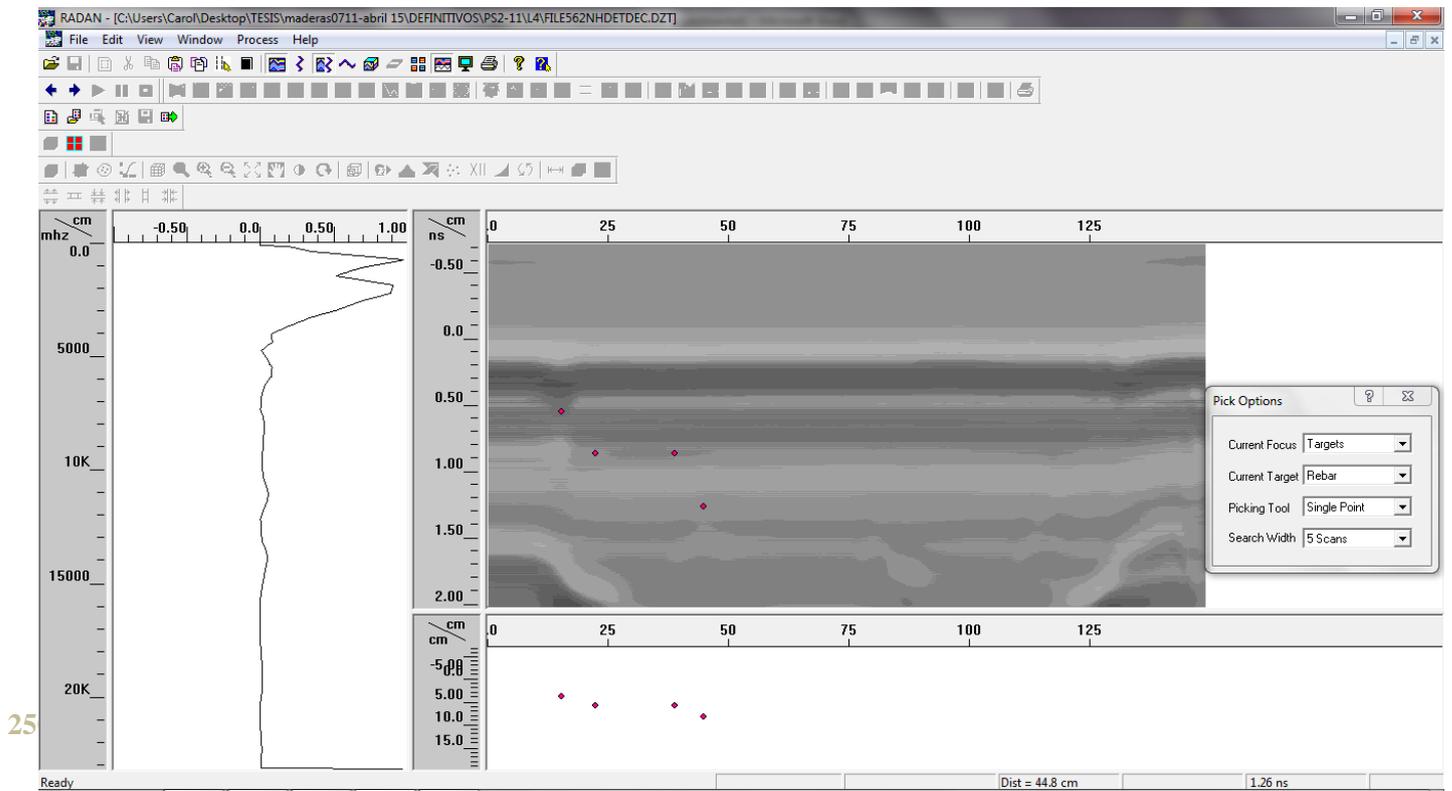


249 †

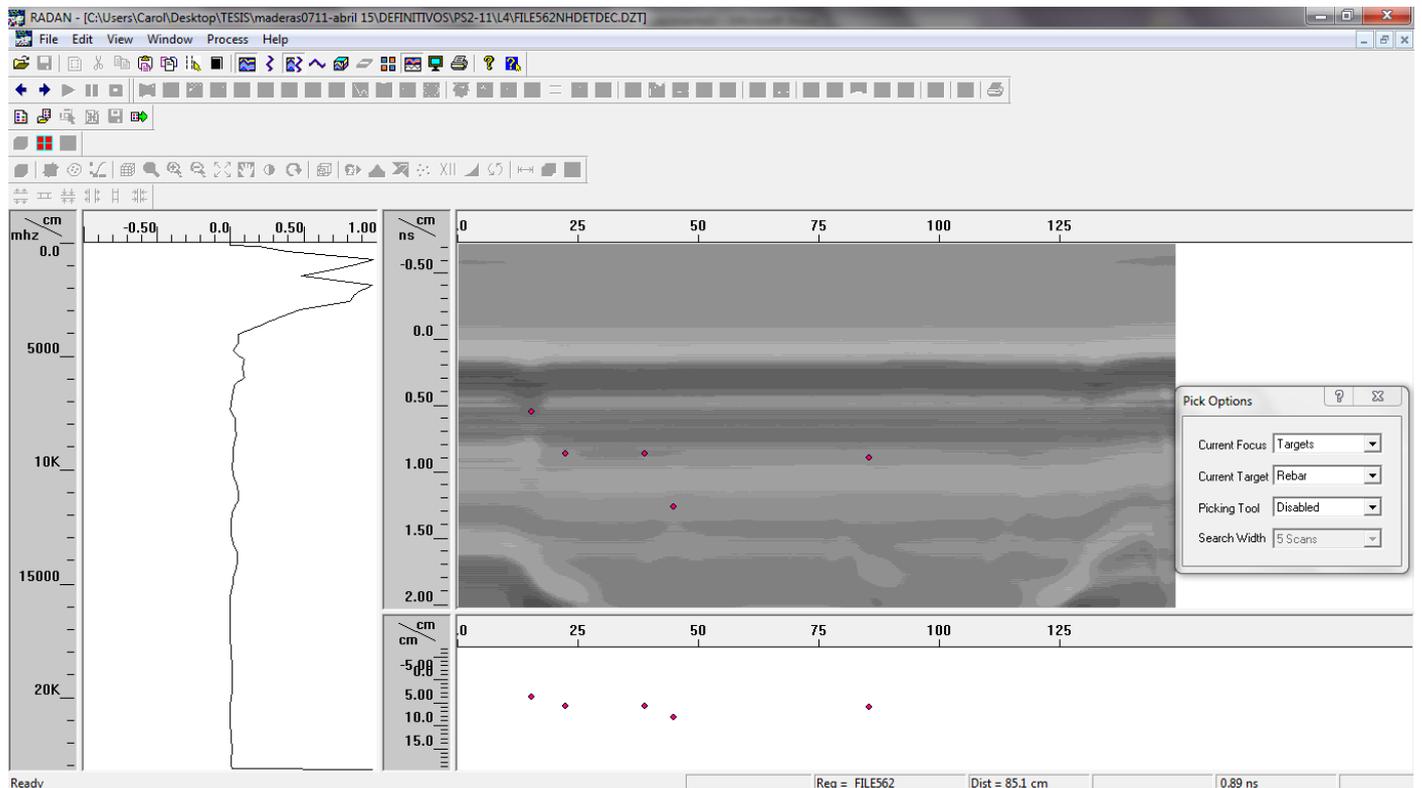
En $x=38$ cm se detecta el nudo4 de tracción, el 1 del canto 1 y el 2 del canto 2:



En x=45 cm detecta el nudo 4 de tracción:

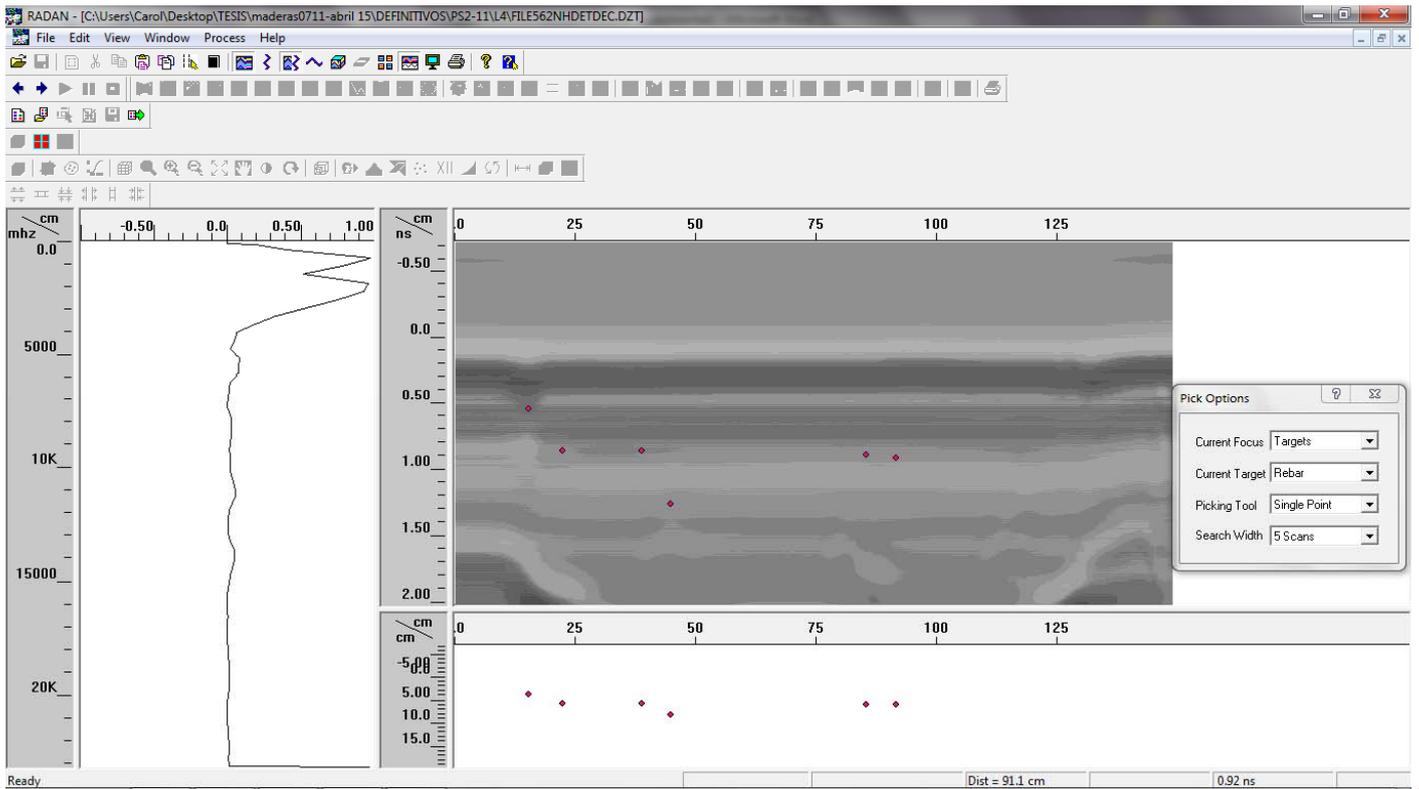


En x=85 cm detecta el nudo 5 de tracción, el 2 del canto 1 y el 3 de compresión:



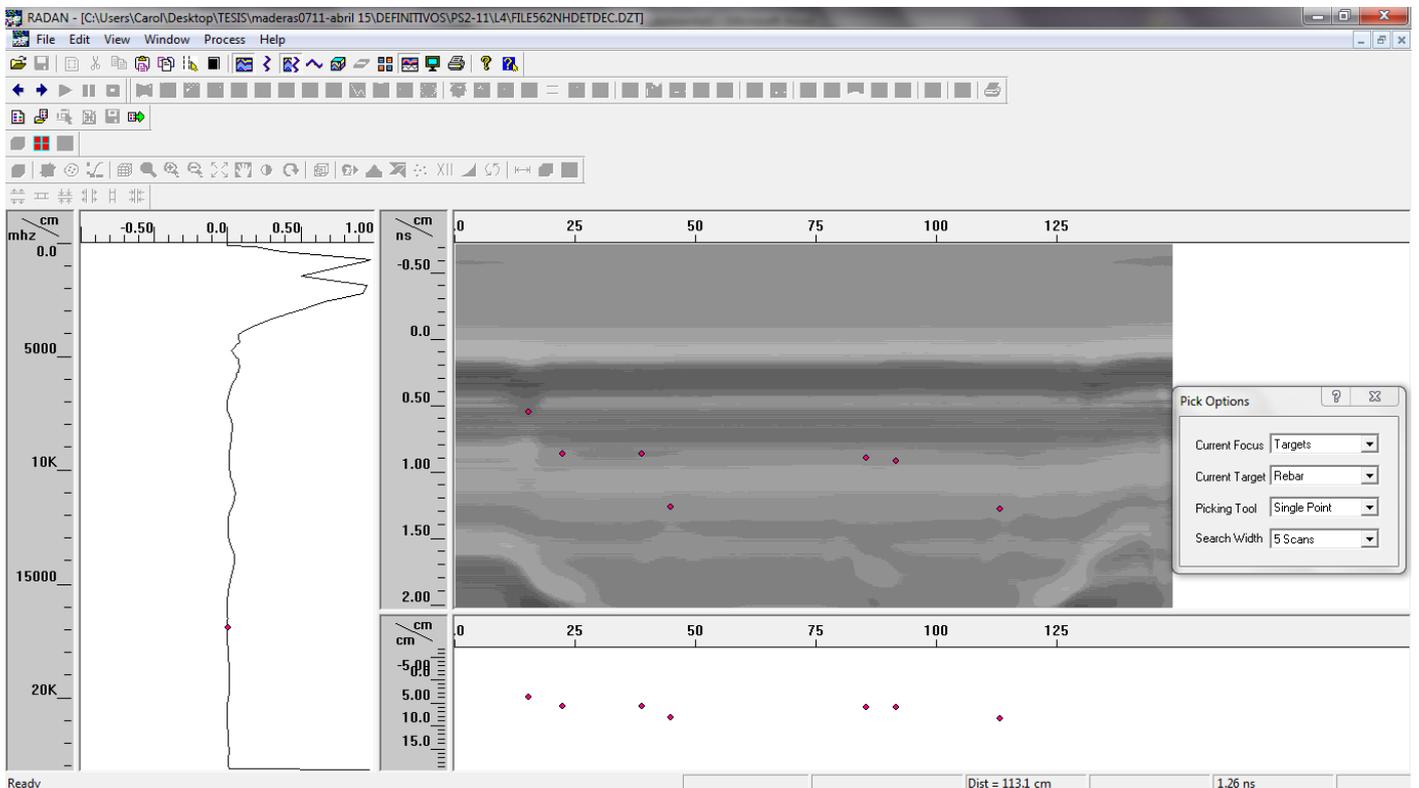
A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

En $x=90$ cm detecta los nudos 6 y 7 de tracción y el nudo 3 del canto 2:

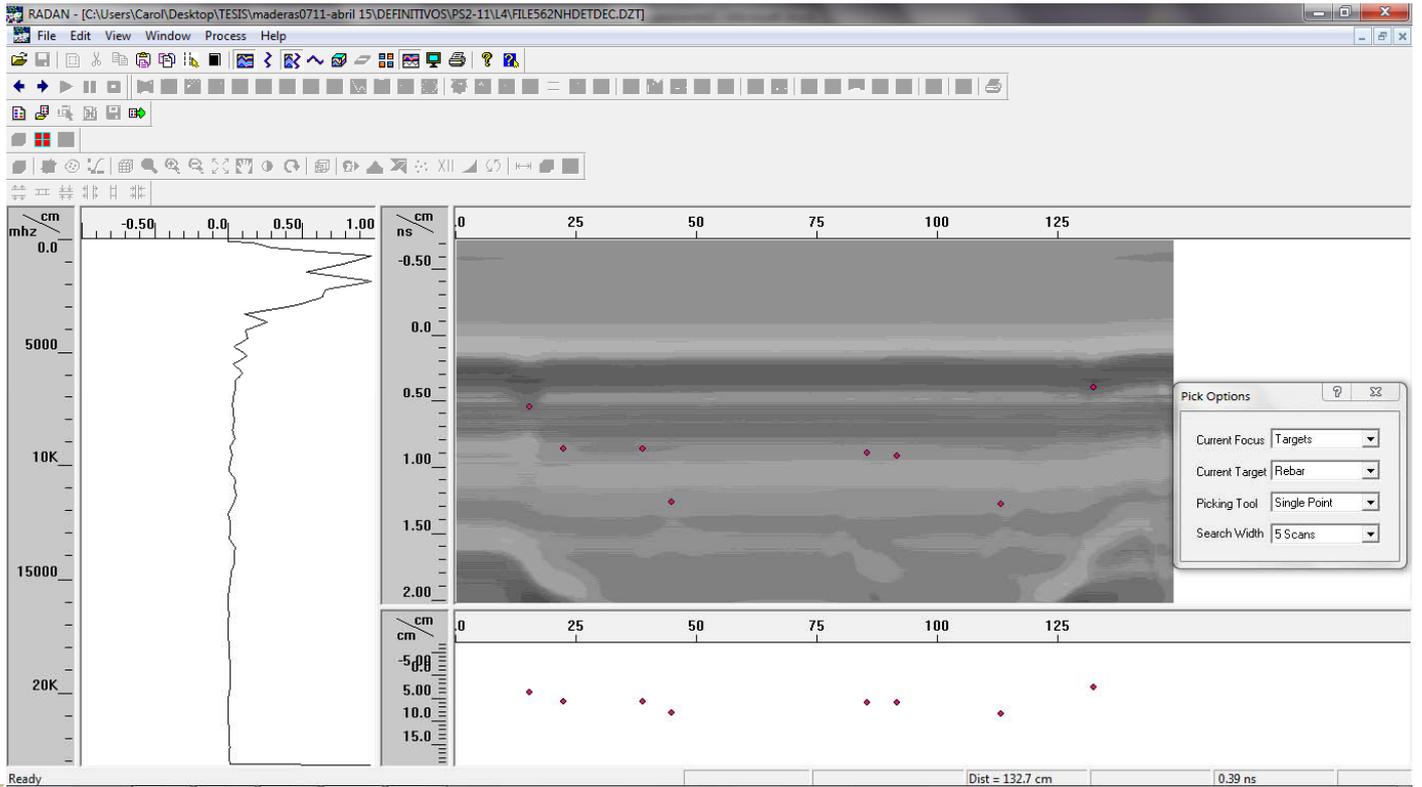


251+

En $x=112$ cm detecta una irregularidad oculta, punto por donde rompe esta viga:



Hasta $x=132$ cm detecta irregularidades ocultas, y en $x=132$ cm detecta los nudos 4 y 5 de compresión:



PS2-15



Cara tracción



Canto 1



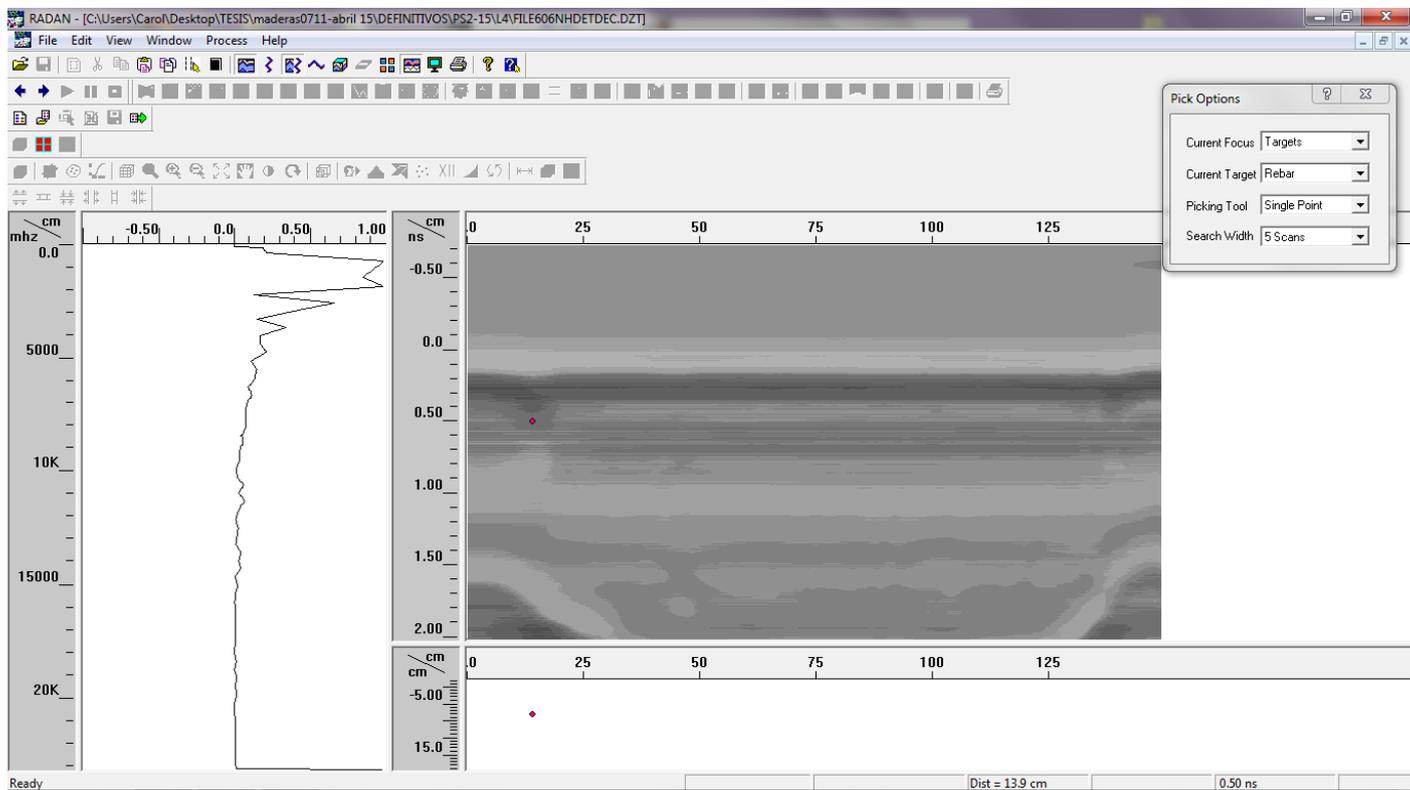
Cara compresión



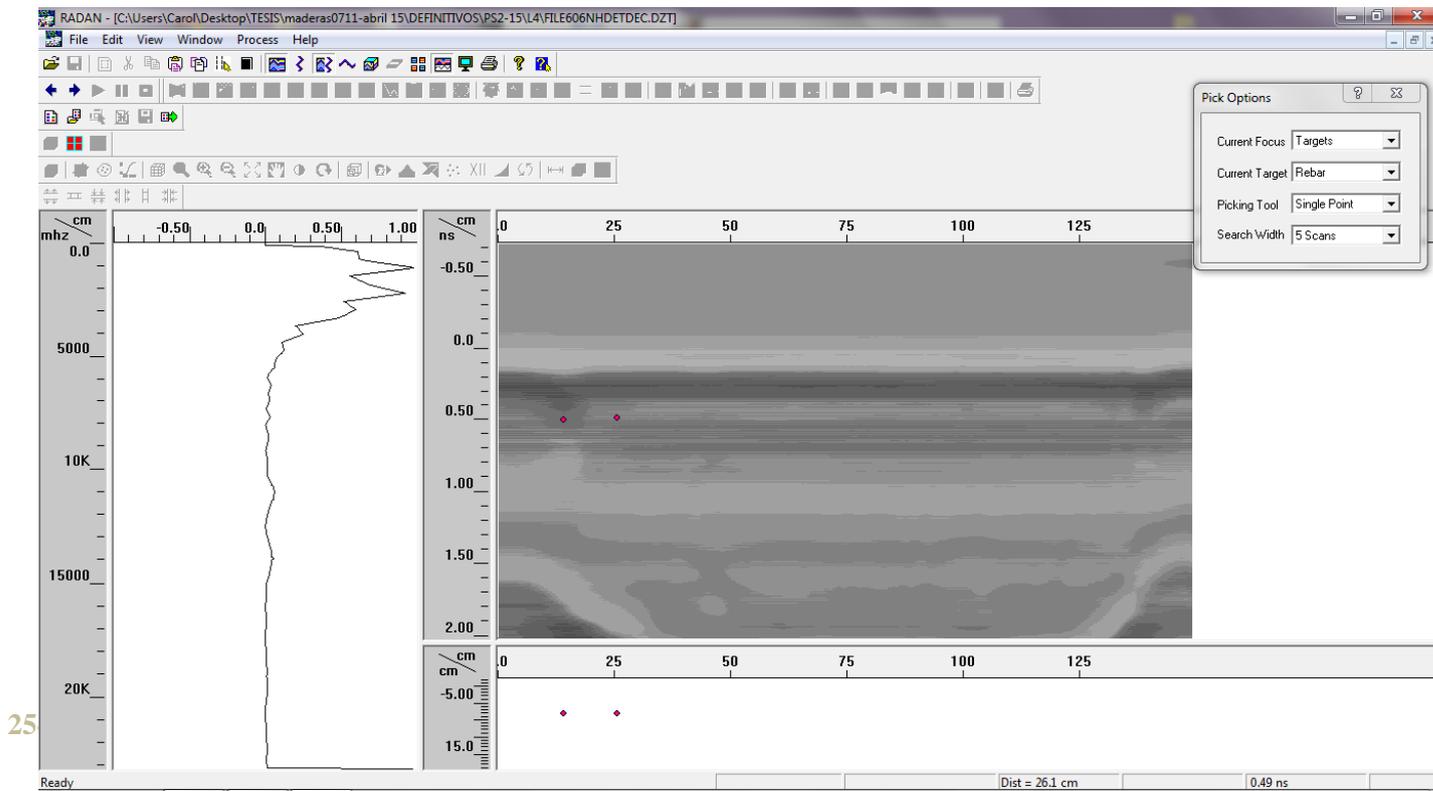
Canto 2

253+

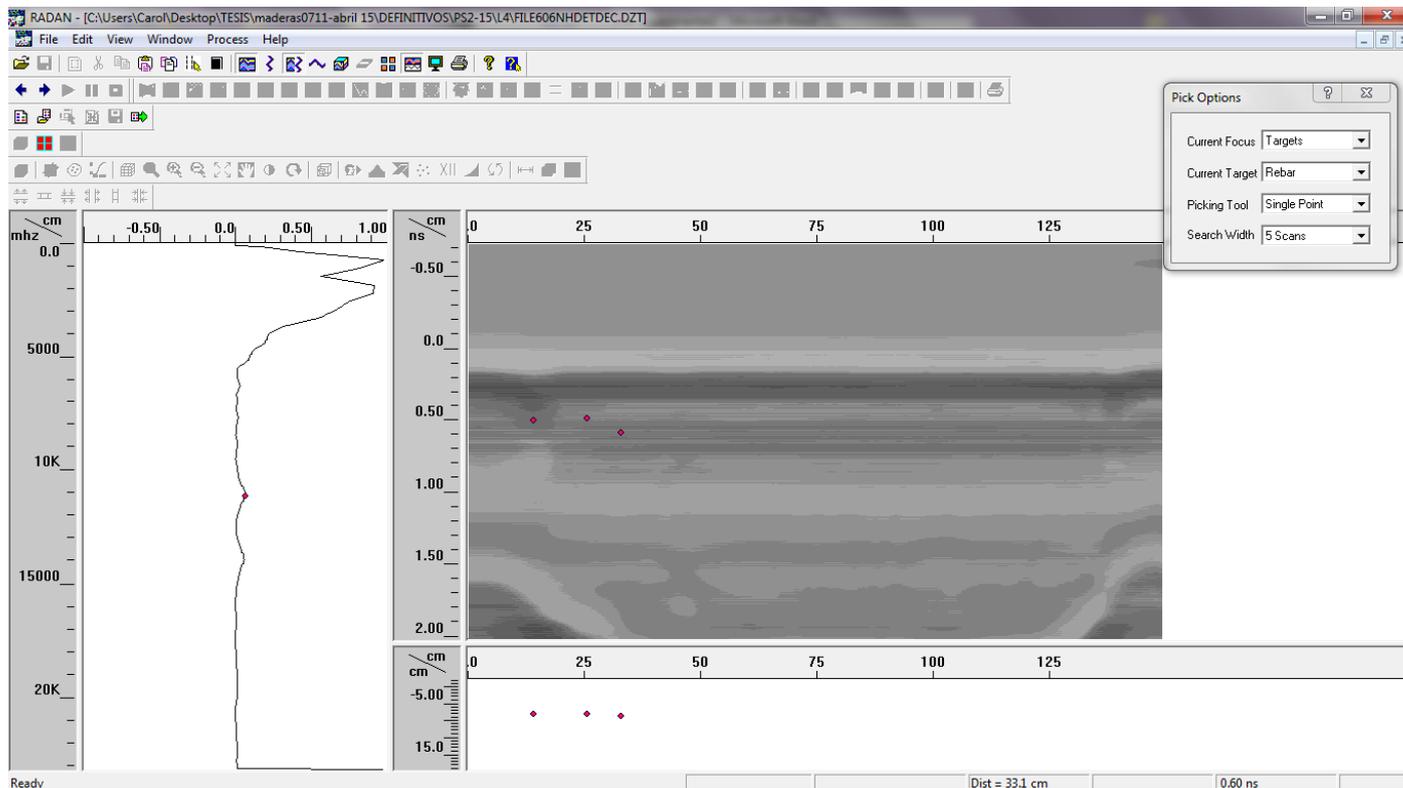
En $x=14$ cm detecta una irregularidad oculta:



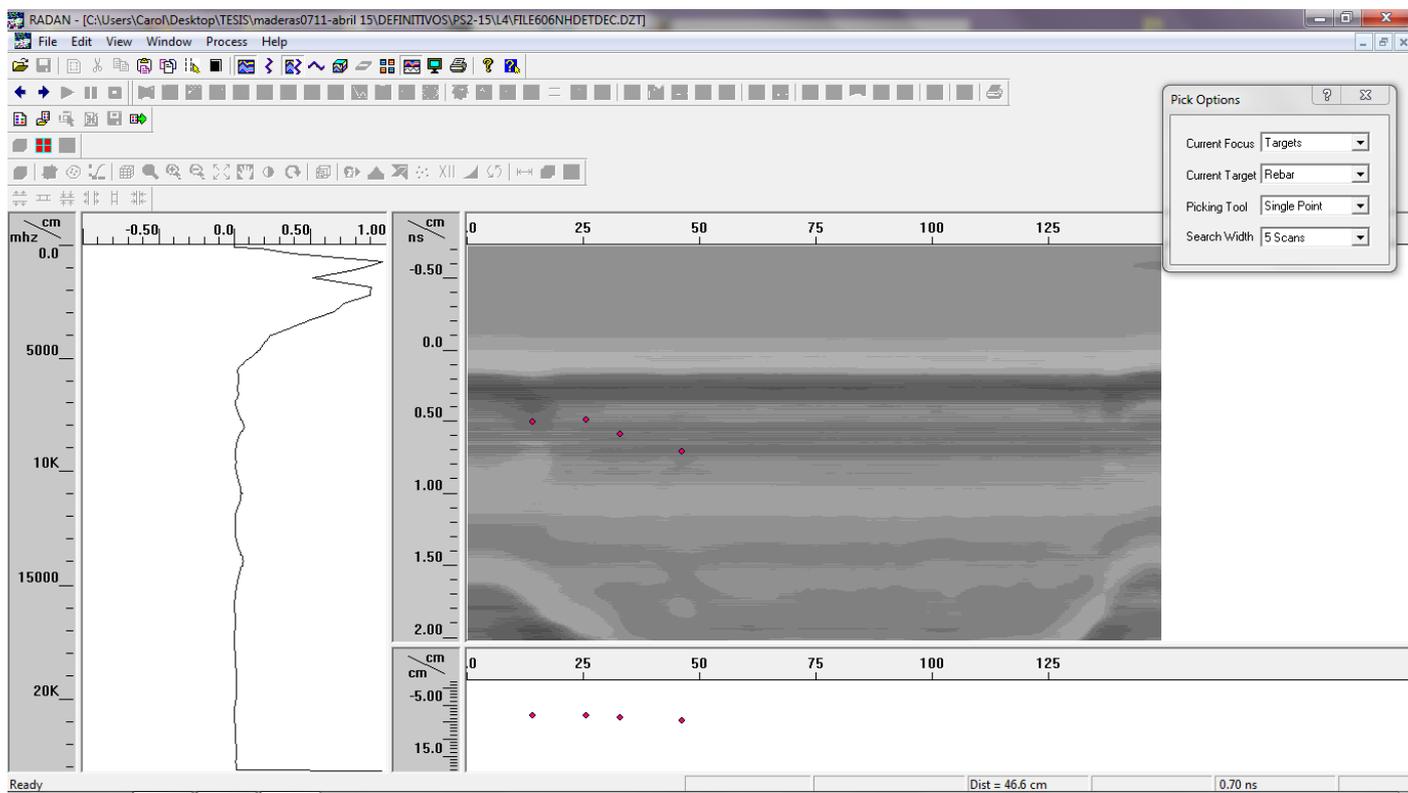
En $x=25$ cm detecta el nudo 1 de tracción, y el 1 y 2 de compresión:



En $x=33$ cm detecta el nudo 2 de tracción:

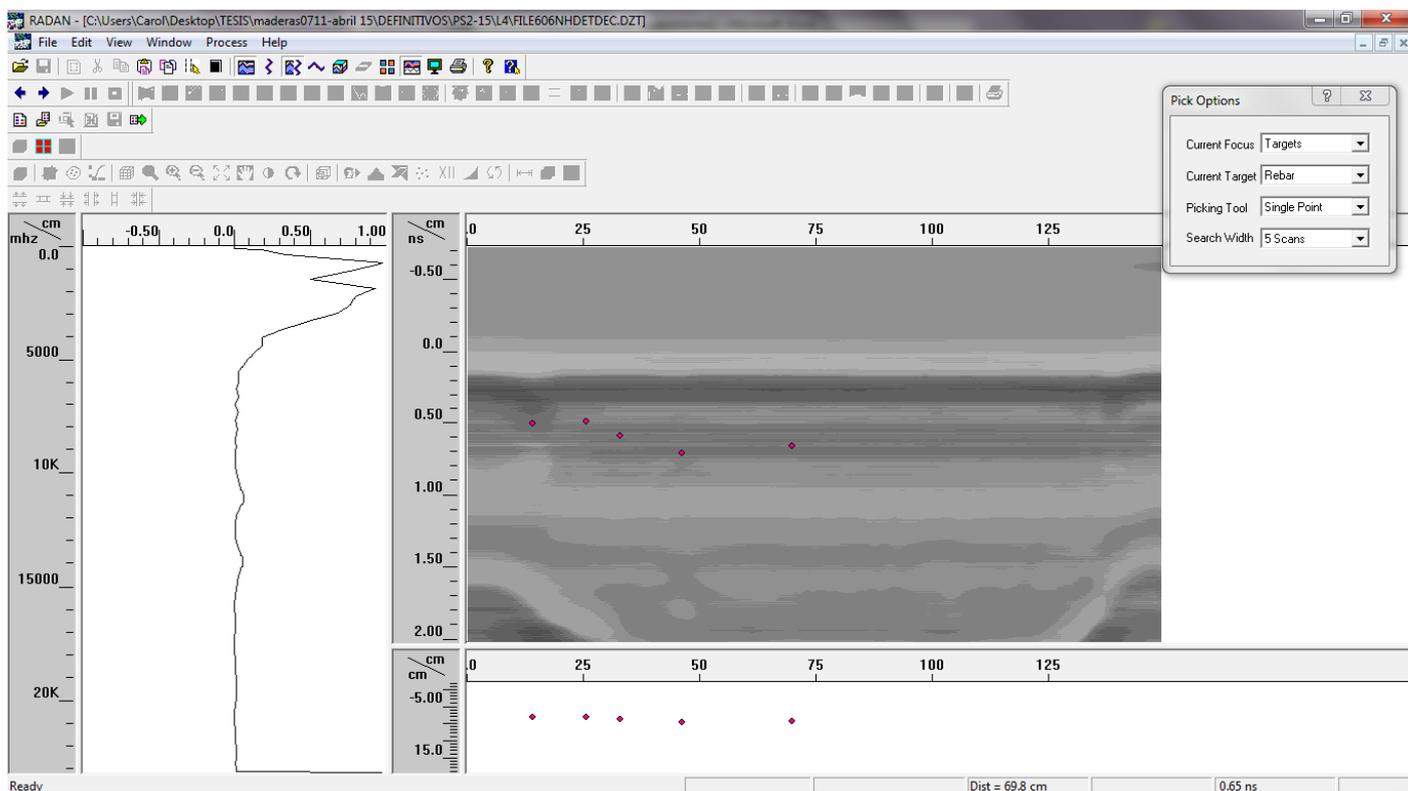


En $x=46,6$ cm detecta una irregularidad oculta, punto por donde rompe la viga:

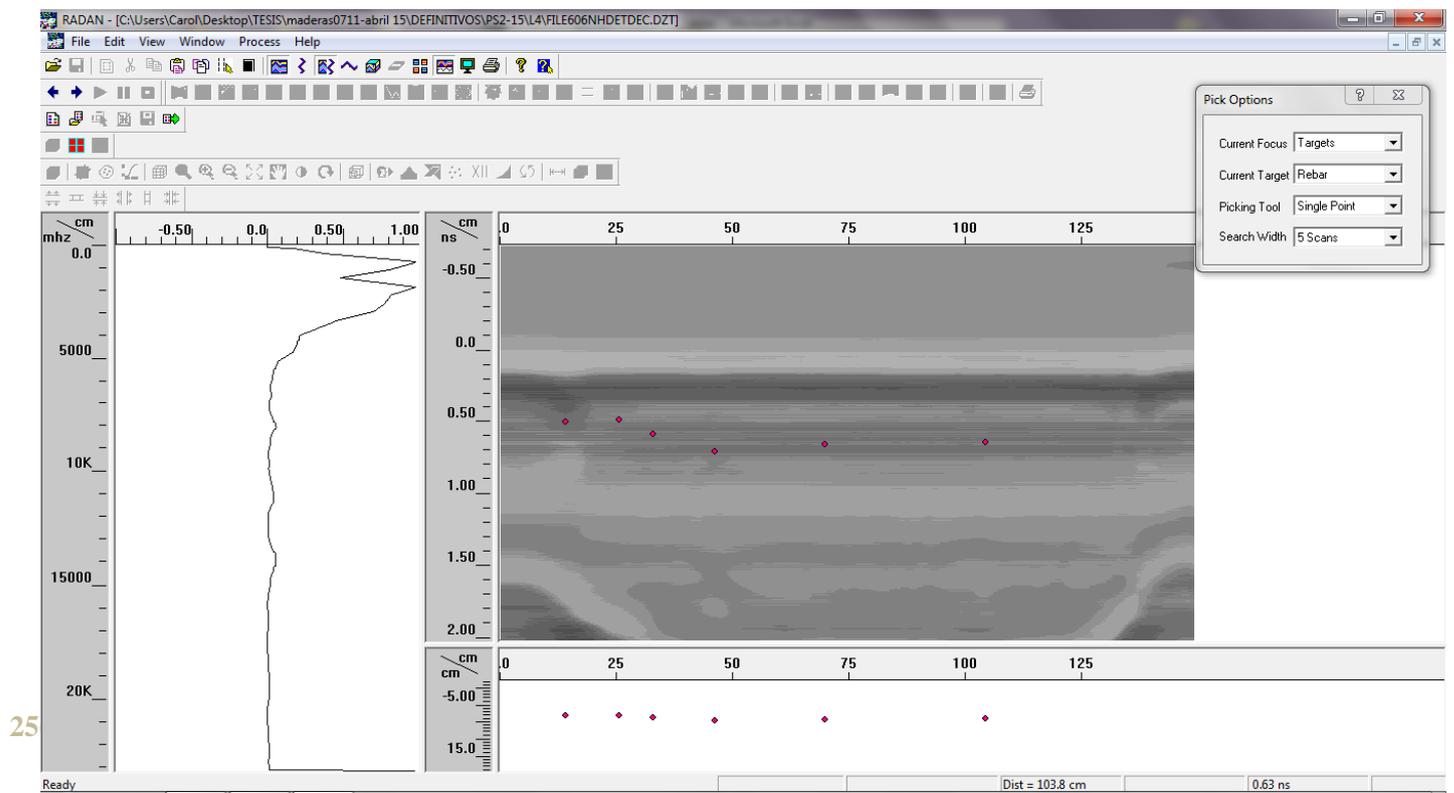


255+

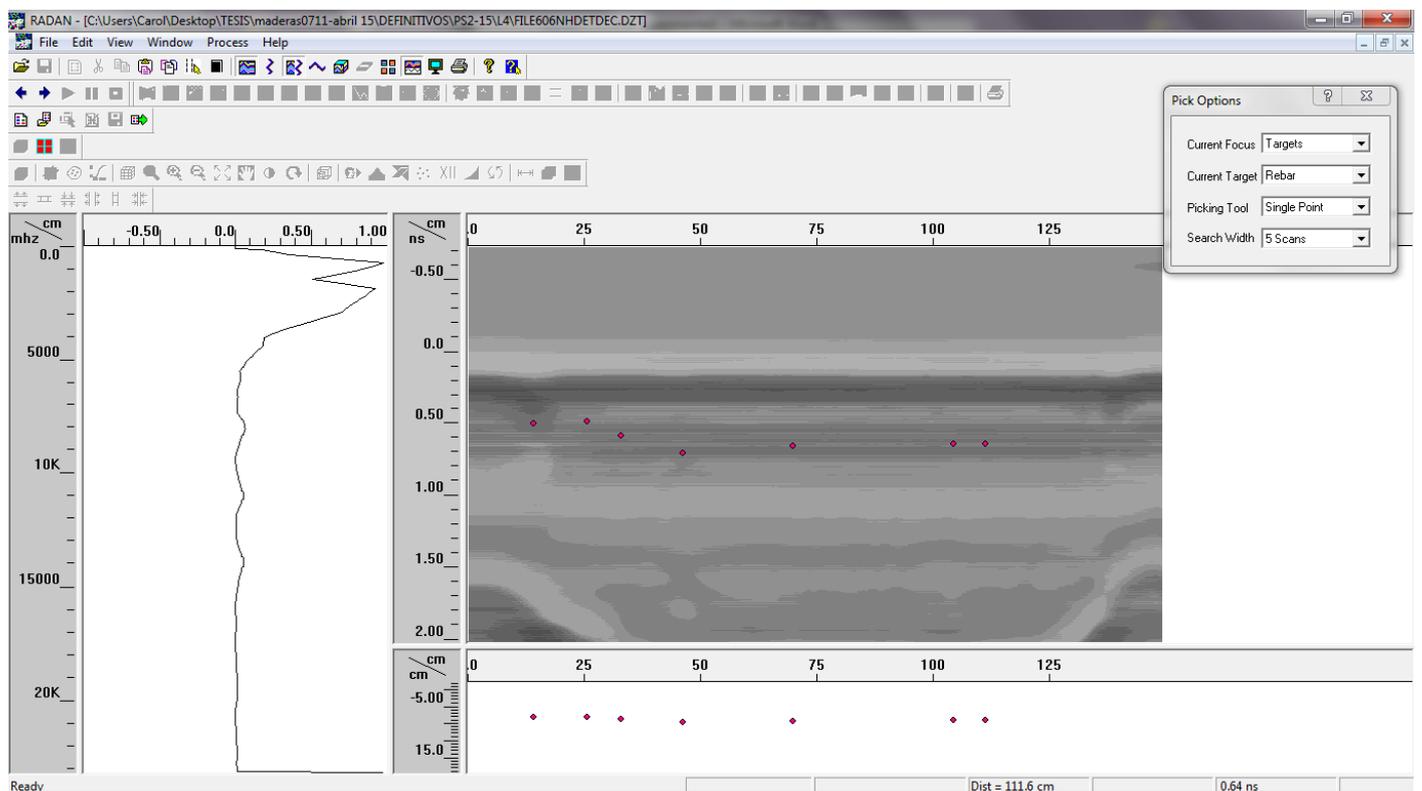
En $x=50$ cm detecta una zona de irregularidades ocultas:



En $x=103$ cm detecta el nudo 3 de tracción, el 5 y 6 de compresión y el 1 del canto 2:



En $x=113$ cm detecta el nudo 4 de tracción:



PS2-16



Cara tracción



Canto 1



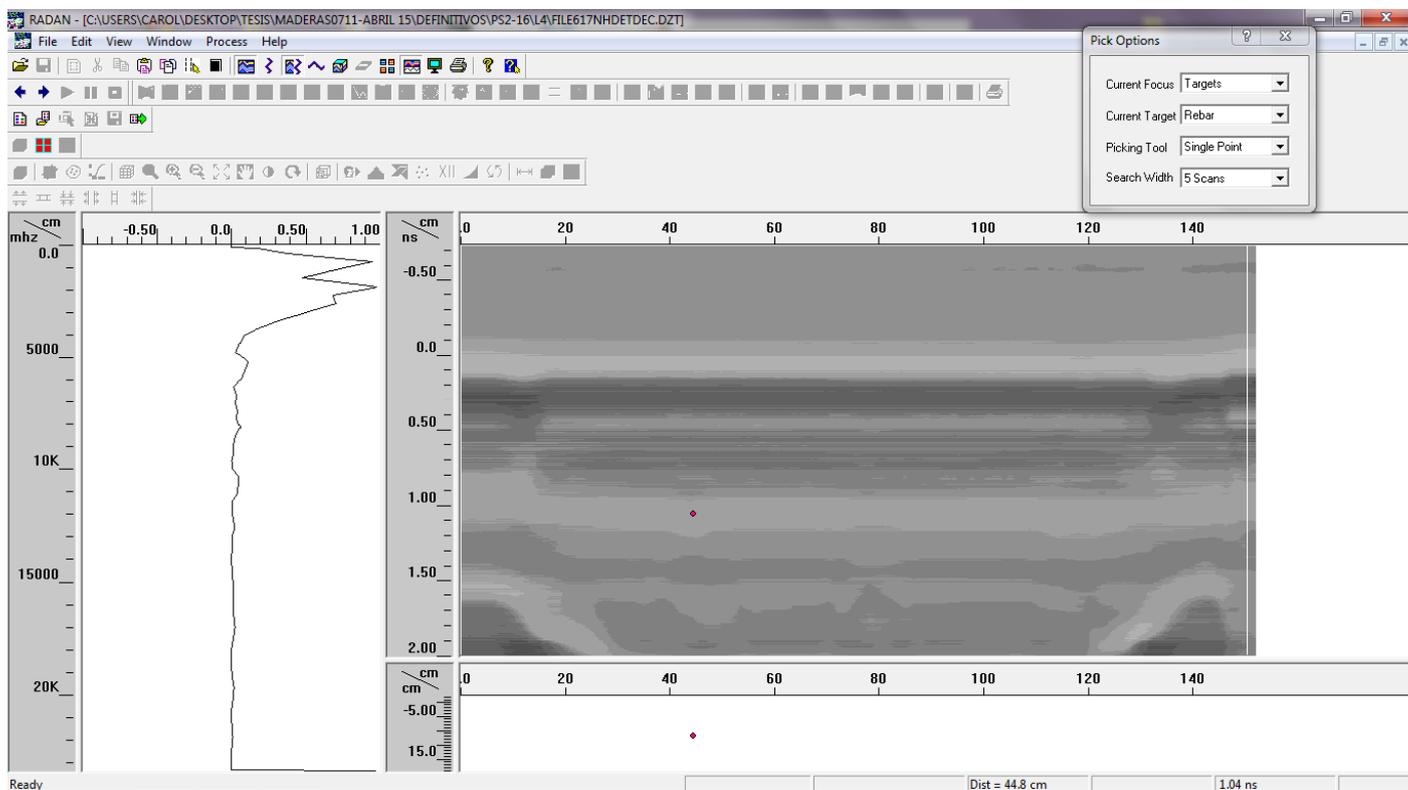
Cara compresión



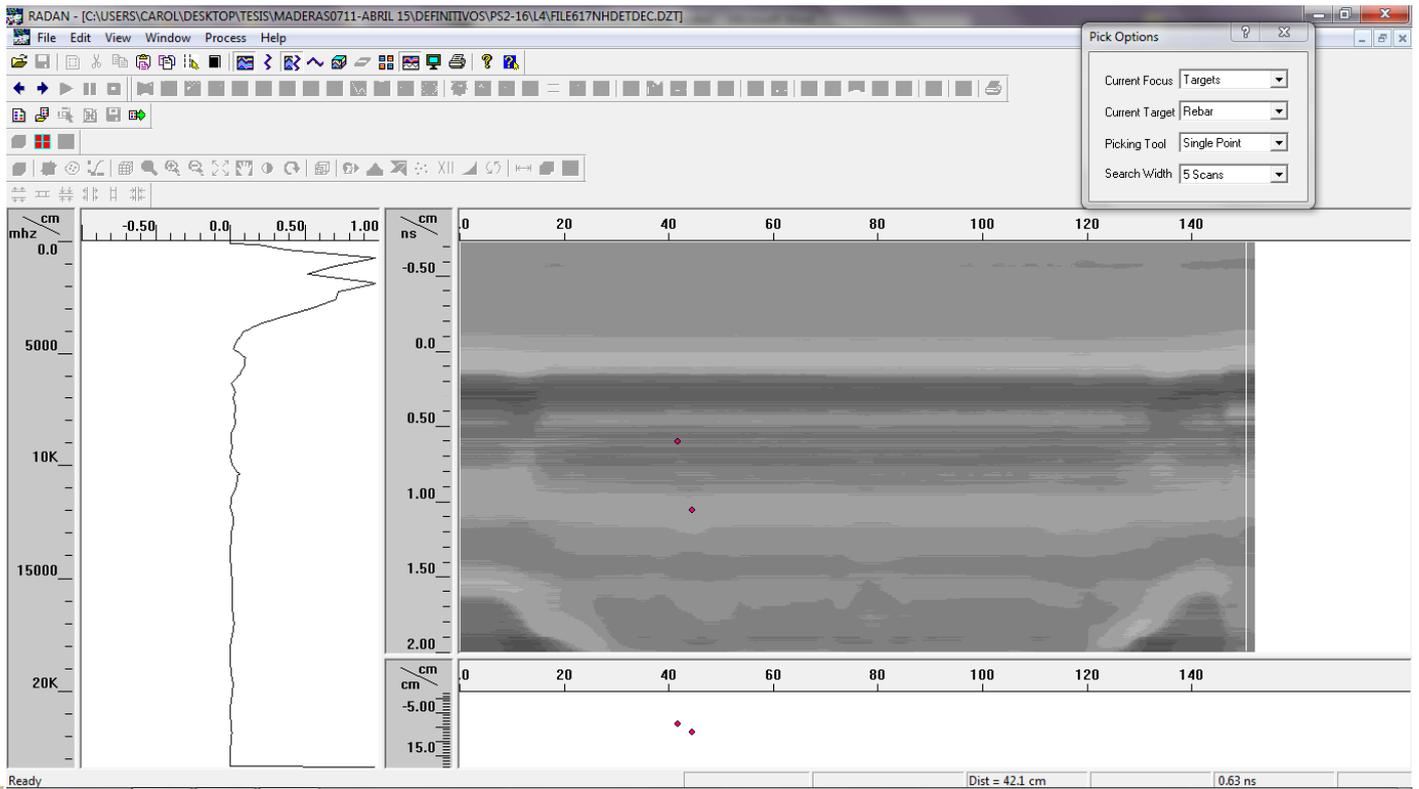
Canto 2

En x=44 cm detecta el nudo 3 de tracción y el 2 de compresión:

257 †

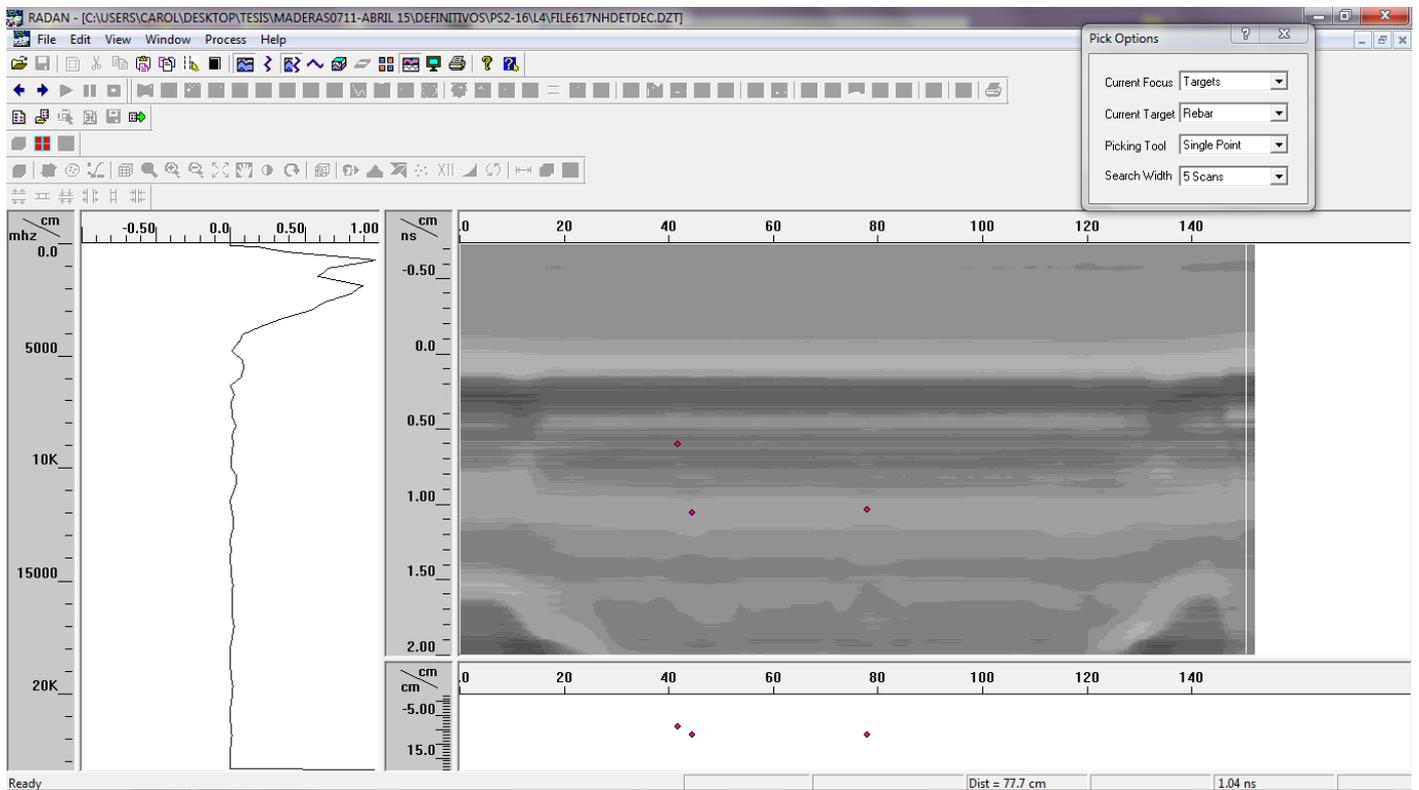


En x=31 cm detecta el nudo 2 de tracción:

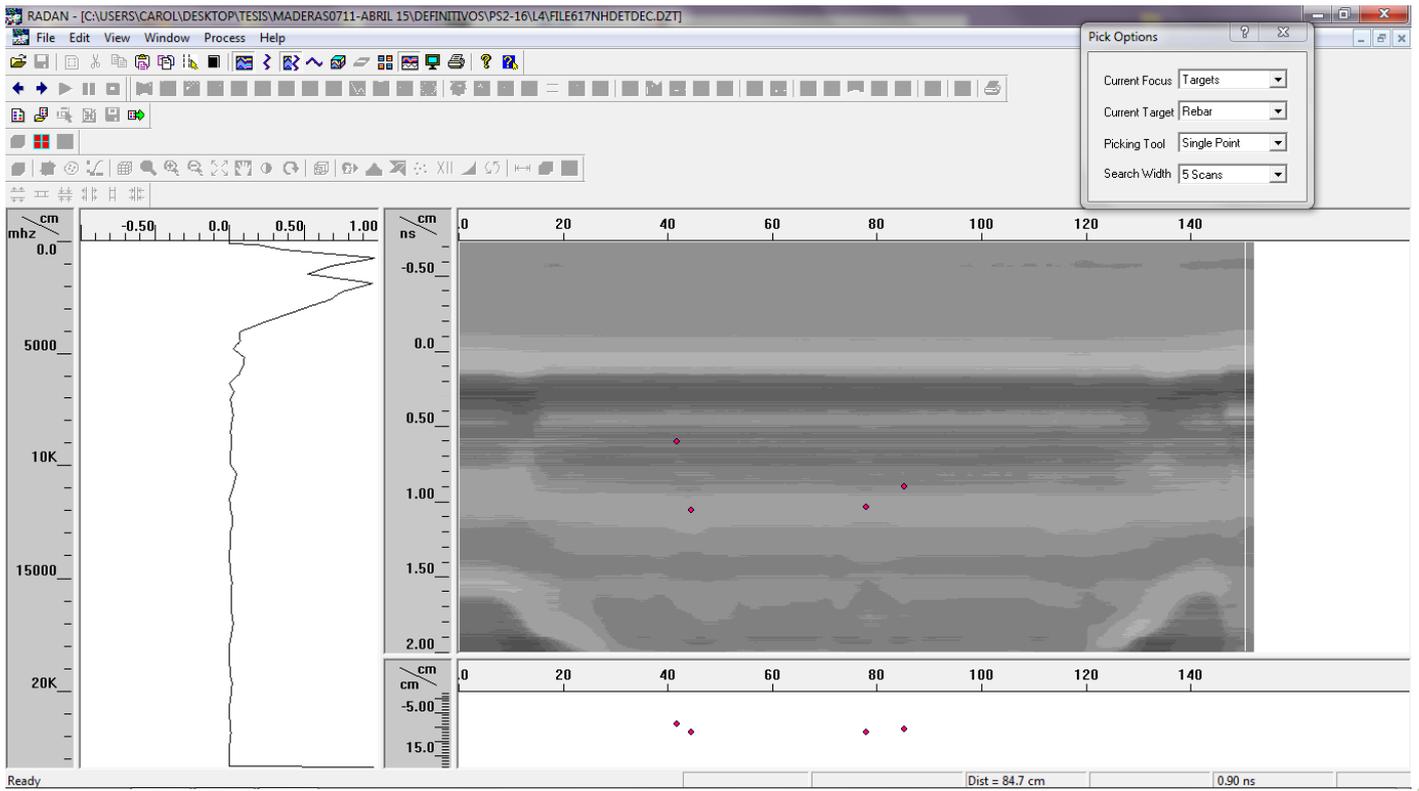


258 TT

En x=77 cm detecta el nudo 4 de tracción:

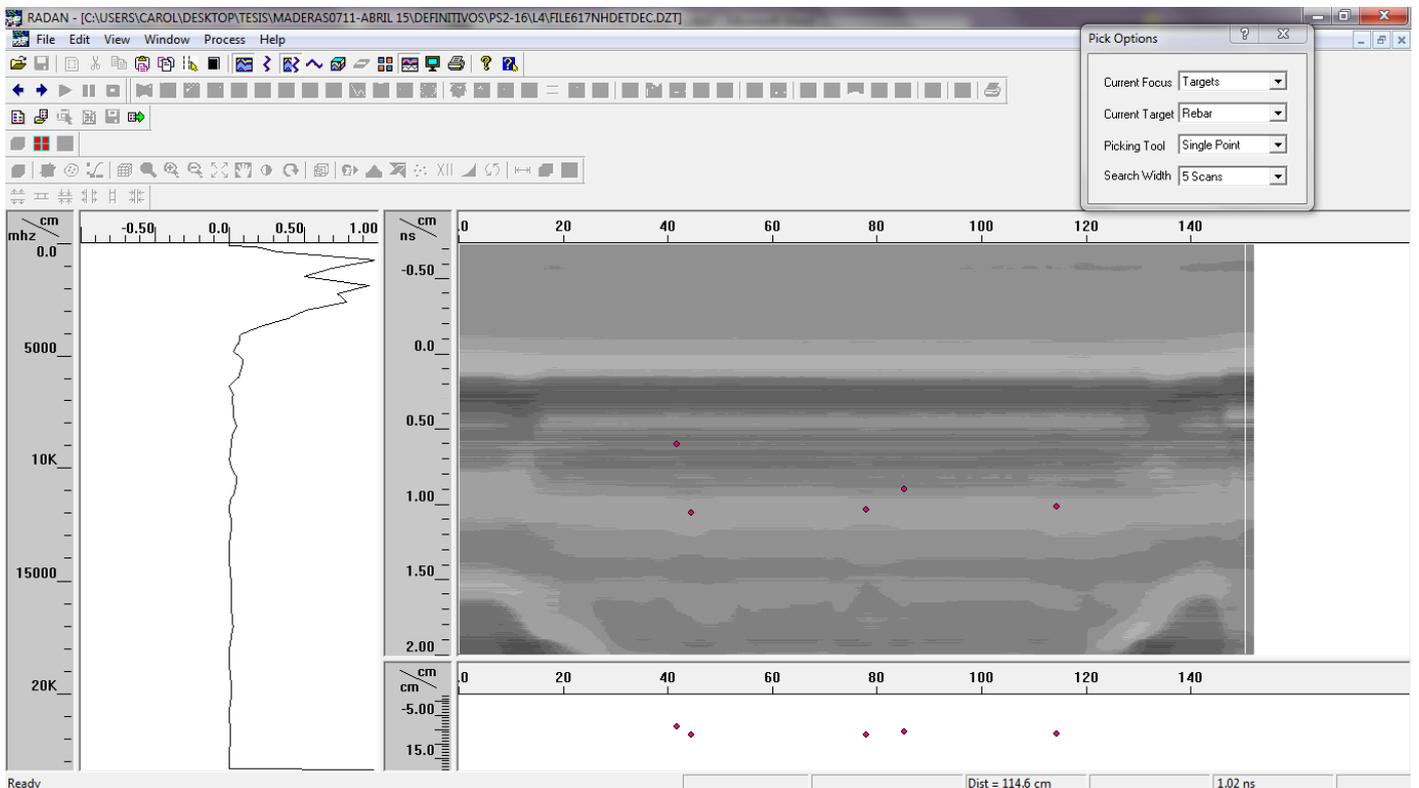


En x=84 cm detecta el nudo 5 de tracción, 2 de canto 1, 5 de compresión y el 1 del canto 2:

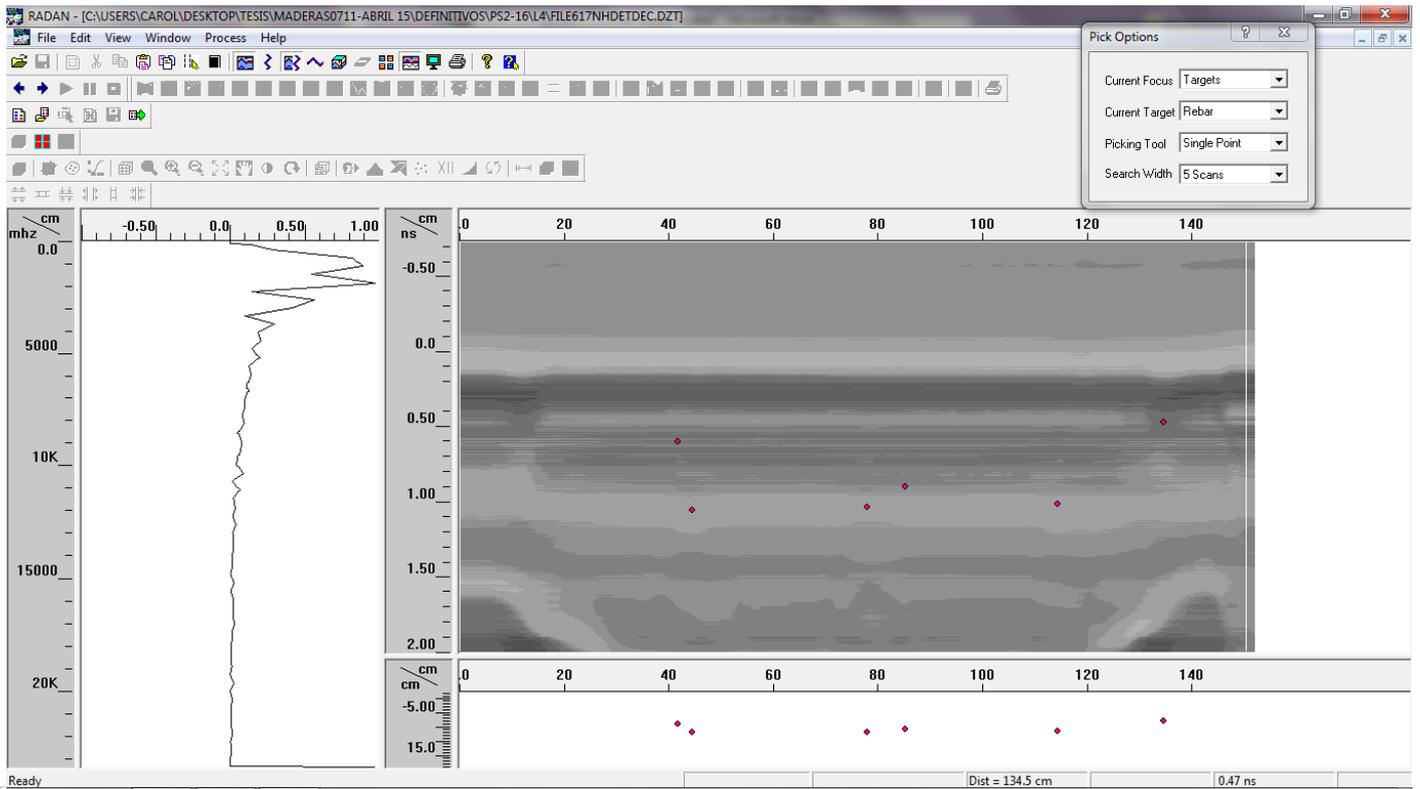


259

En x=113 cm detecta una irregularidad oculta:

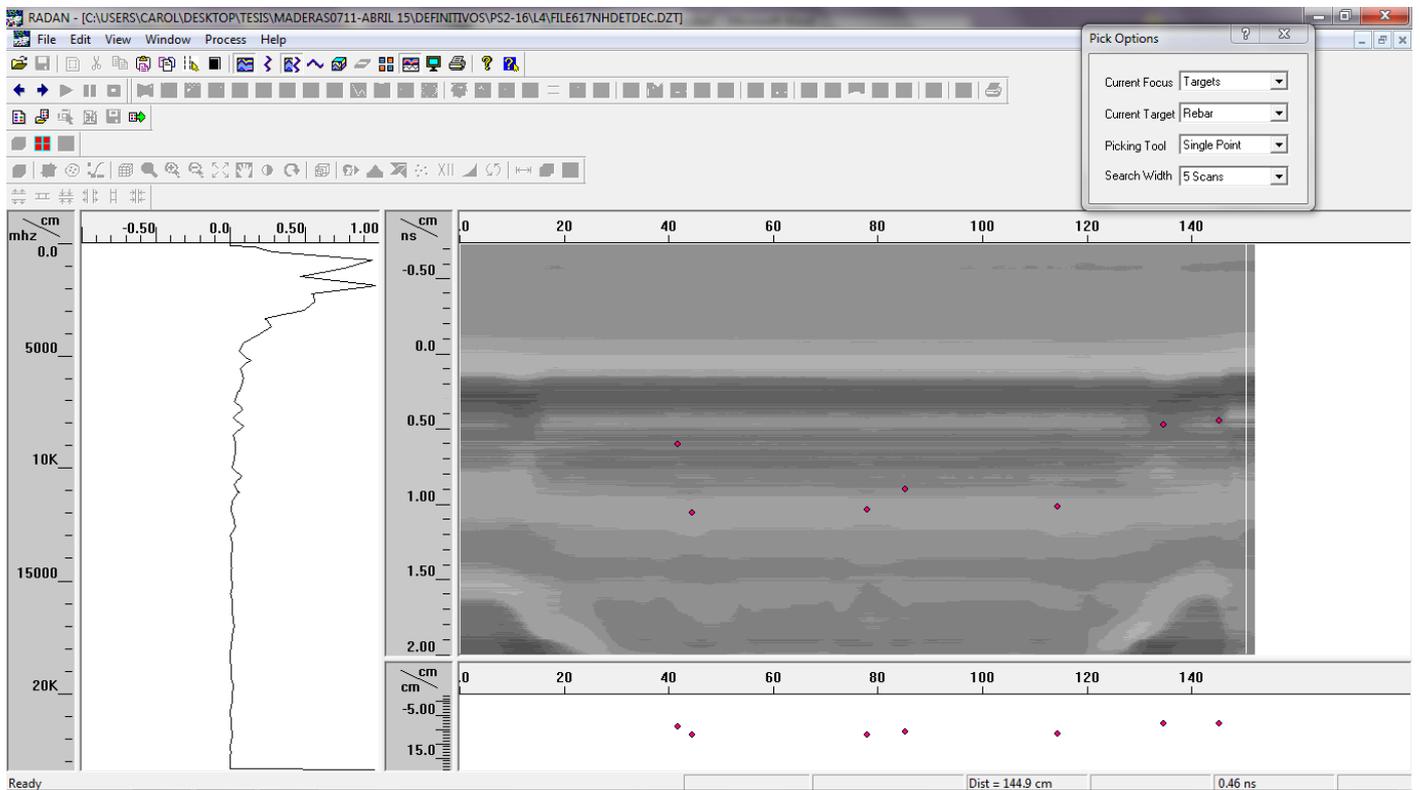


En $x=134$ cm detecta el nudo 6 de tracción, el 6, 7 y 8 de compresión, y el 2 del canto 2:



260 TT

En $x=145$ cm detecta el nudo 3 del canto 1:



PS2-18



Cara tracción



Canto 1

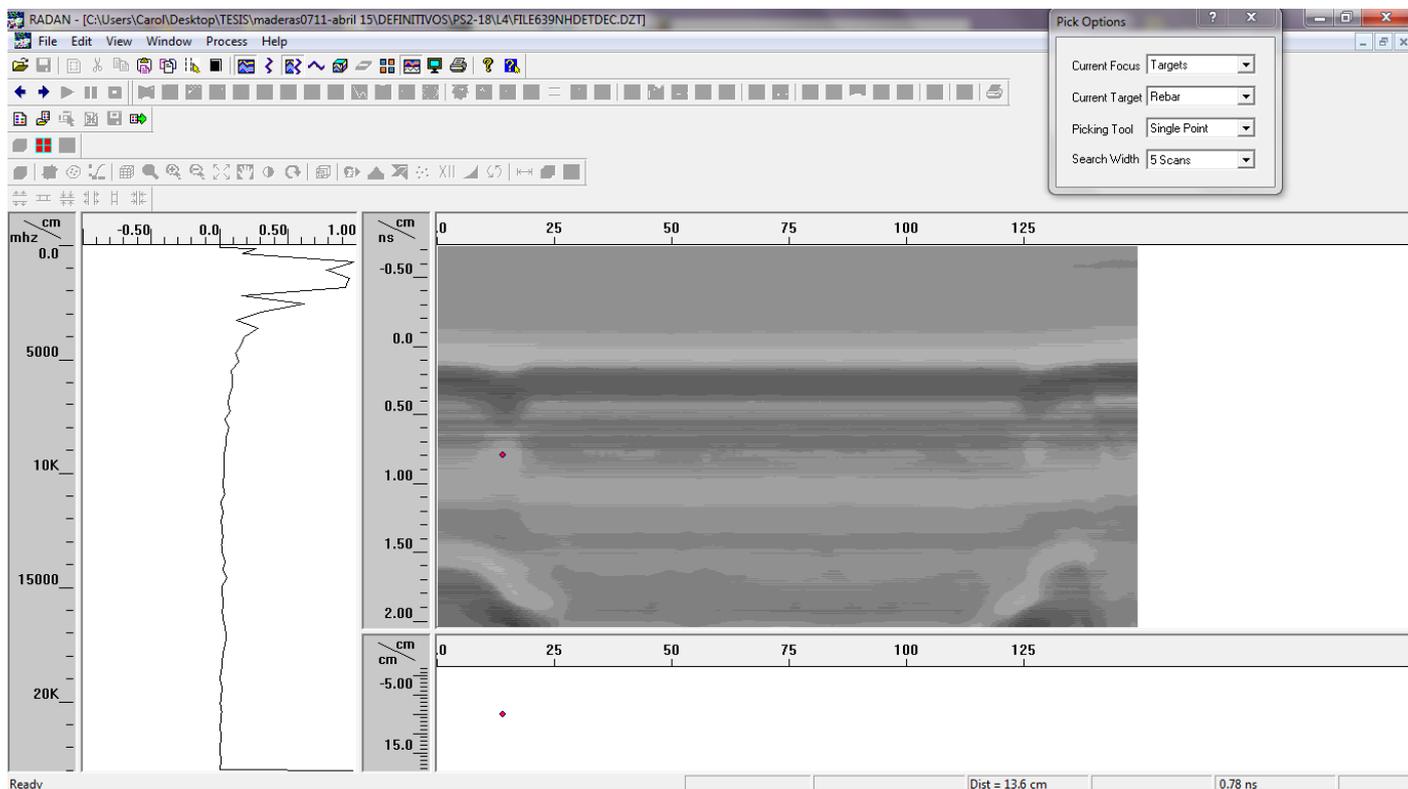


Cara compresión

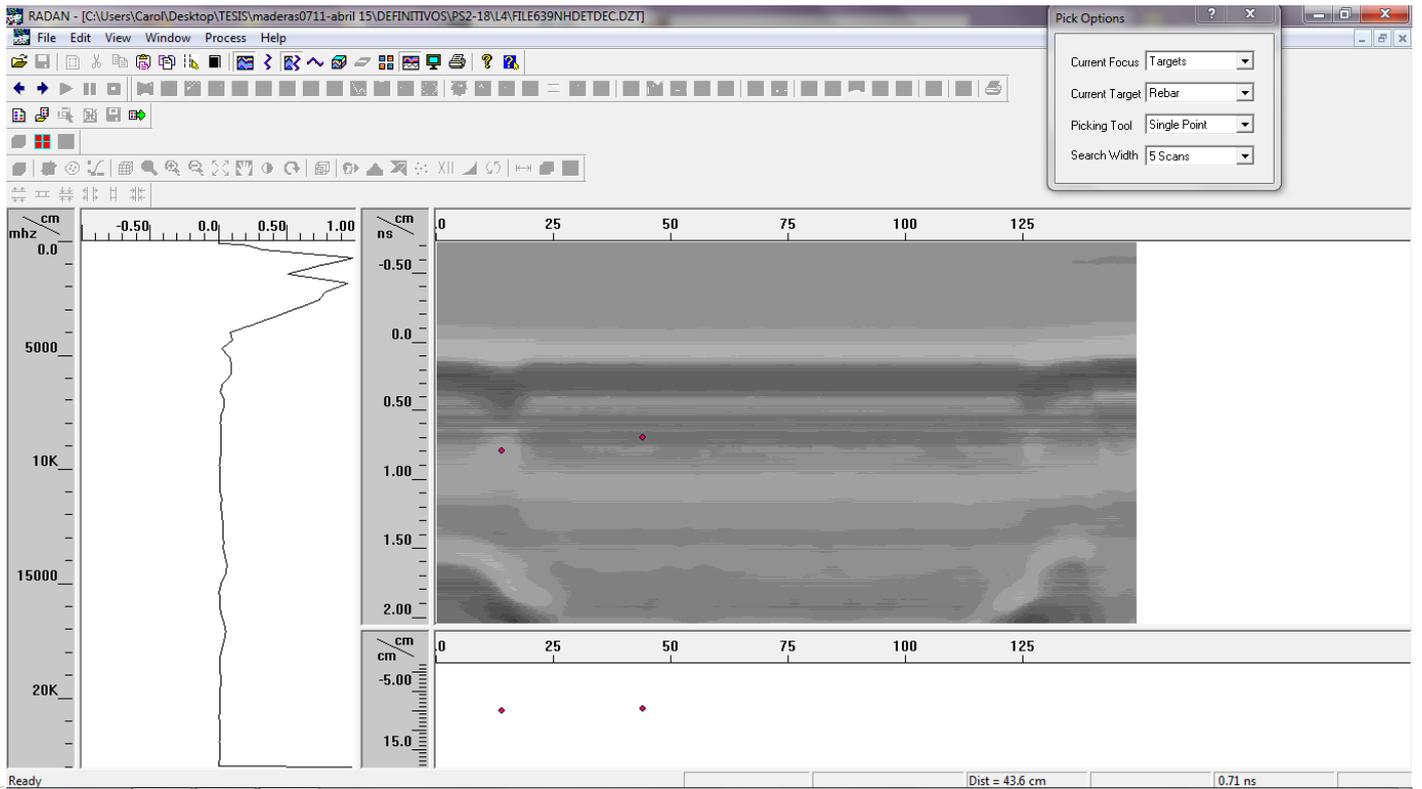


Canto 2

En $x=13$ cm detecta el nudo 1 de tracción y el 1 y 2 de compresión:

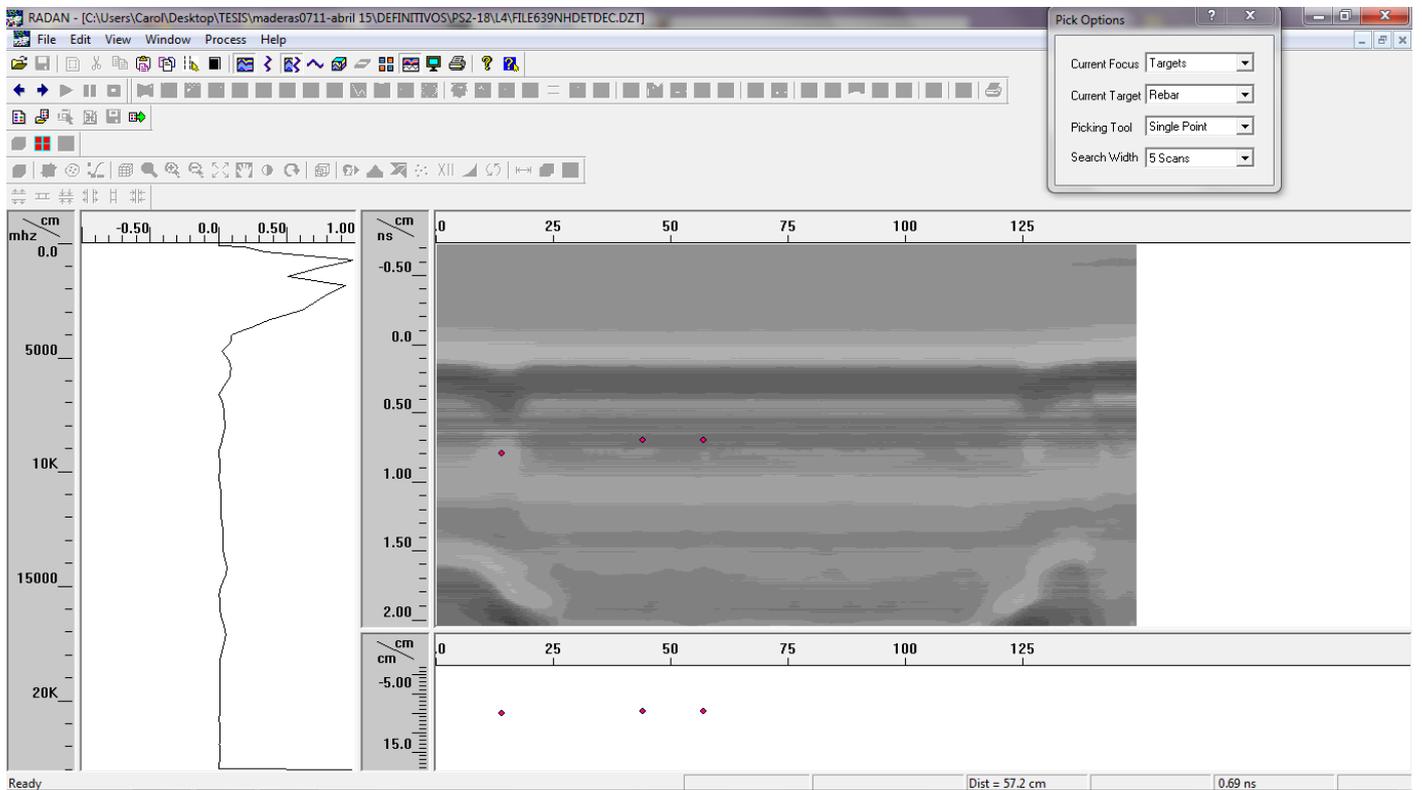


En $x = 43\text{cm}$ detecta el nudo 2 de tracción y el 2 del canto 2:

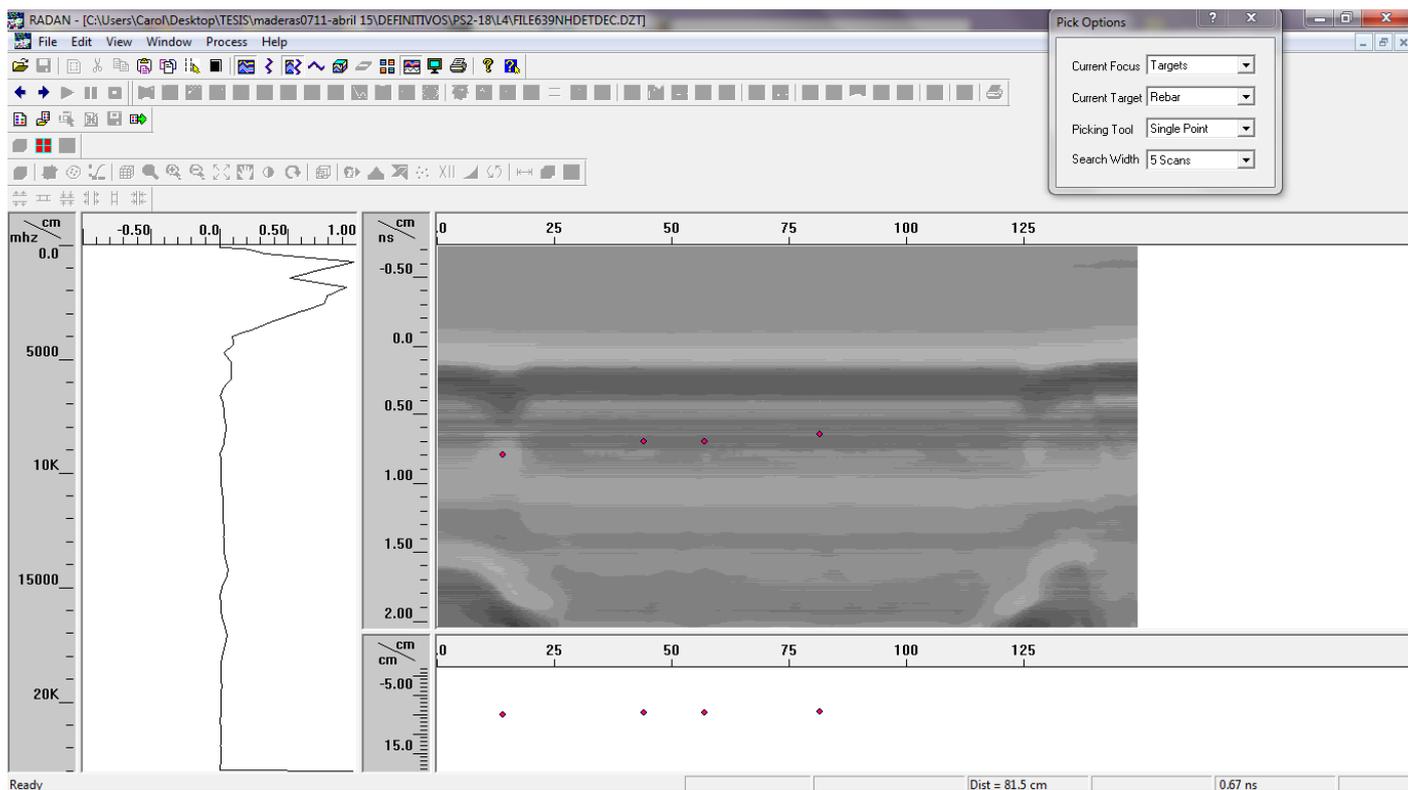


262

En $x = 57\text{cm}$ detecta el nudo 3 de tracción:

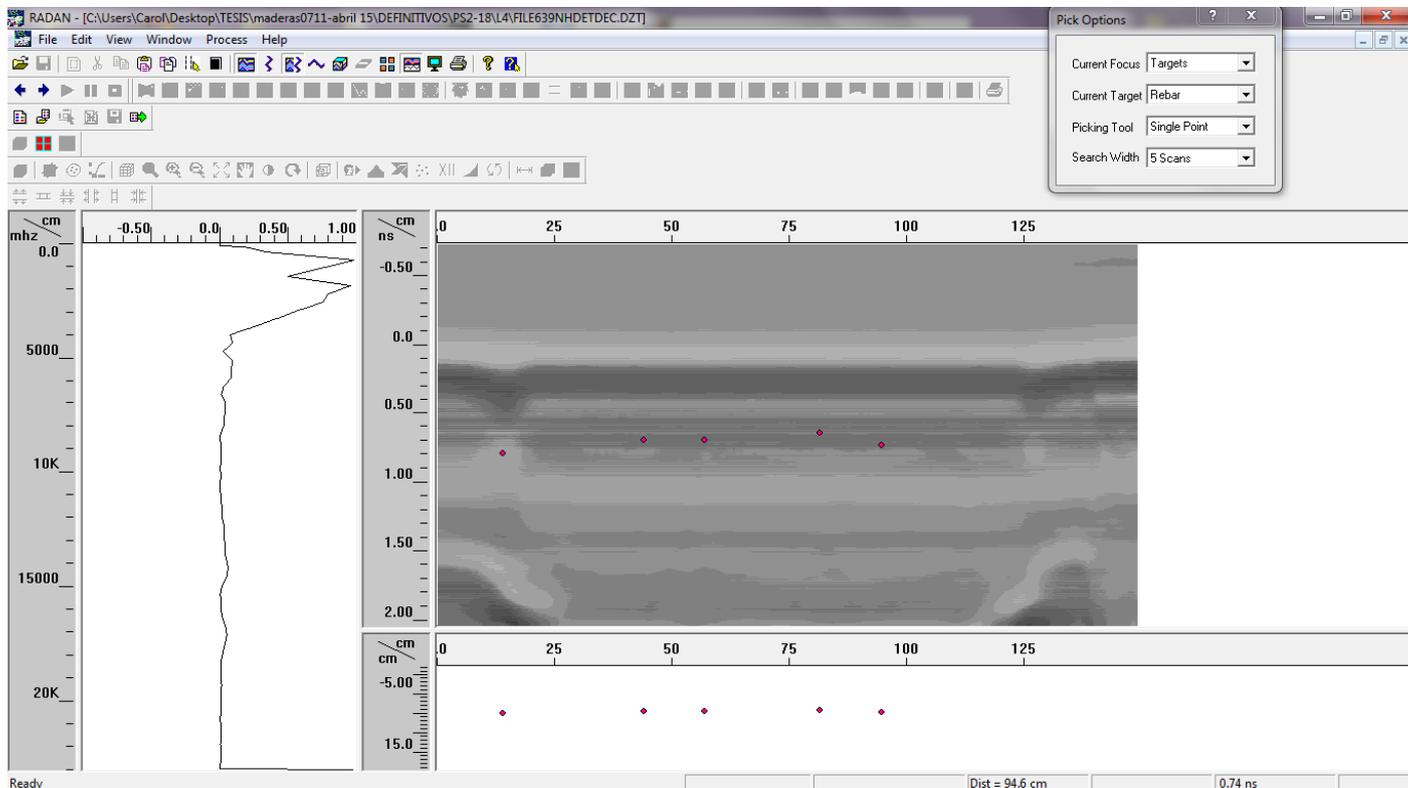


En $x=81,9$ cm detecta irregularidades ocultas:

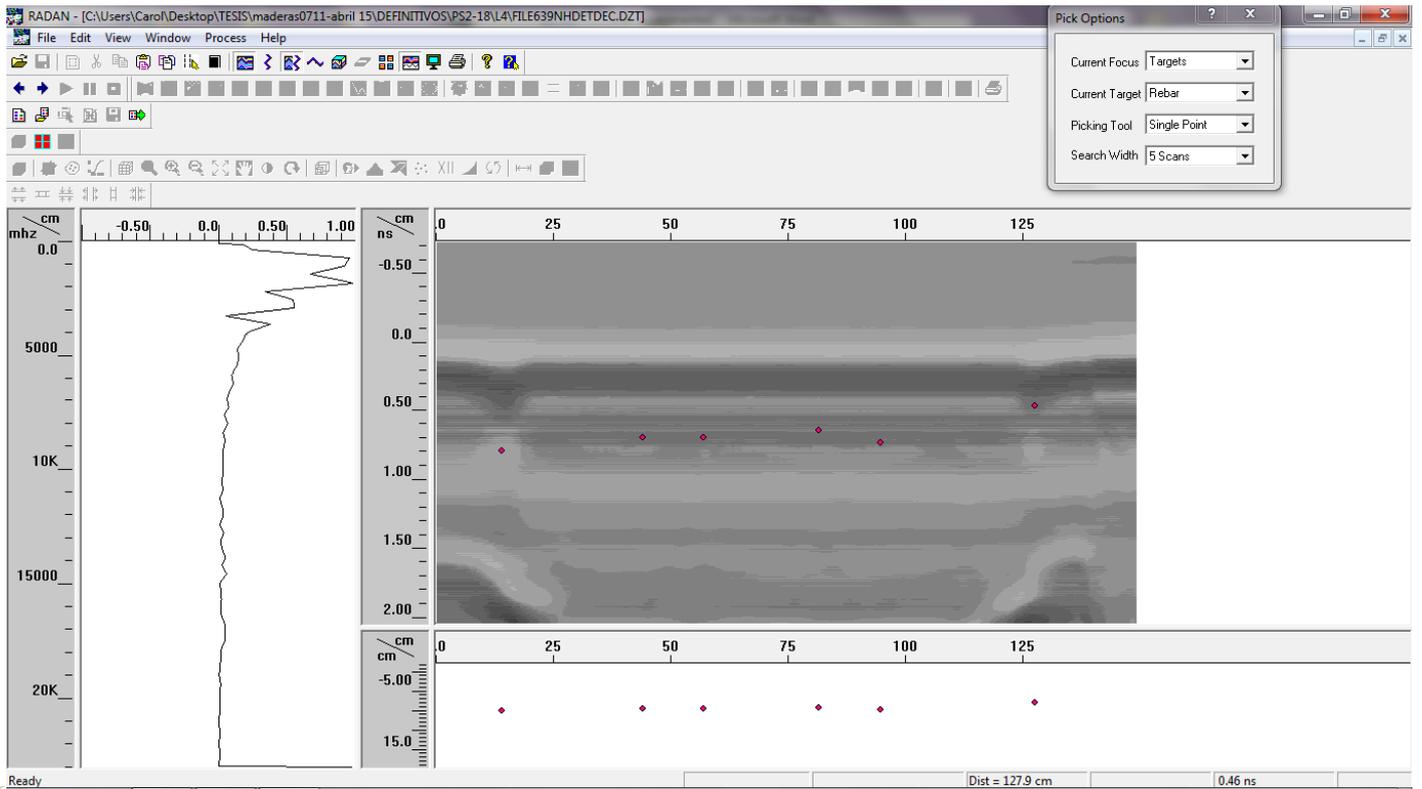


263 †

En $x=100$ cm detecta el nudo 4 de tracción, el 3 de compresión y el 3 del canto 2:

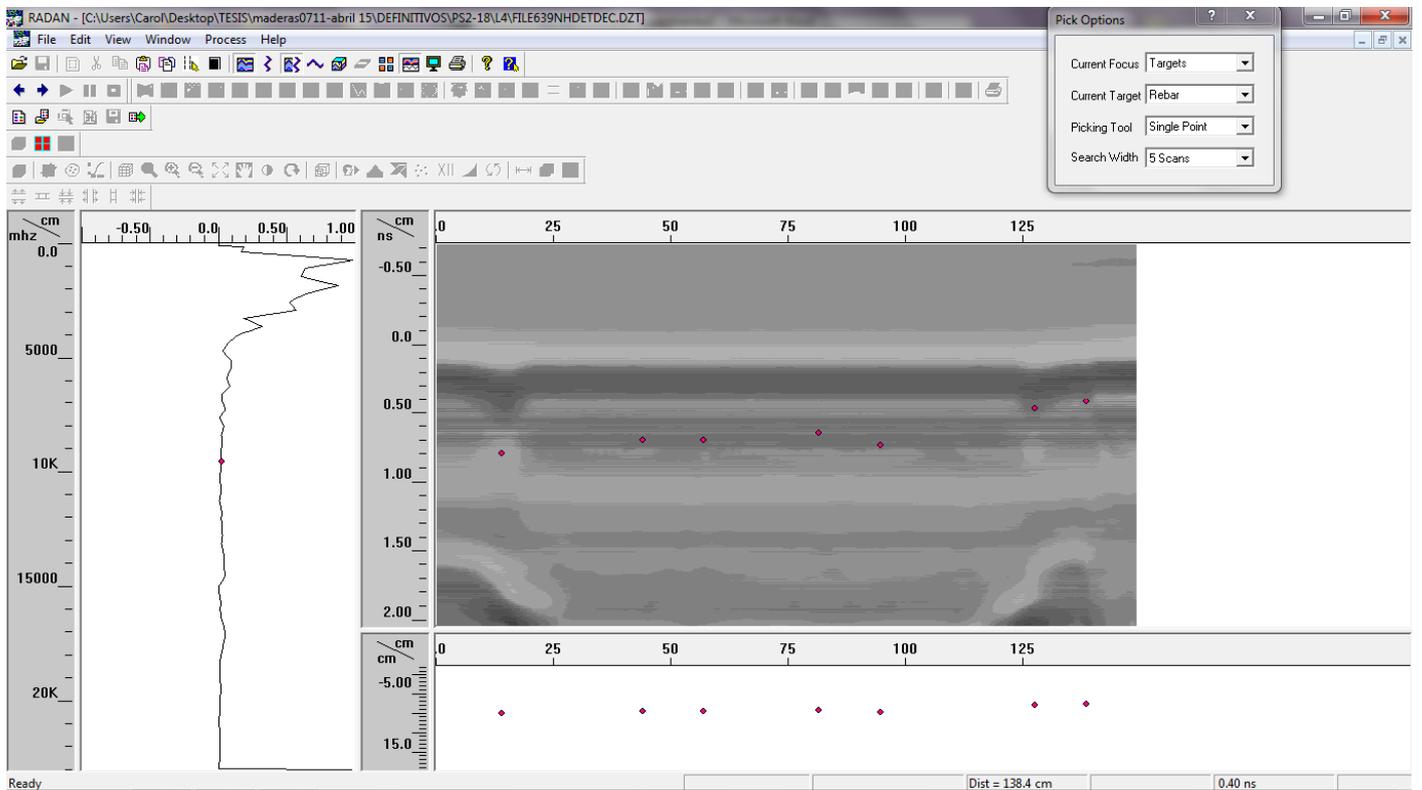


De $x=127$ cm detecta el nudo 5 de tracción y el 4 del canto 2:

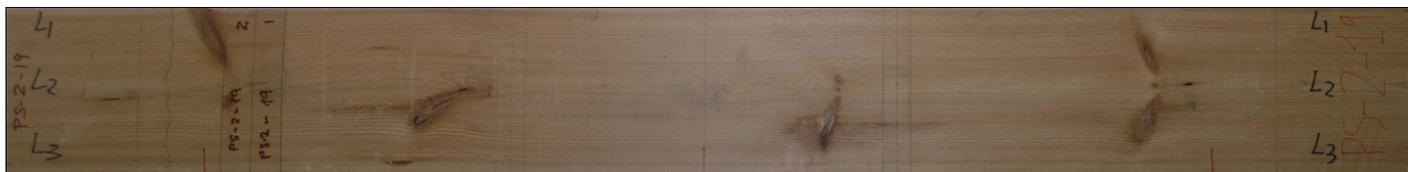


264 TT

En $x=138$ cm detecta el nudo 4 y 5 de compresión:



PS2-19



Cara tracción



Canto 1



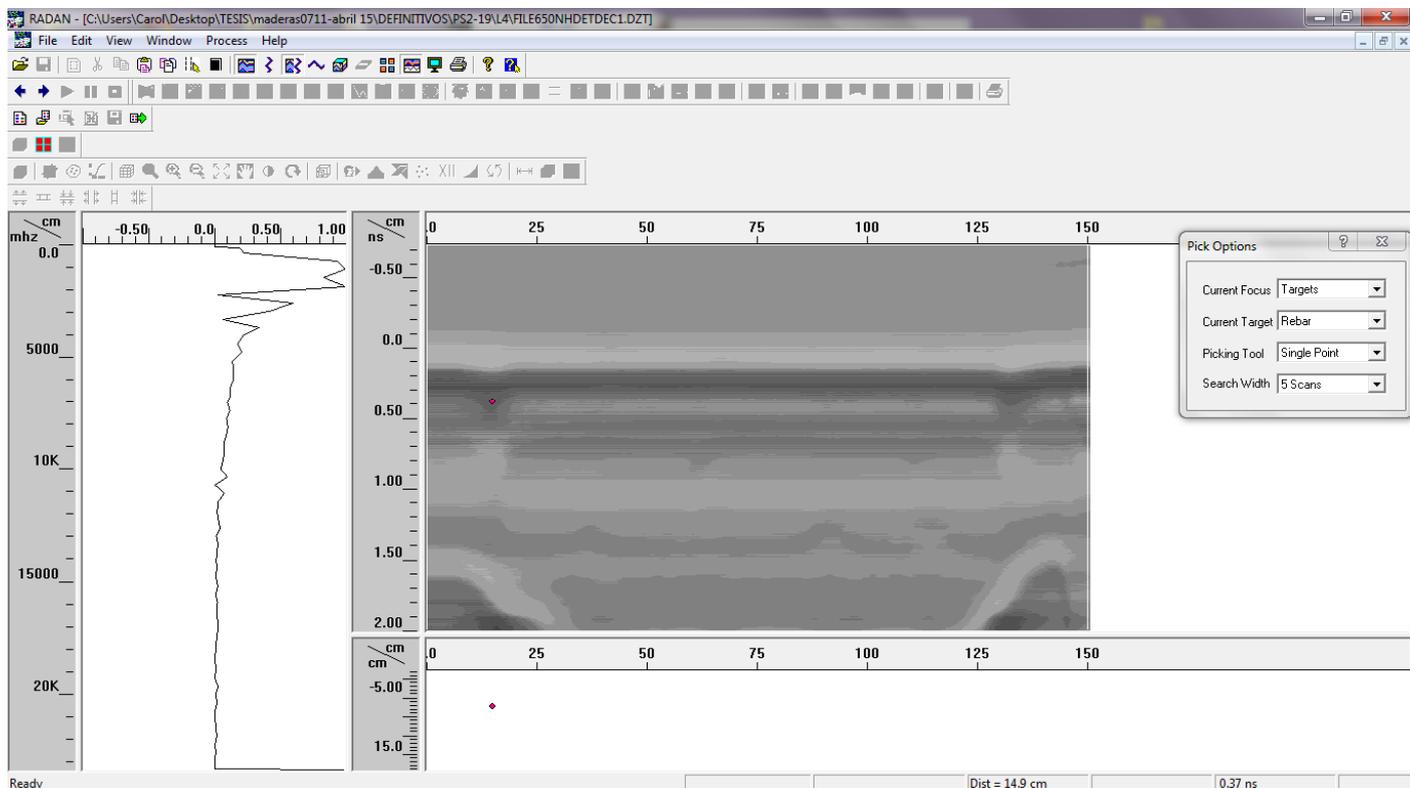
Cara compresión



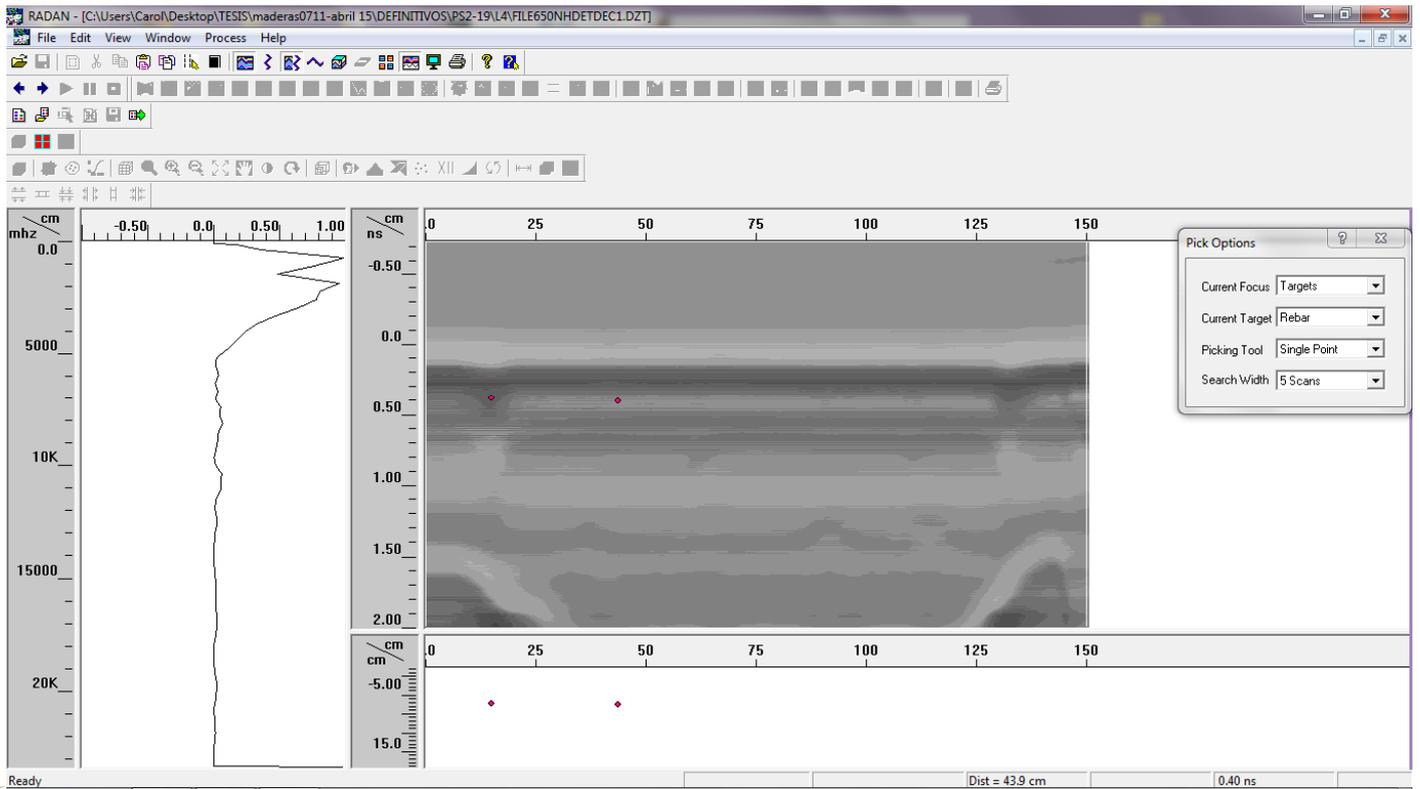
Canto 2

En $x=15$ cm detecta los nudos 1 y 2 de tracción, y el 1 y 2 de compresión:

265+

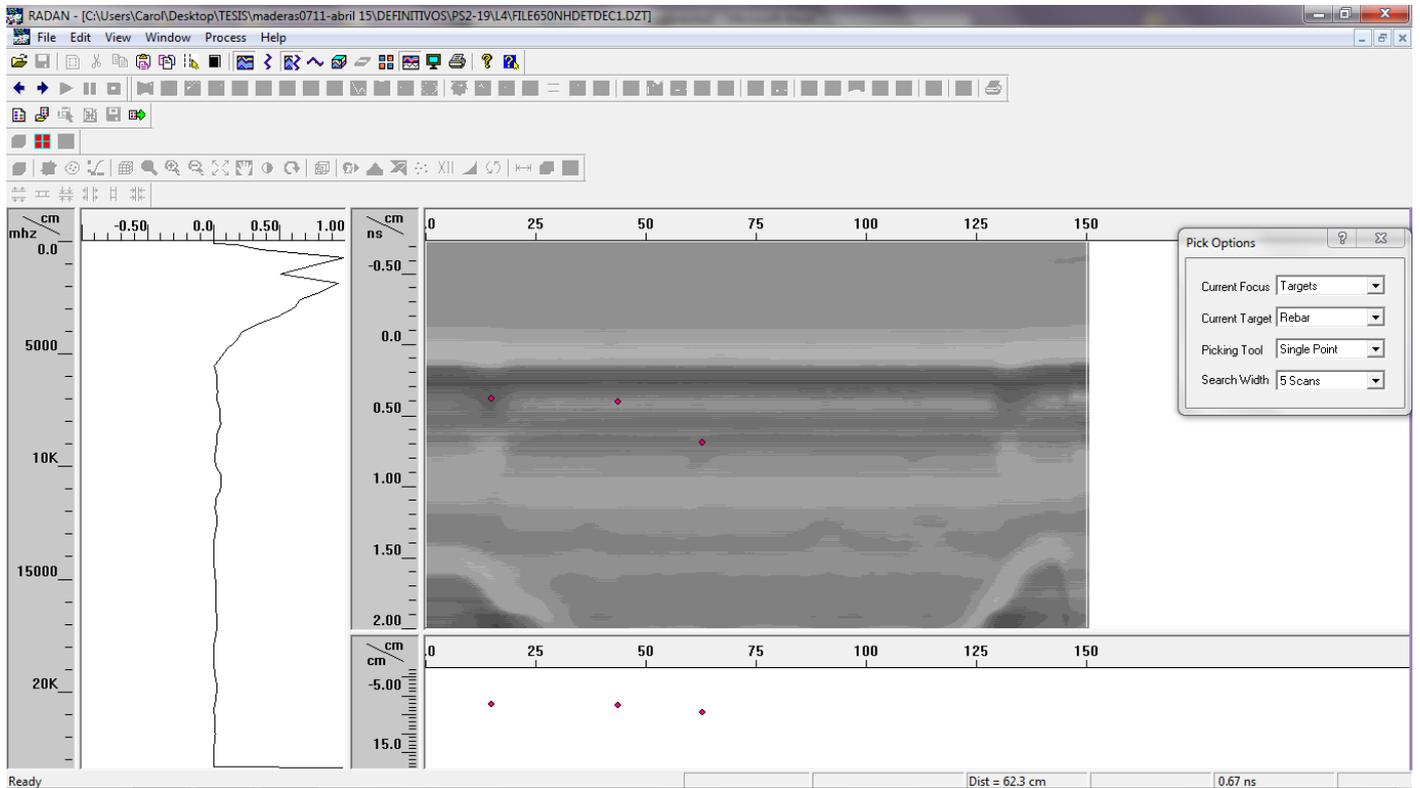


En $x=45$ cm detecta el nudo 3 de tracción y el 3 de compresión:

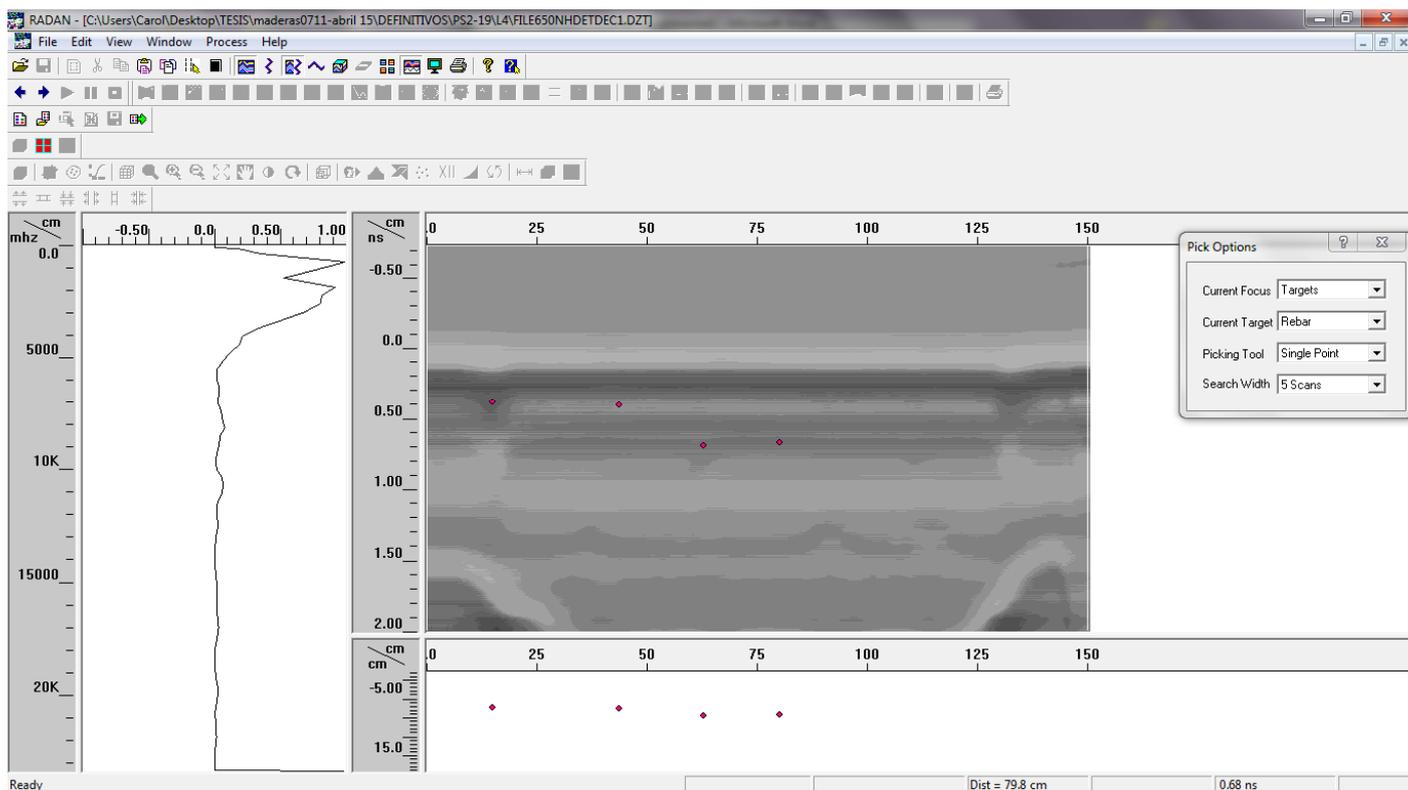


266 TT

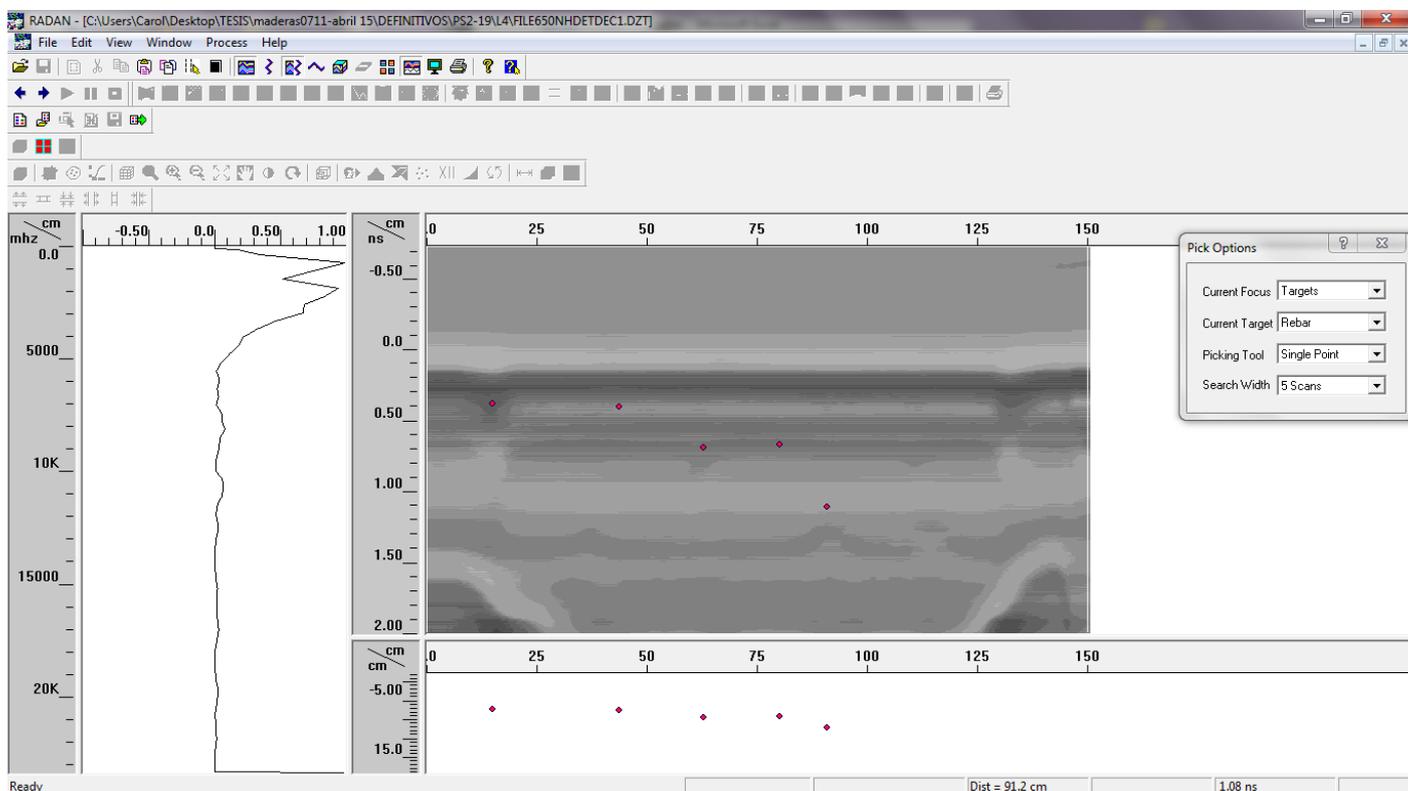
Detecta nudos ocultos en zona central de la pieza:



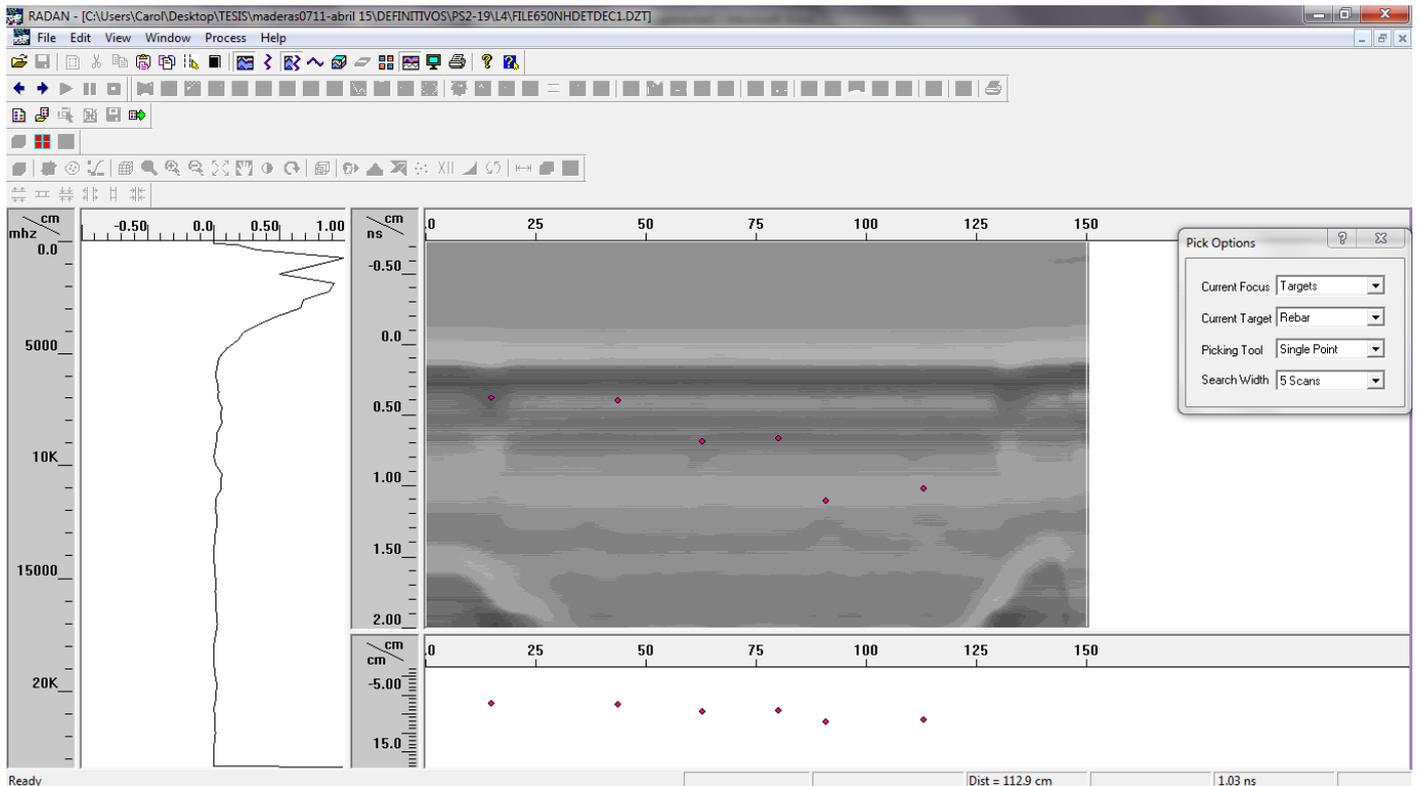
En x=80 cm detecta irregularidades ocultas:



Y en x=90 cm detecta el nudo 4 de tracción y 4 de compresión:

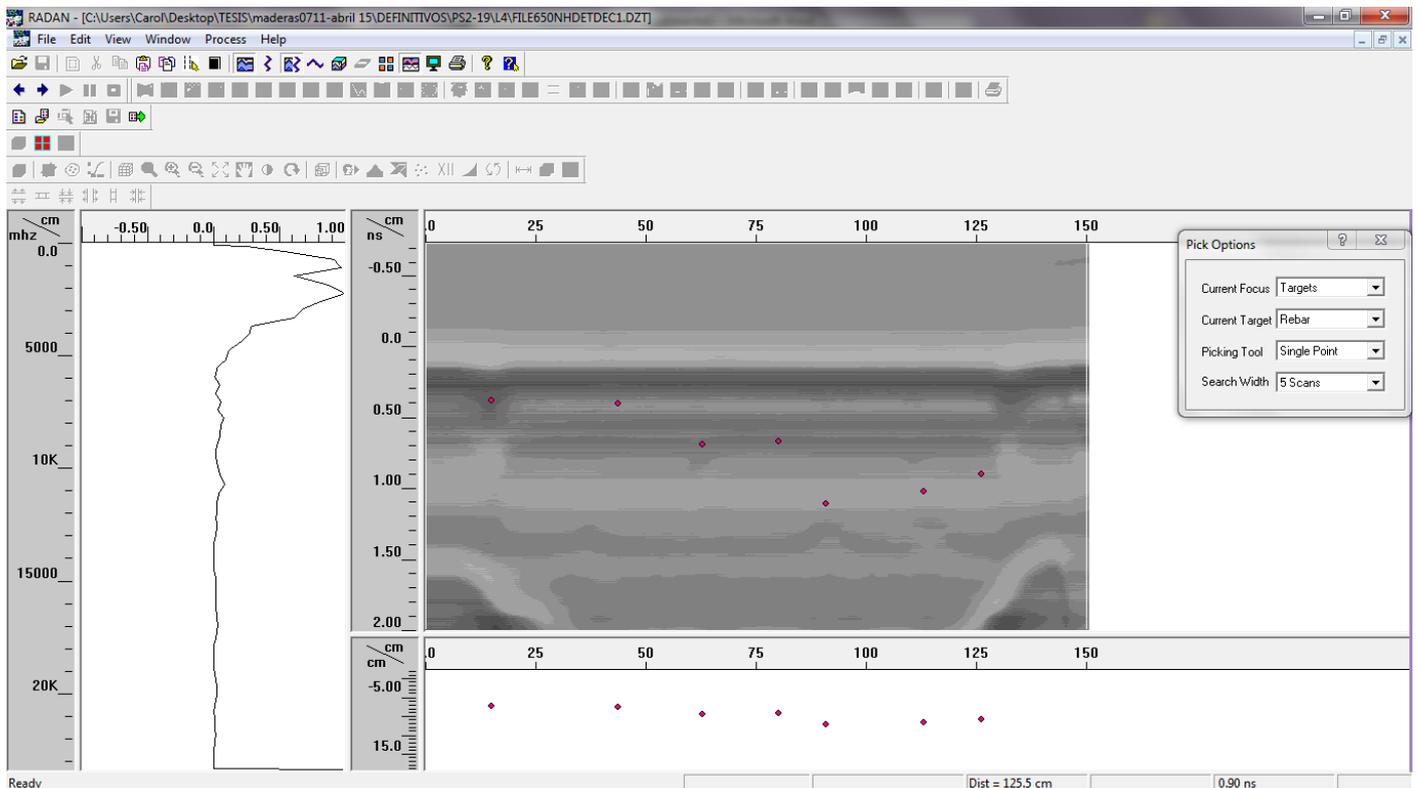


En $x=112$ cm detecta una irregularidad oculta:



268 TT

En $x=123$ cm detecta los nudos 5,6 y 7 de tracción:



PS2-21



Cara tracción



Canto 1

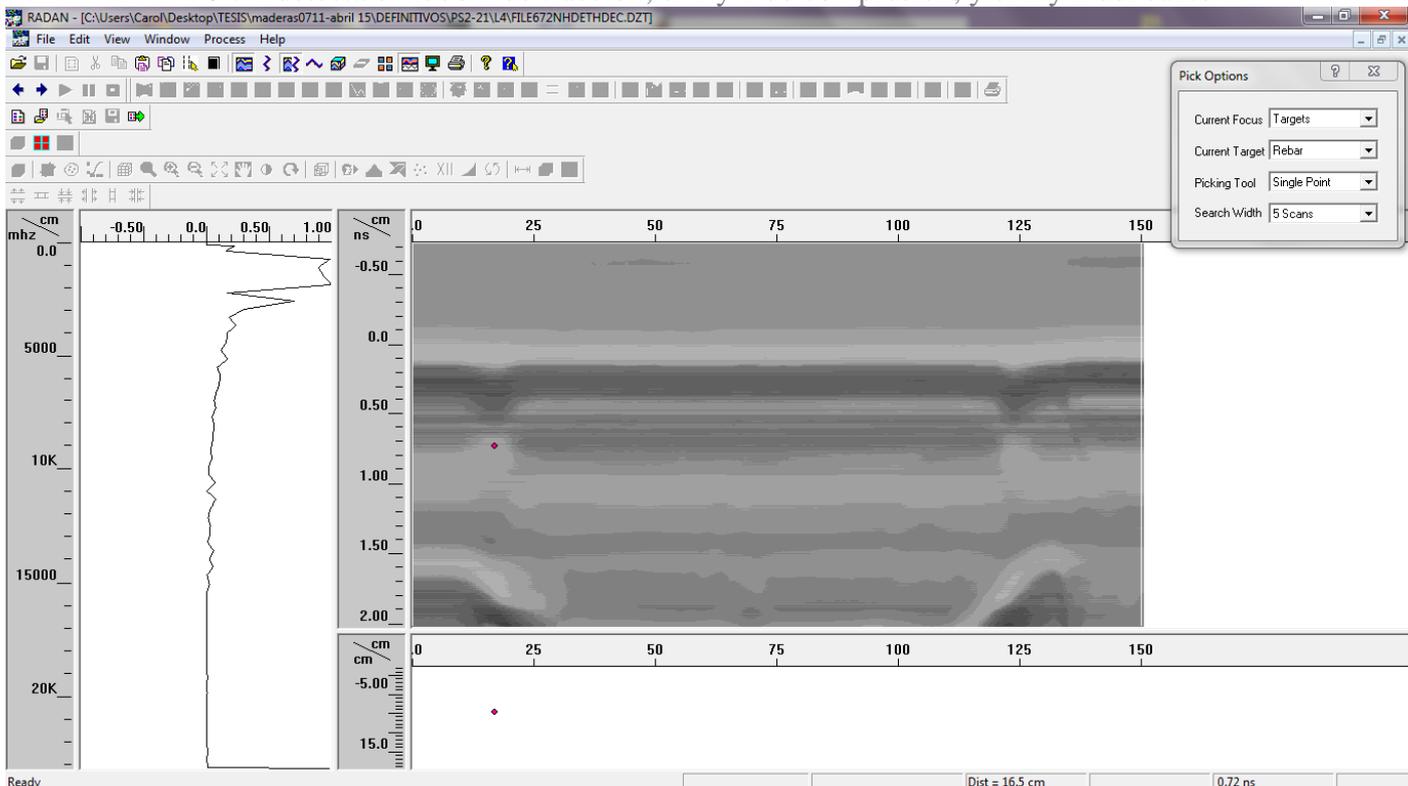


Cara compresión

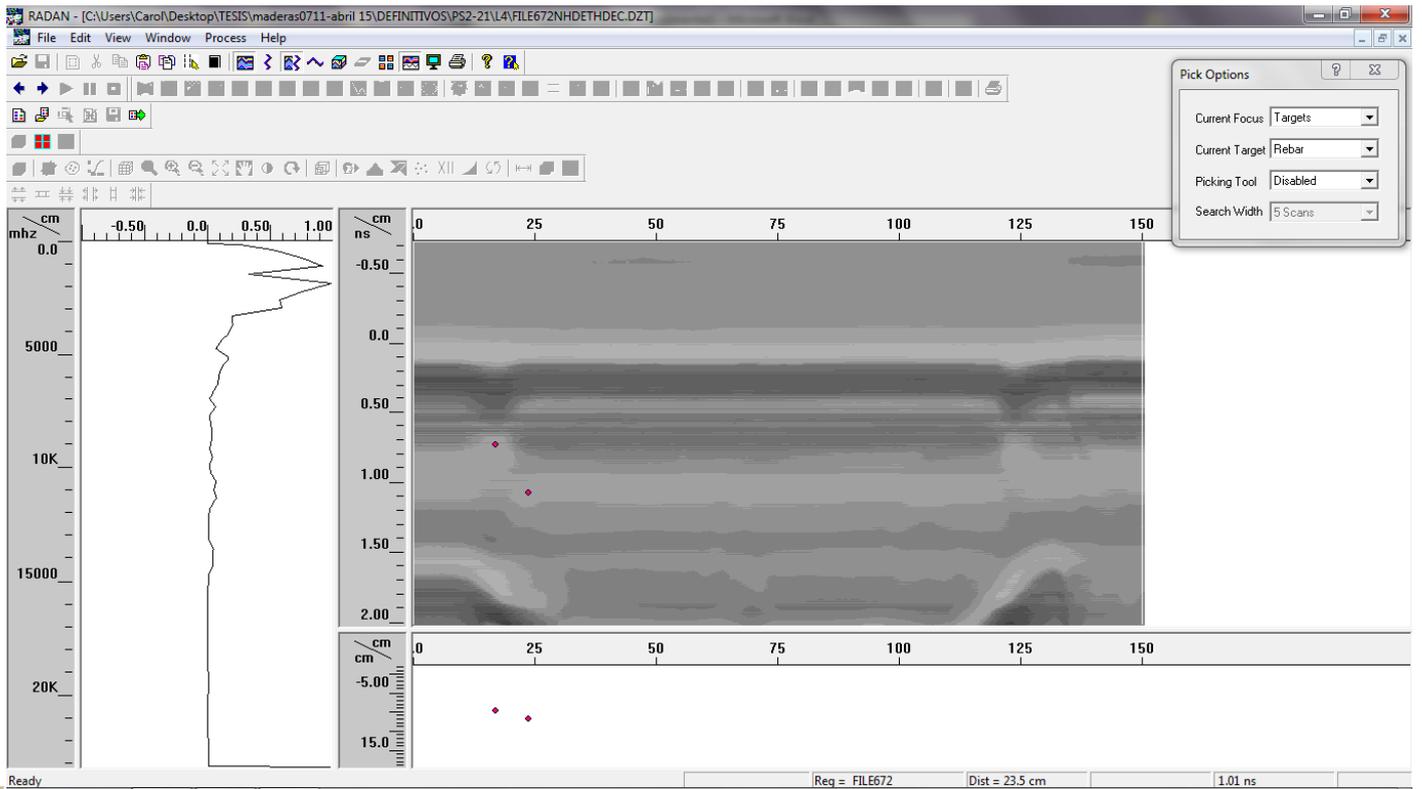


Canto 2

En $x=16$ cm detecta el nudo 2 de tracción, el 1 y 2 de compresión, y el 1 y 2 del canto 2:

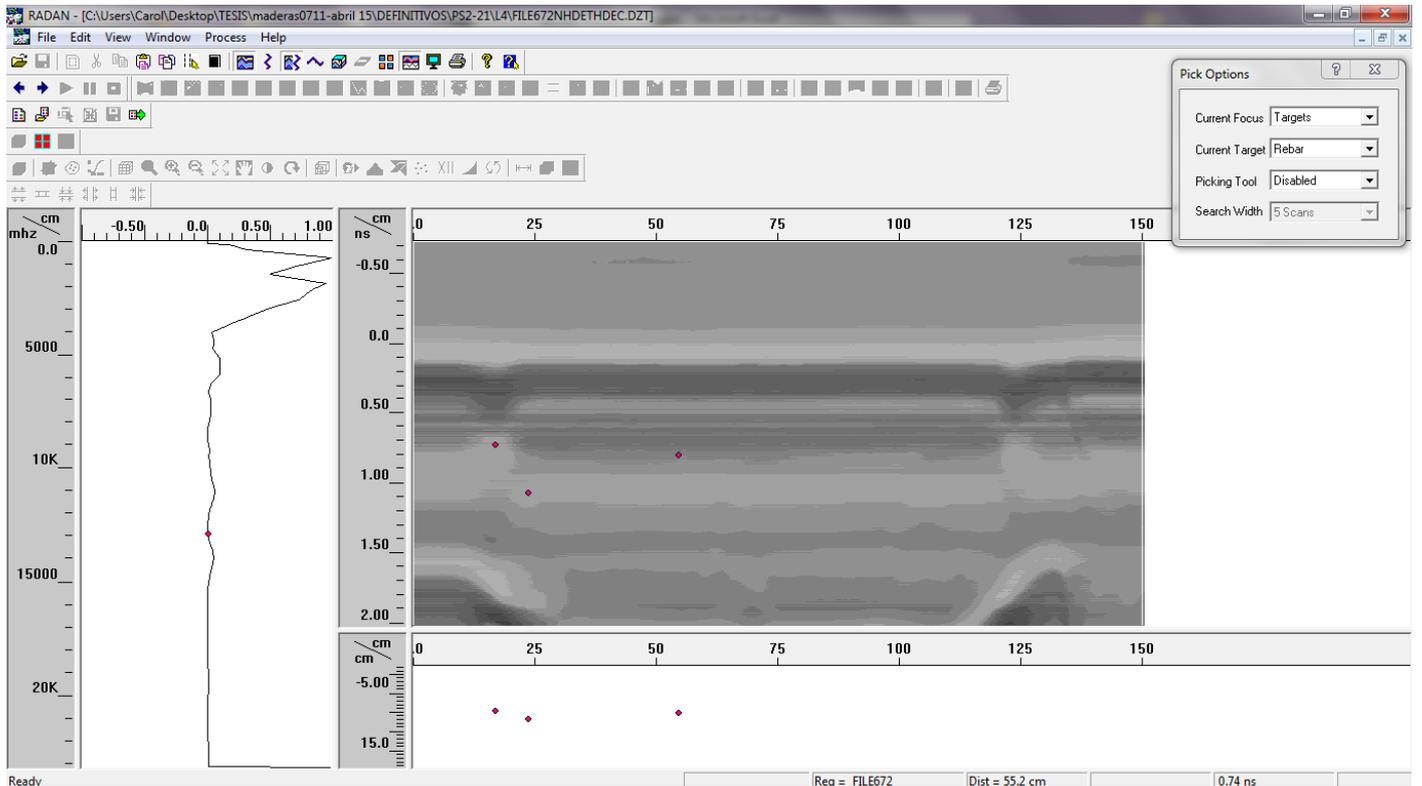


En $x = 23,5$ cm detecta el nudo 3 de tracción:

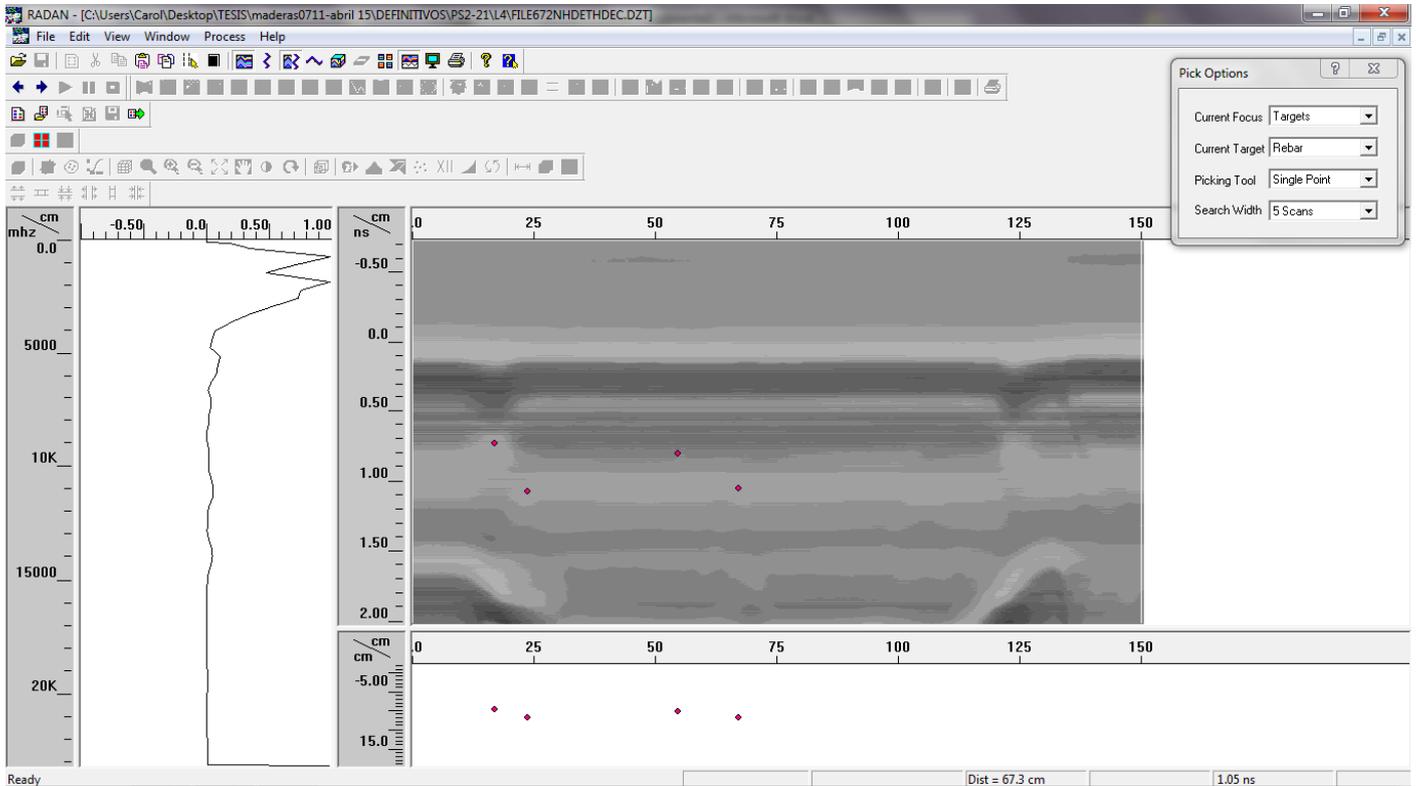


270 TT

En $x = 55$ cm detecta defectos ocultos:

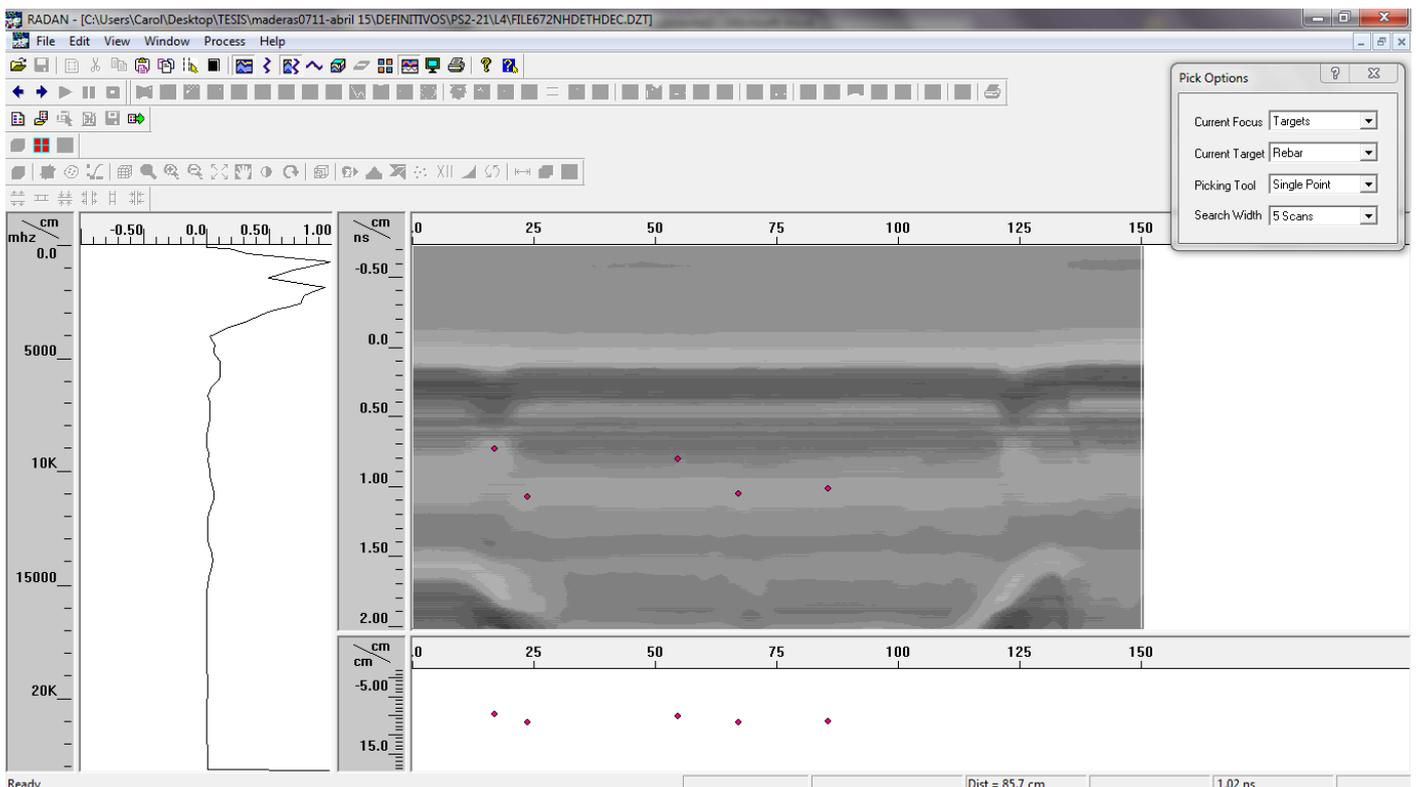


En la zona central de la pieza detecta los nudos 4, 5 y 6 de tracción, el 2 del canto 1, y el 3 y 4 de compresión:



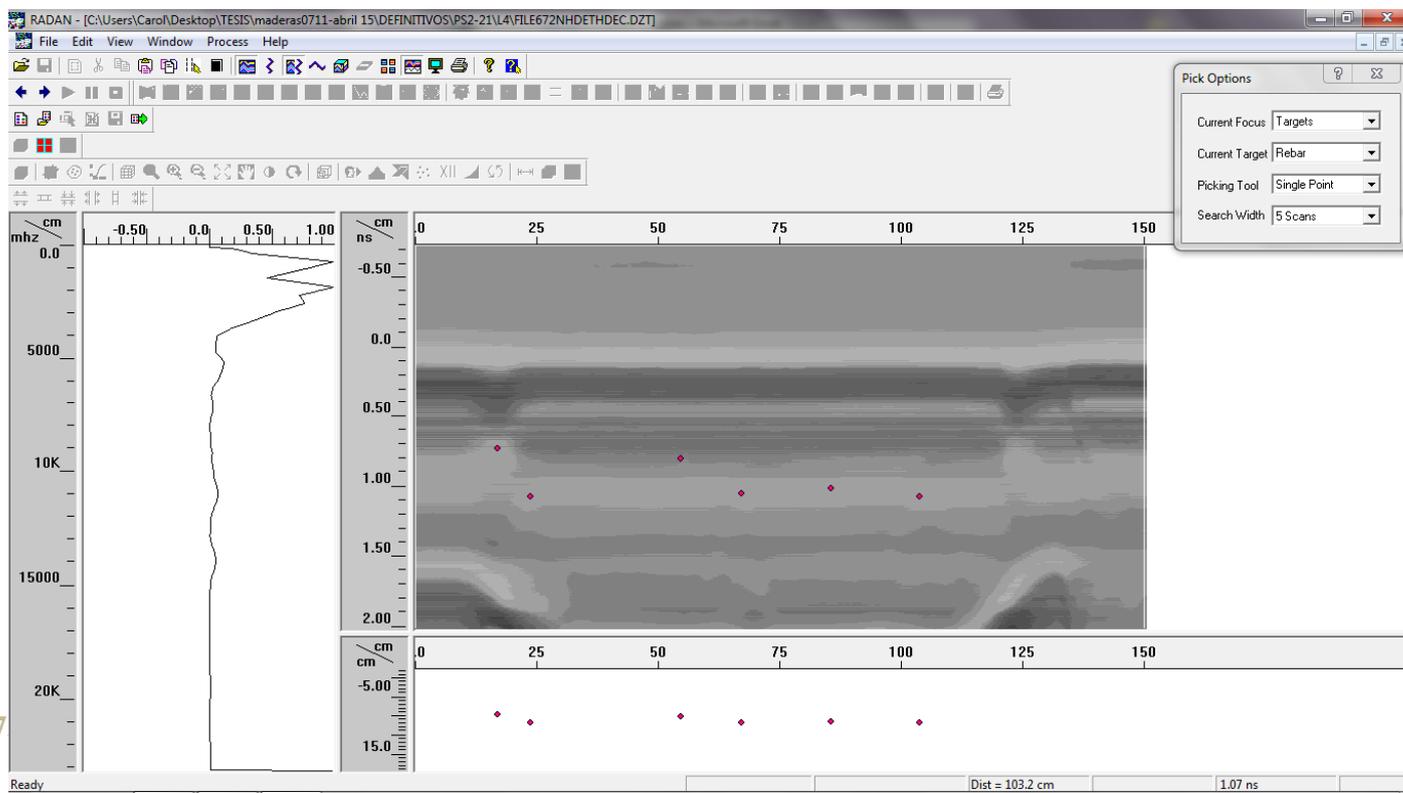
271+

De $x=65$ cm hasta $x=87$ cm hay una zona de defectos ocultos:

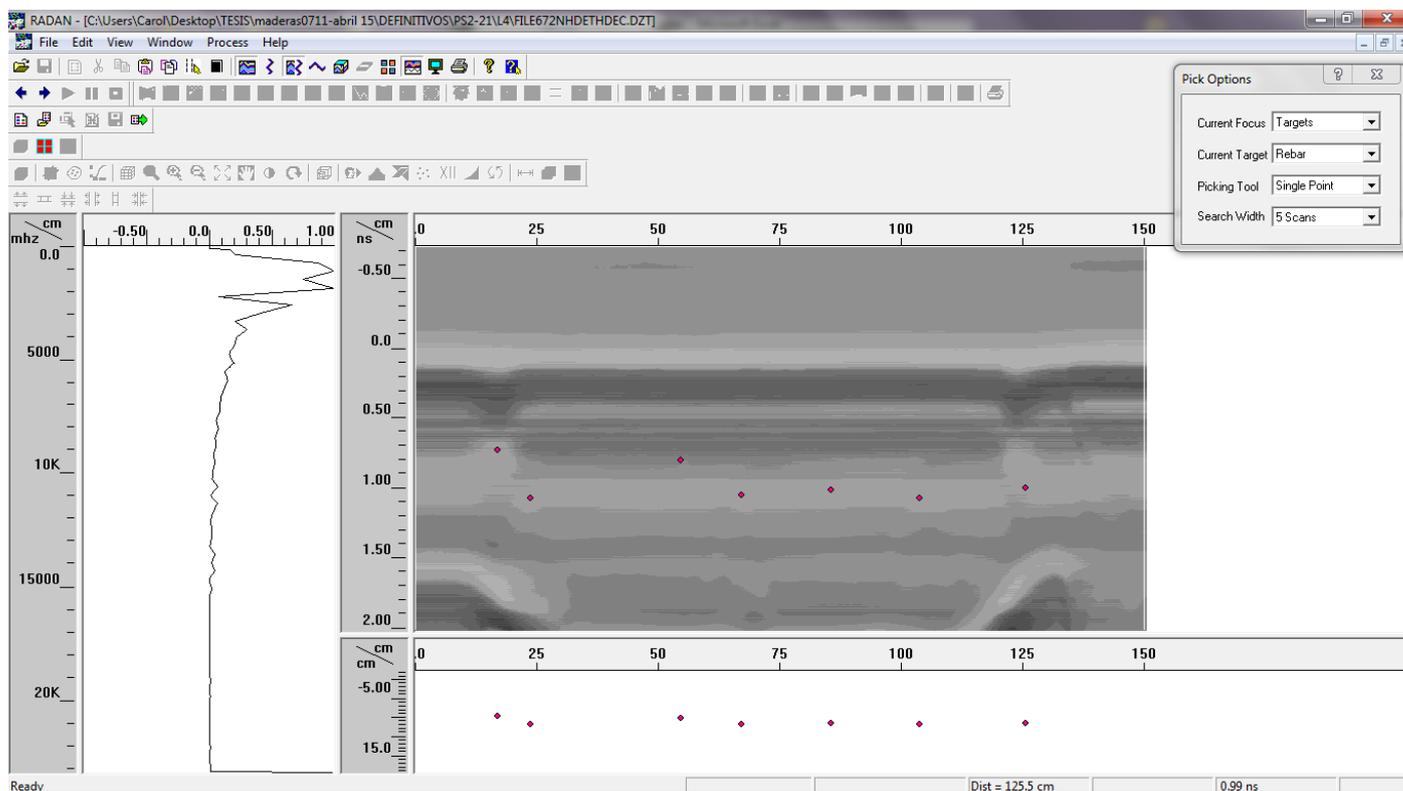


En $x=103$ cm detecta una singularidad importante oculta:

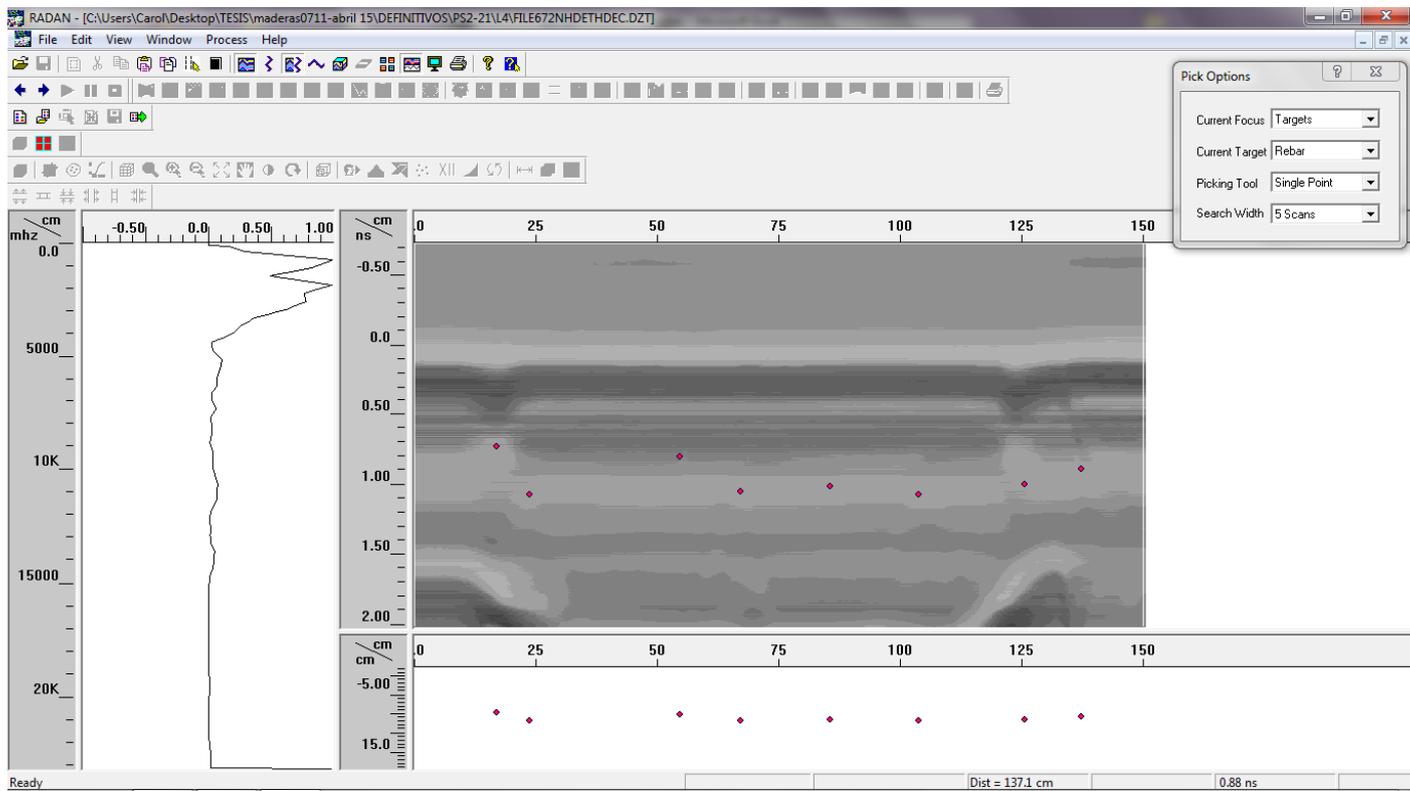
27



En $x=125$ cm detecta irregularidades ocultas:



En x=135 cm detecta el nudo 7 y el 8 de tracción, el 5, 6 y 7 de compresión y el 3 del canto 2:



PS2-22



Cara tracción



Canto 1



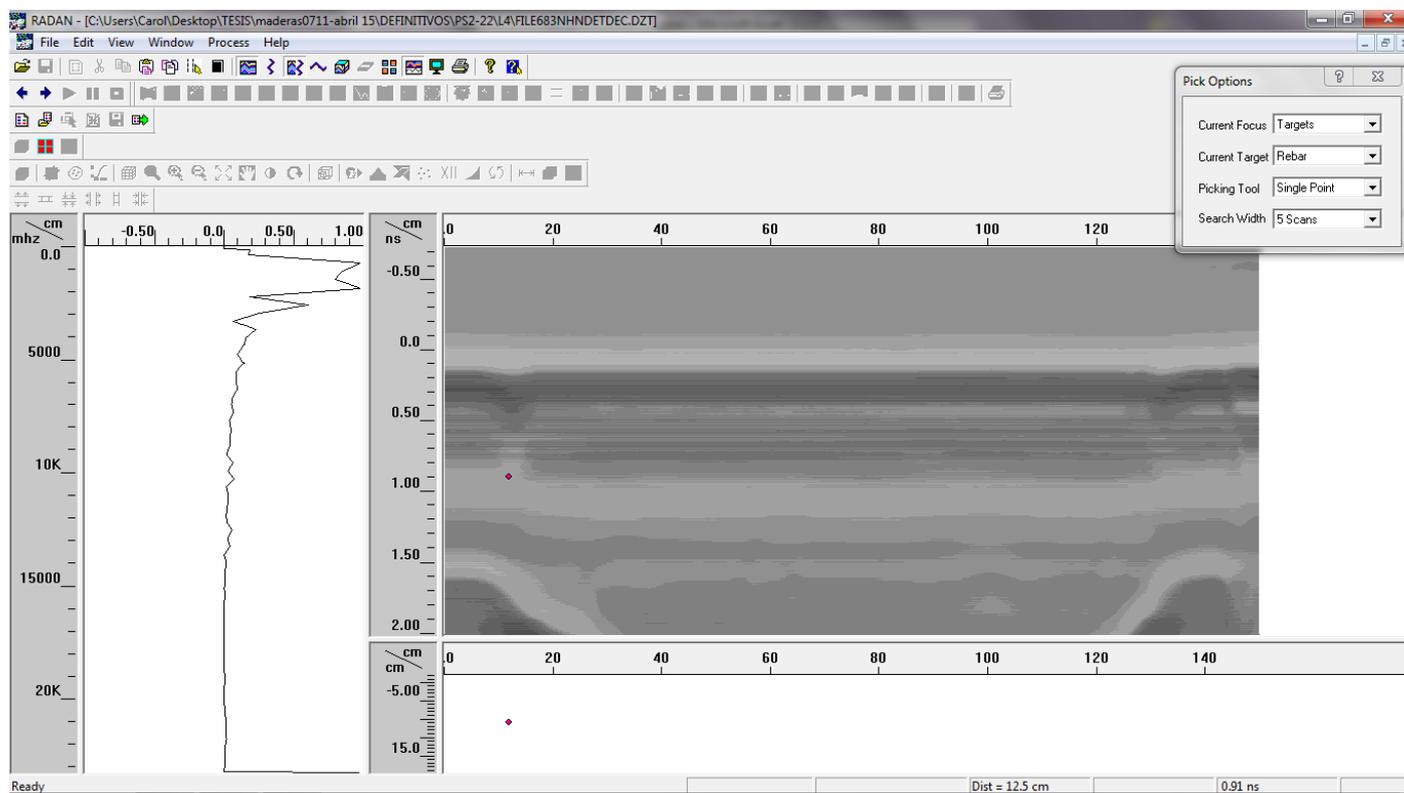
Cara compresión



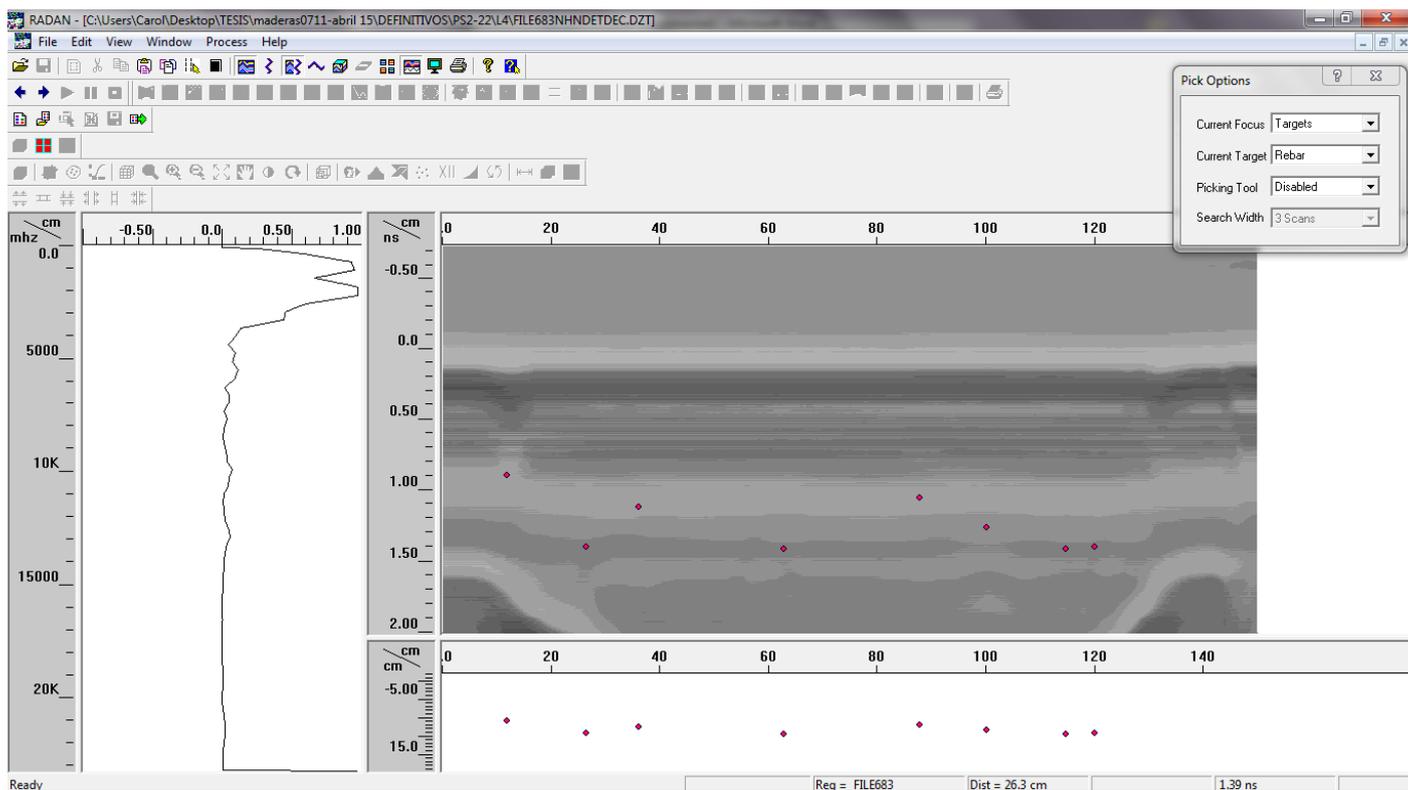
Canto 2

274 ||

En $x=12,5$ cm detecta el nudo 1 de tracción, el 1 de compresión , el 1 del canto 1 y el 1 del canto 2:

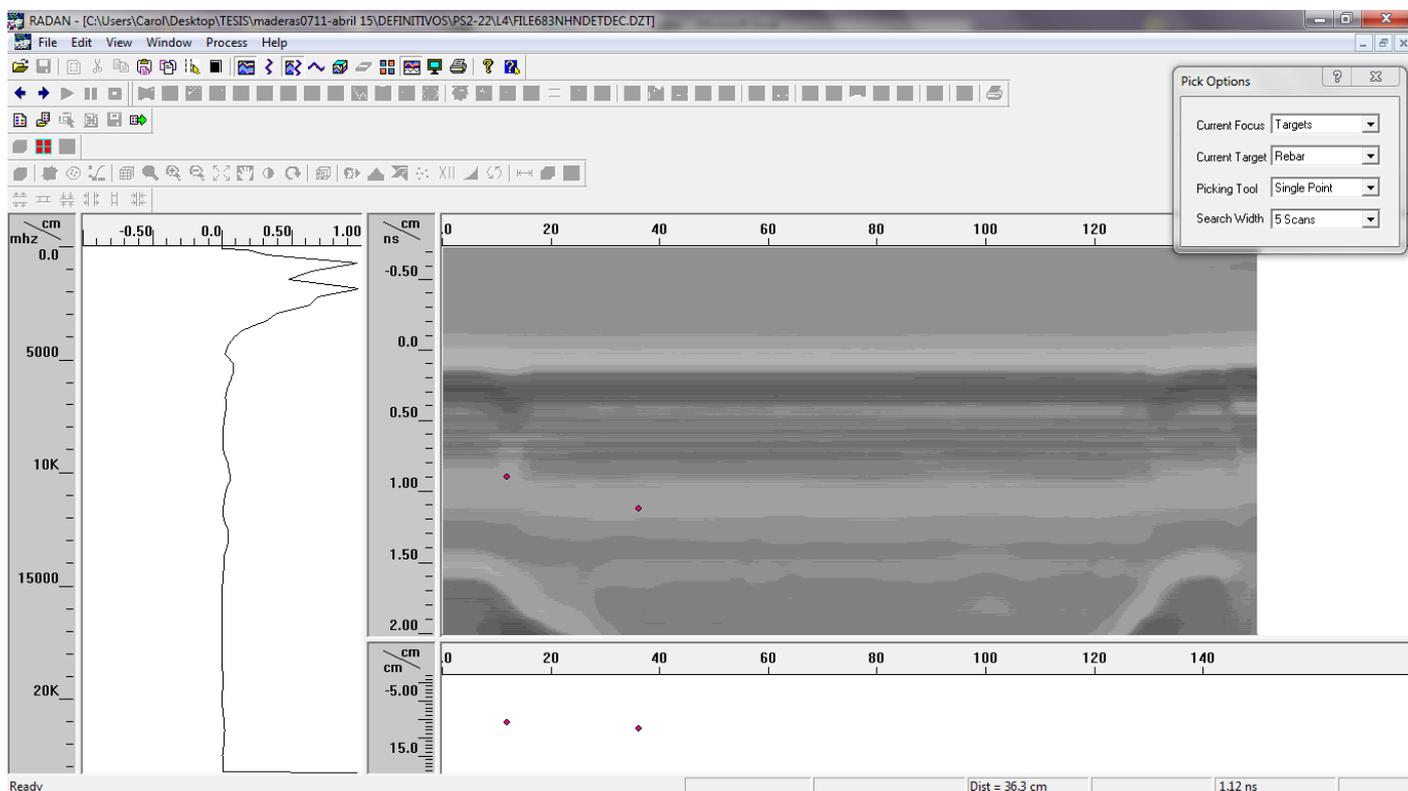


En $x=26$ cm detecta una irregularidad oculta:

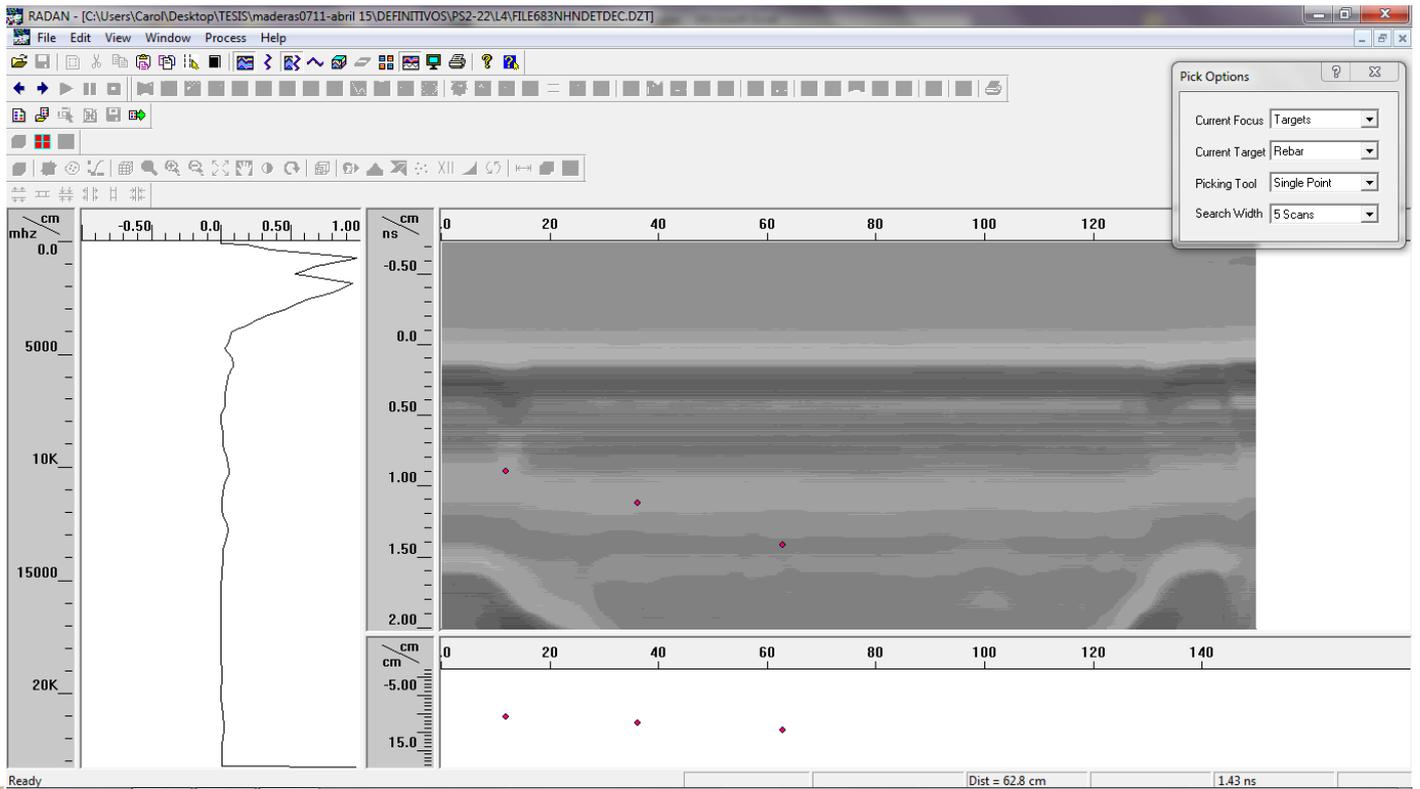


275 †

En $x=36$ cm detecta algún defecto oculto:

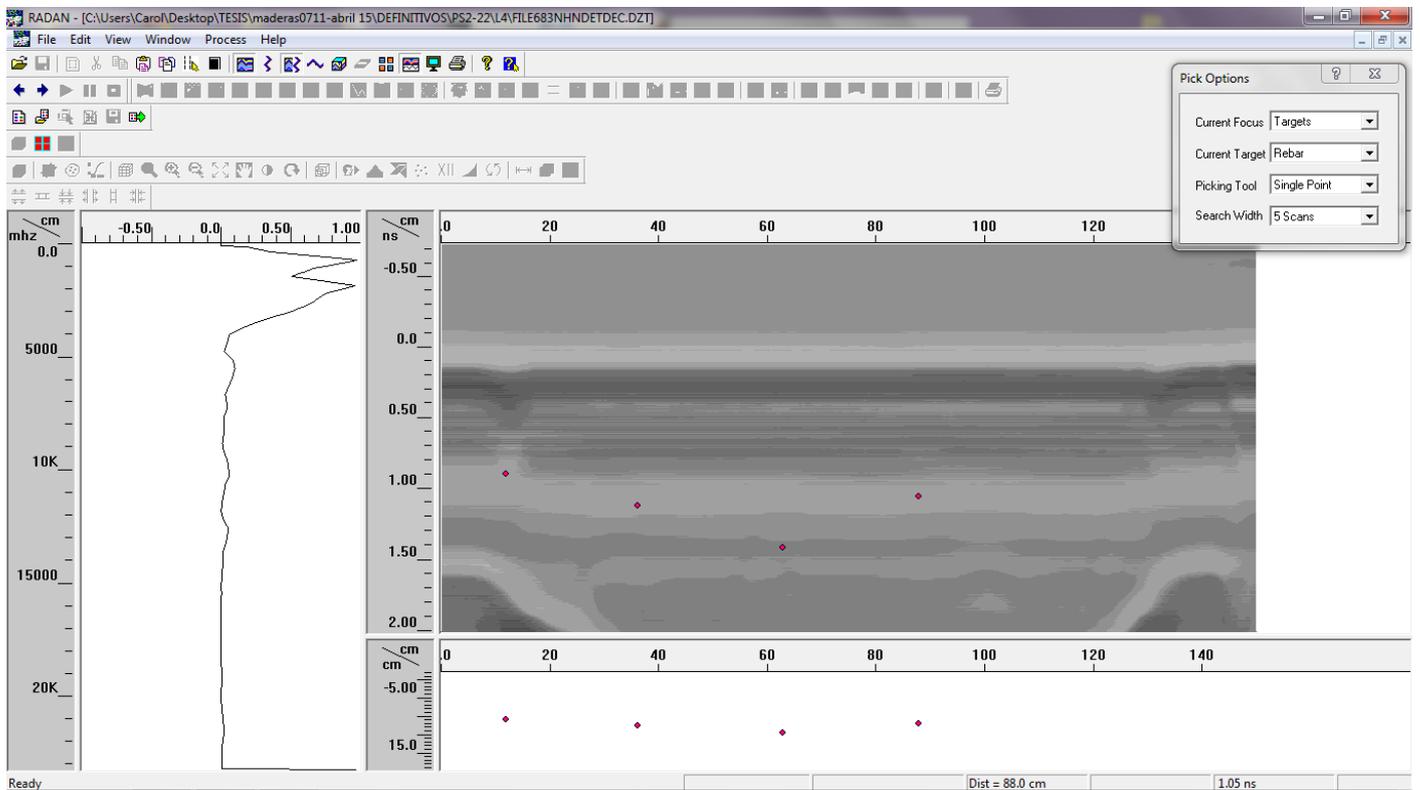


En $x=62$ cm detecta el nudo 3 de tracción, y el 2 y 3 de compresión:

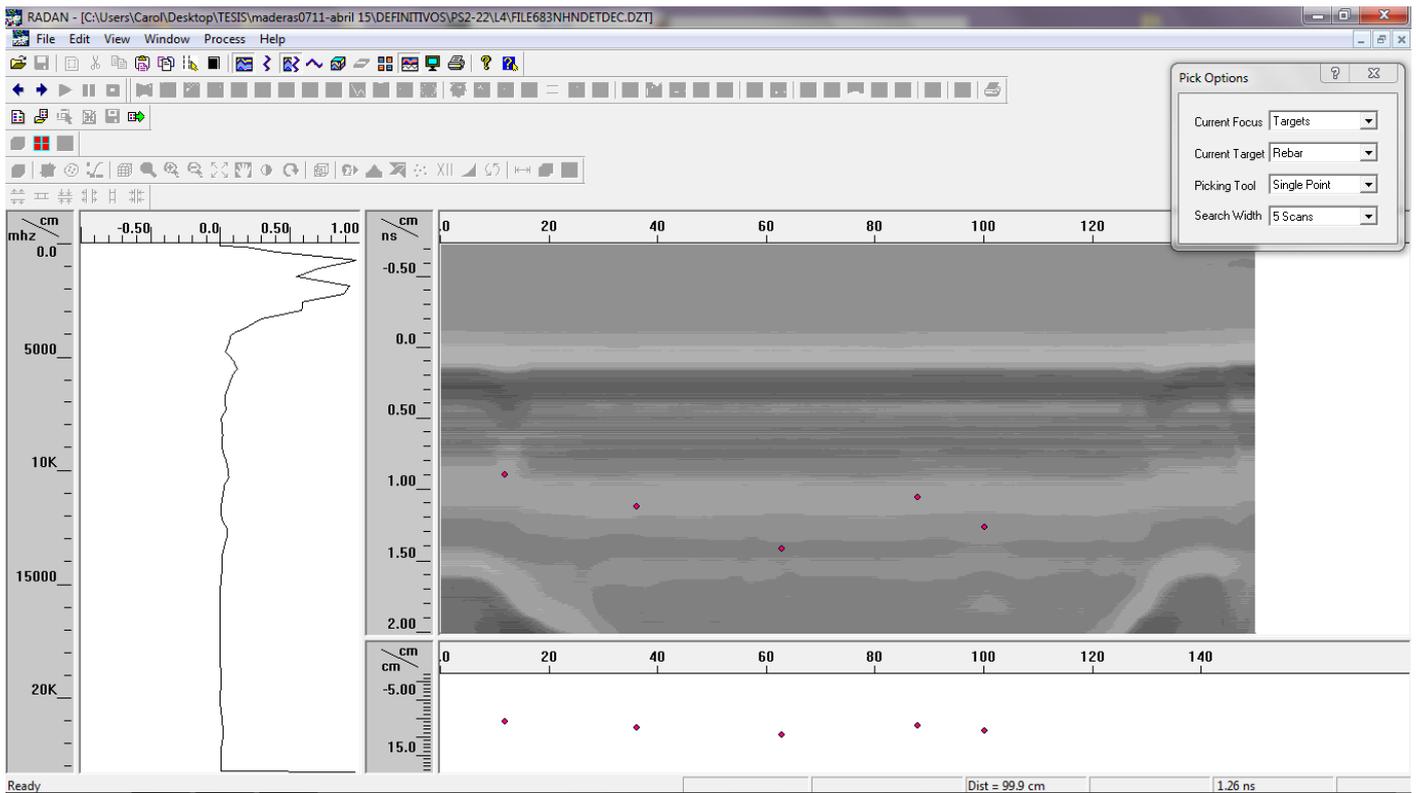


276 TT

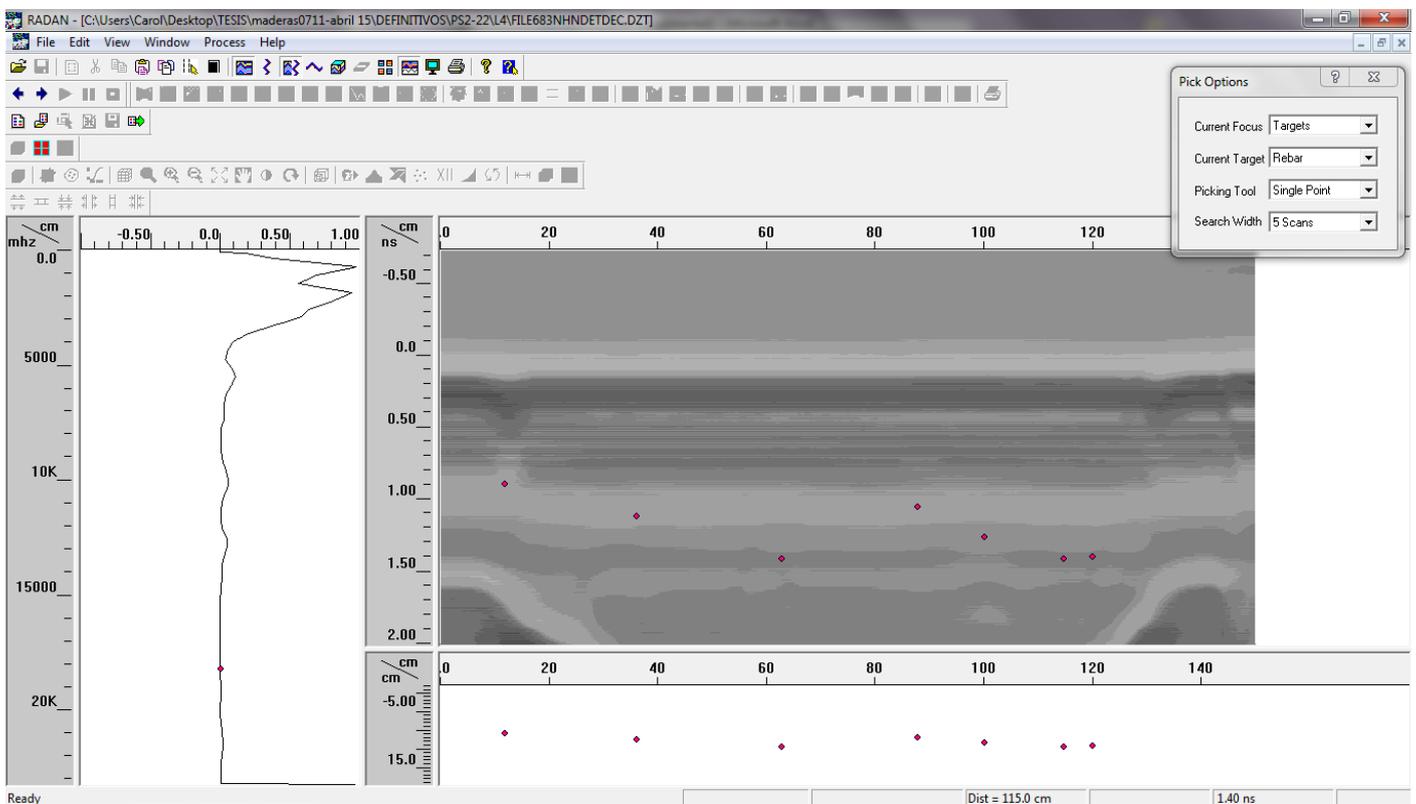
En $x=88$ cm detecta el nudo 2 del canto 1, el nudo 2 del canto 2, y el nudo 4 de compresión:

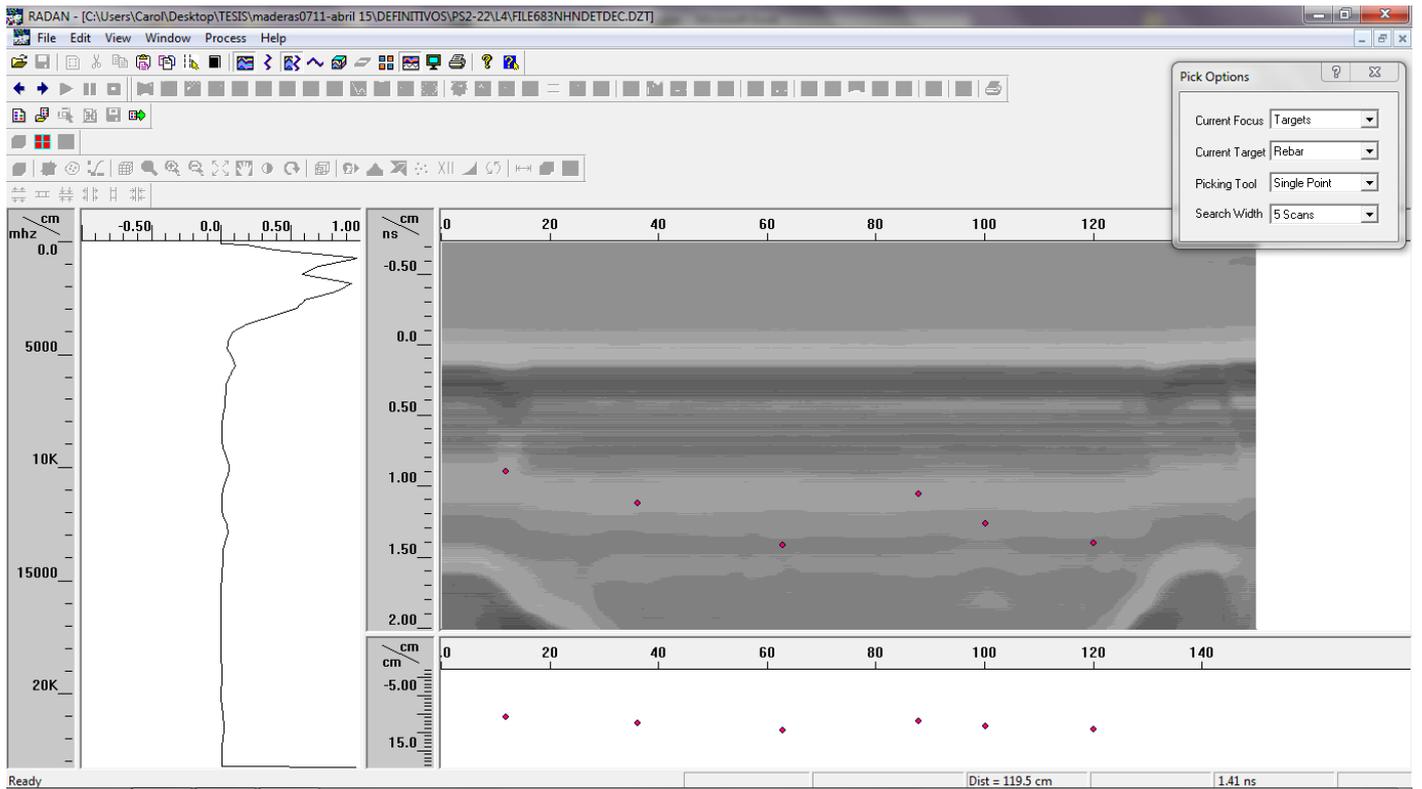


En $x=99$ cm detecta una irregularidad oculta importante, por donde rompe la viga:



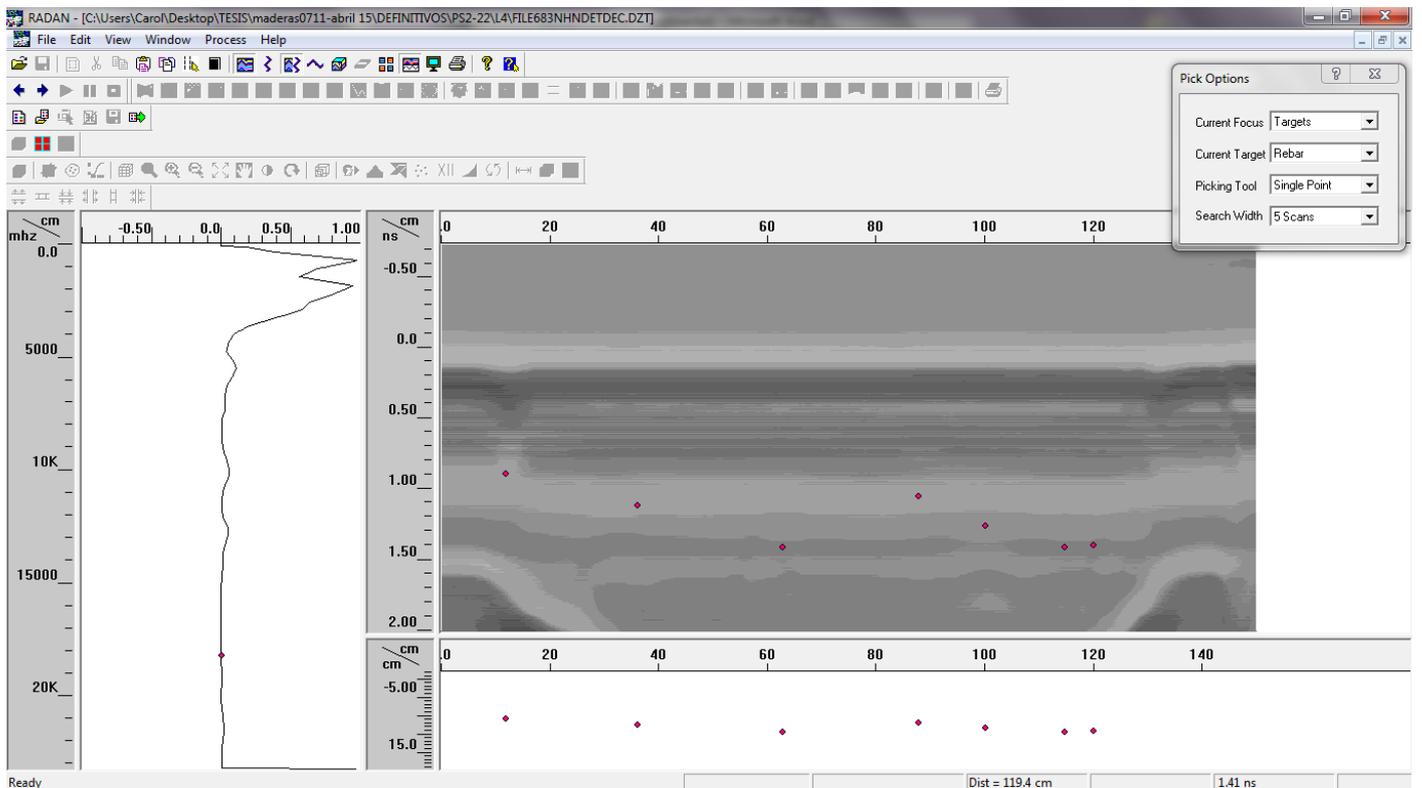
En $x=115$ cm detecta el nudo 4 de tracción:



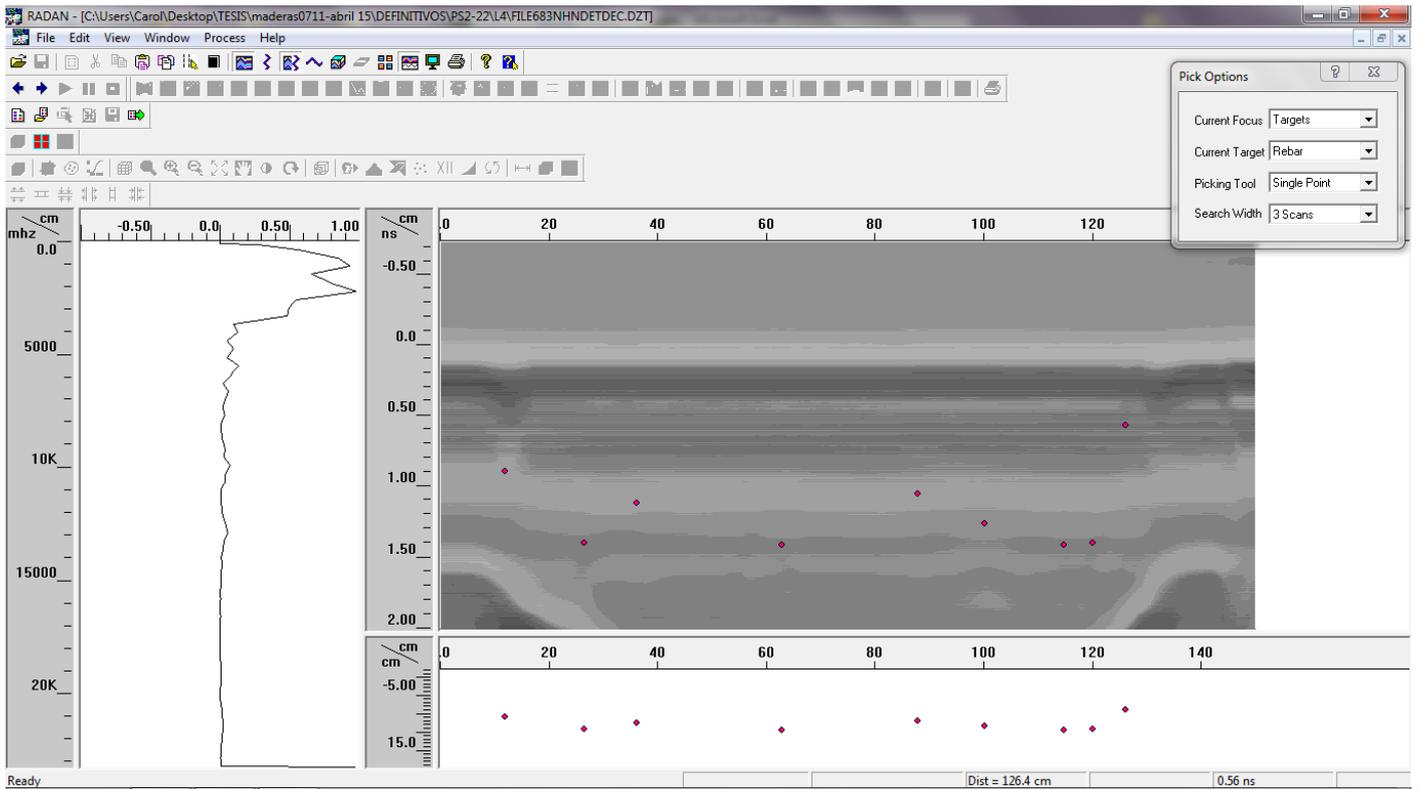


278

En x=118 cm detecta el nudo 5 de tracción, el 5, 6 y 7 de compresión, y el 3 del canto 2:

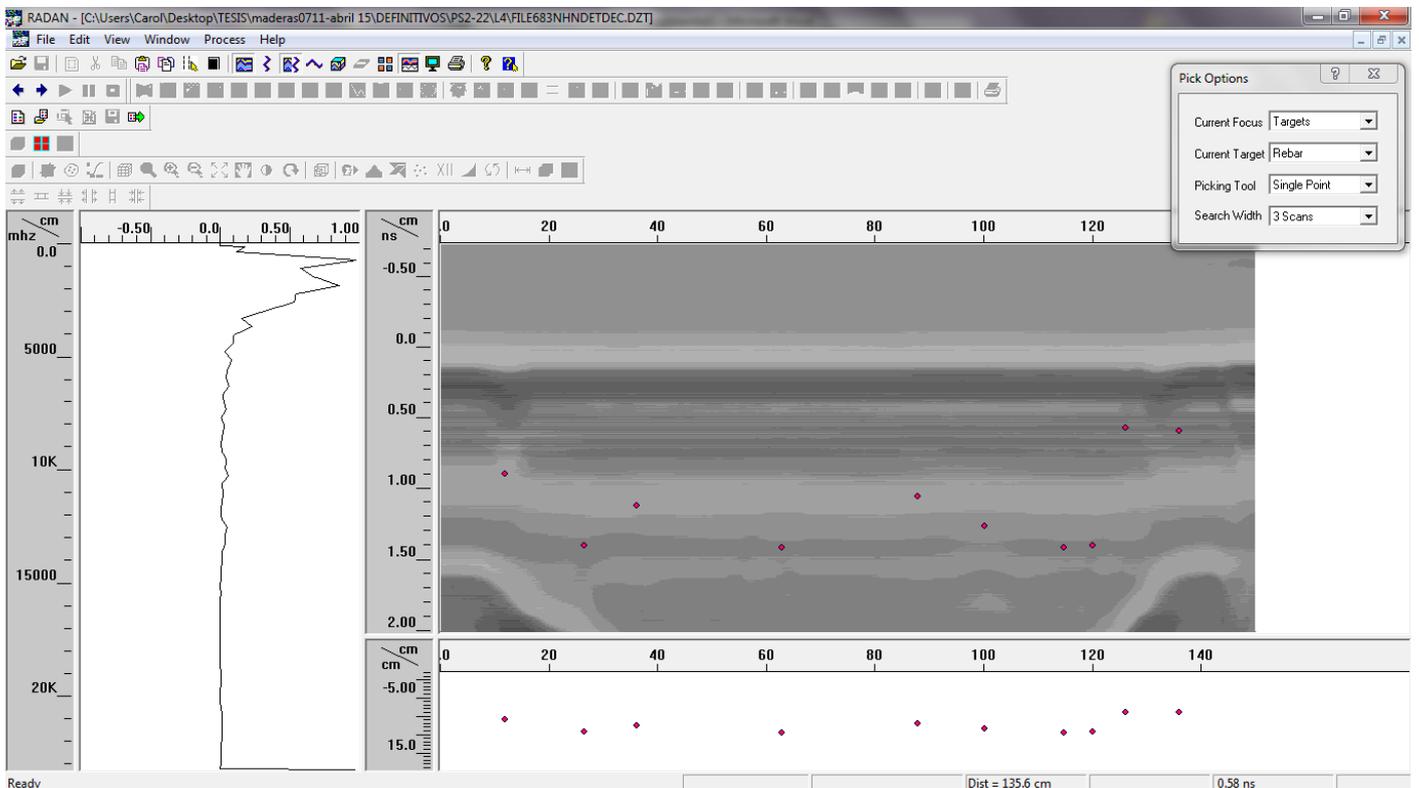


En x=126 cm detecta una irregularidad oculta:



279+

En x=135 cm detecta los nudos 6 y 7 de tracción, 8 y 9 de compresión, y 4 del canto 2:



PS2-27



Cara tracción



Canto 1



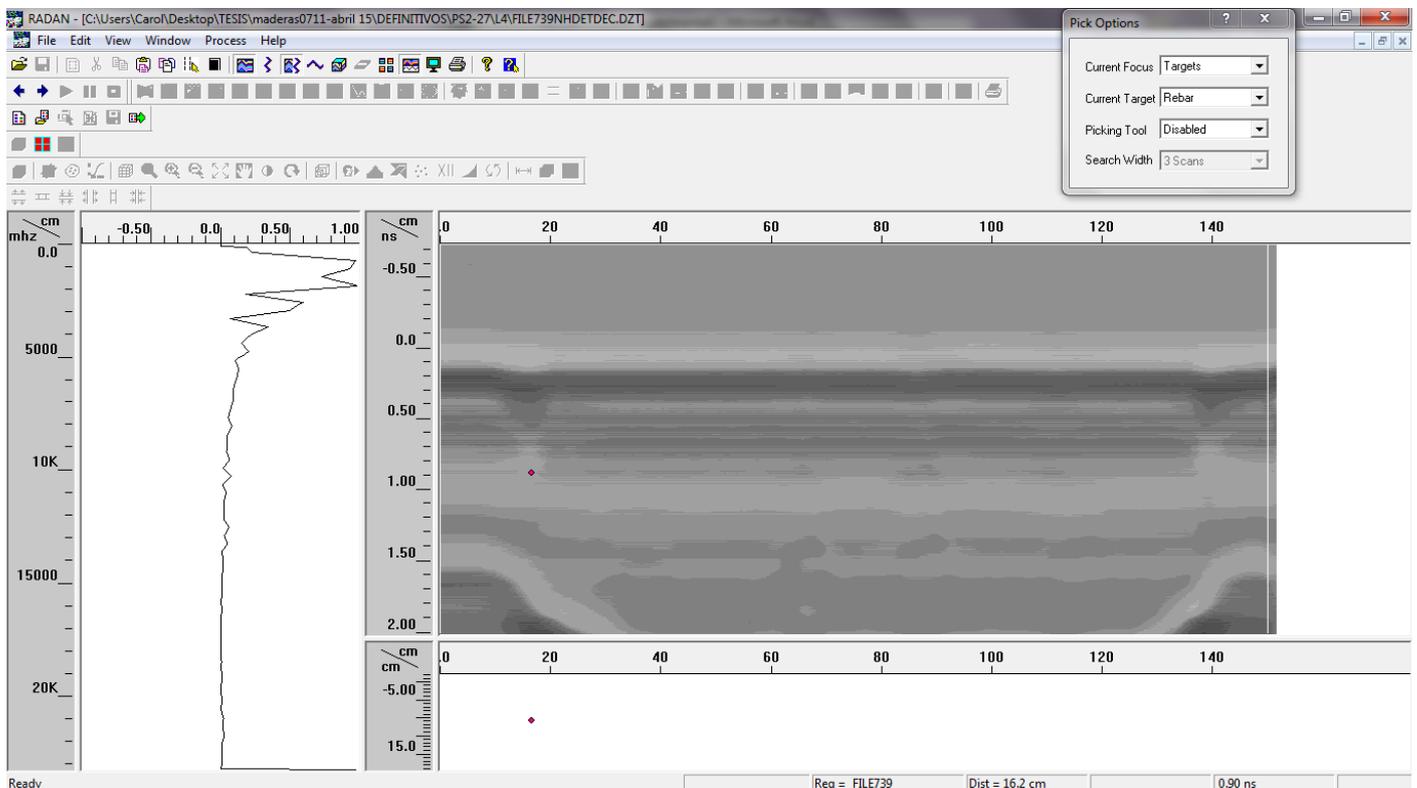
Cara compresión



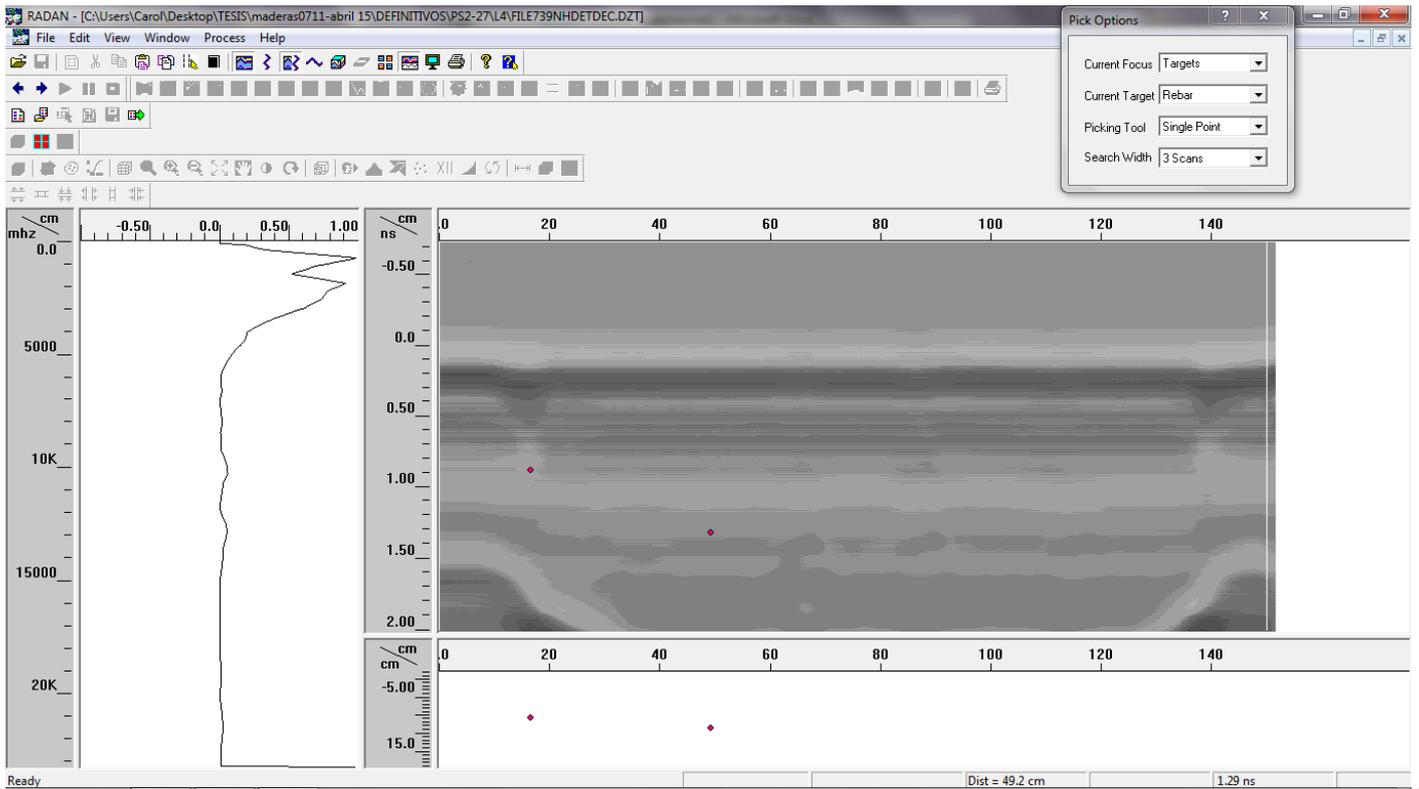
Canto 2

280 †

En $x=26$ cm detecta el nudo 1 de tracción, el 1 y 2 de compresión y el 1 del canto 2:

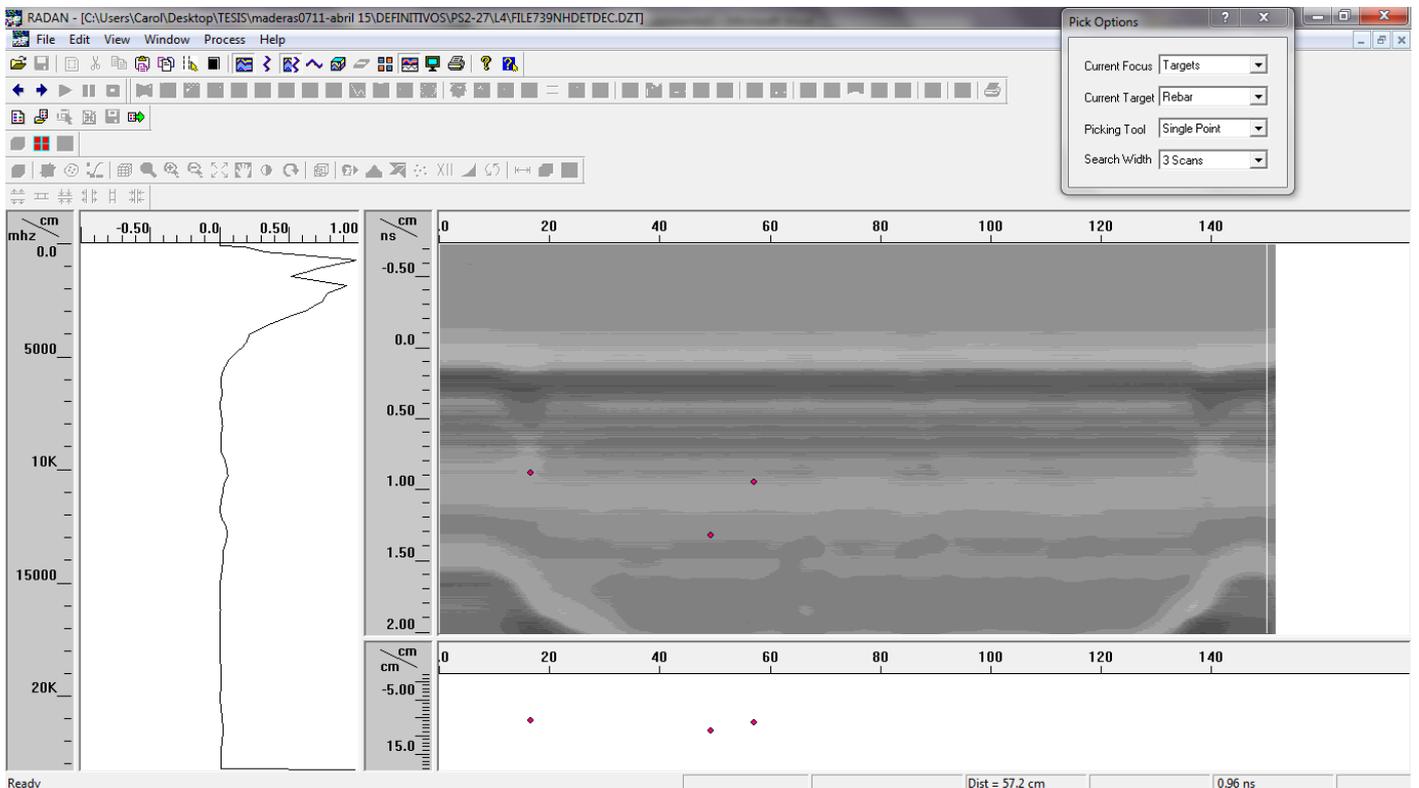


En $x=47$ cm detecta el nudo 2 de tracción y el 2 de compresión:

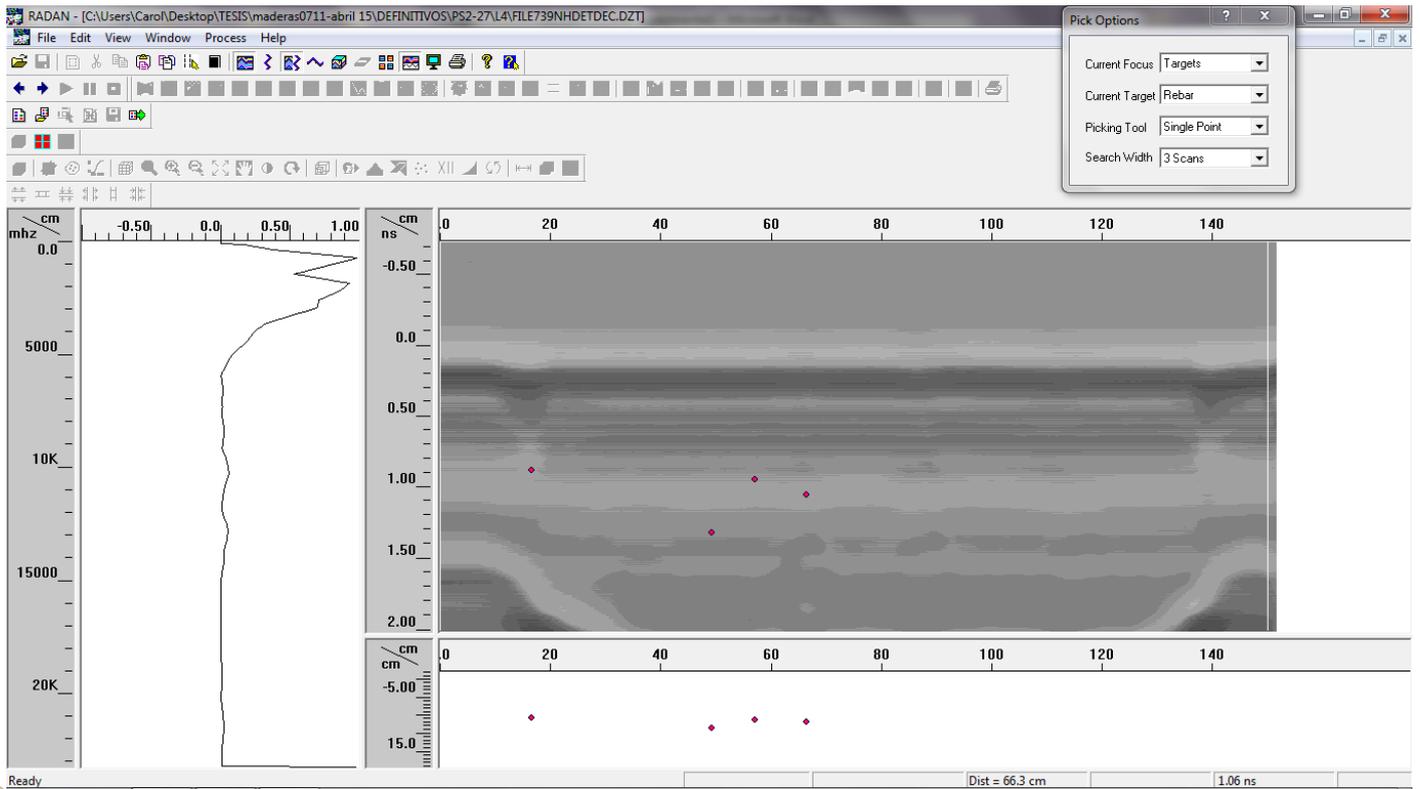


281+

En $x=55$ cm detecta el nudo 3 de tracción y el 3 y 4 de compresión:

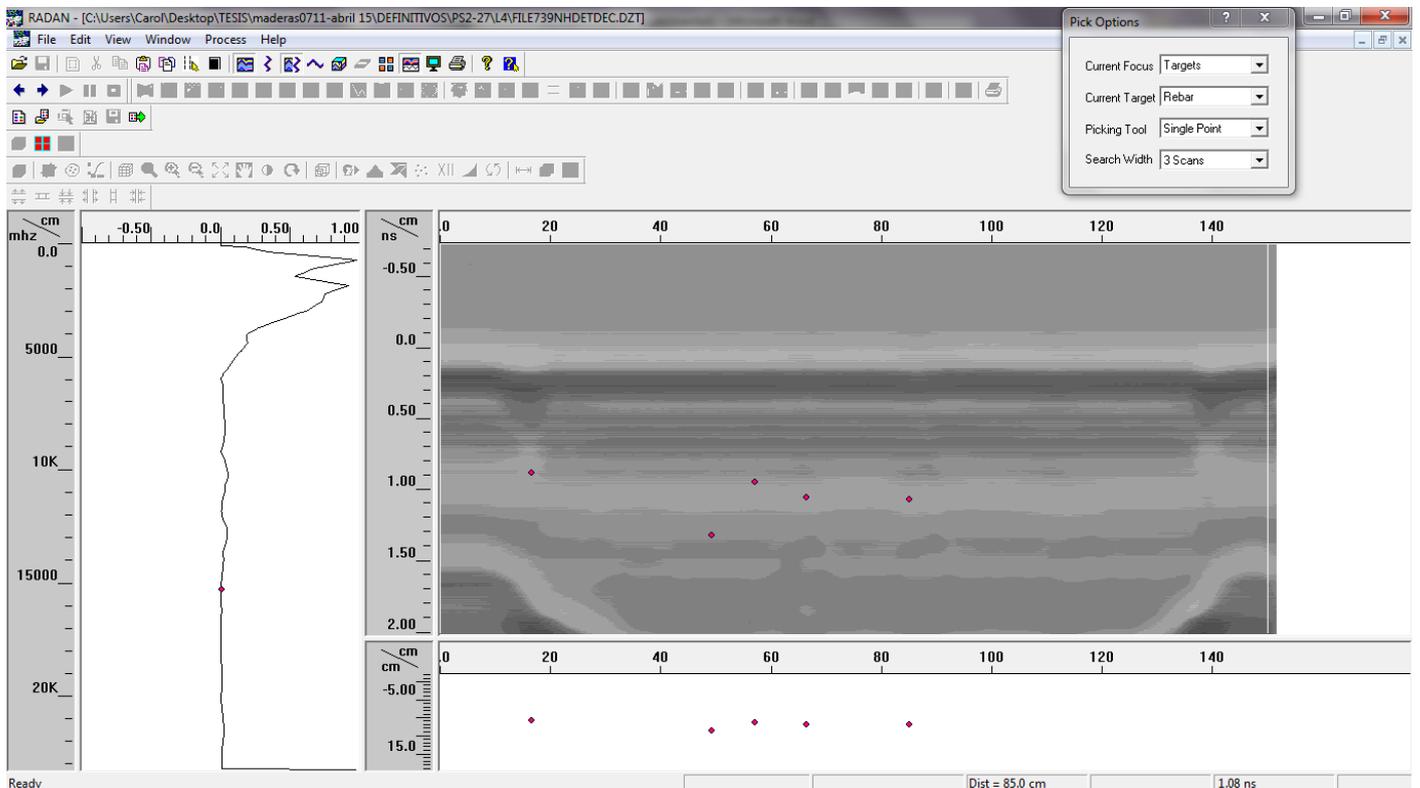


En $x=66$ cm detecta un defecto oculto por donde rompe la viga:

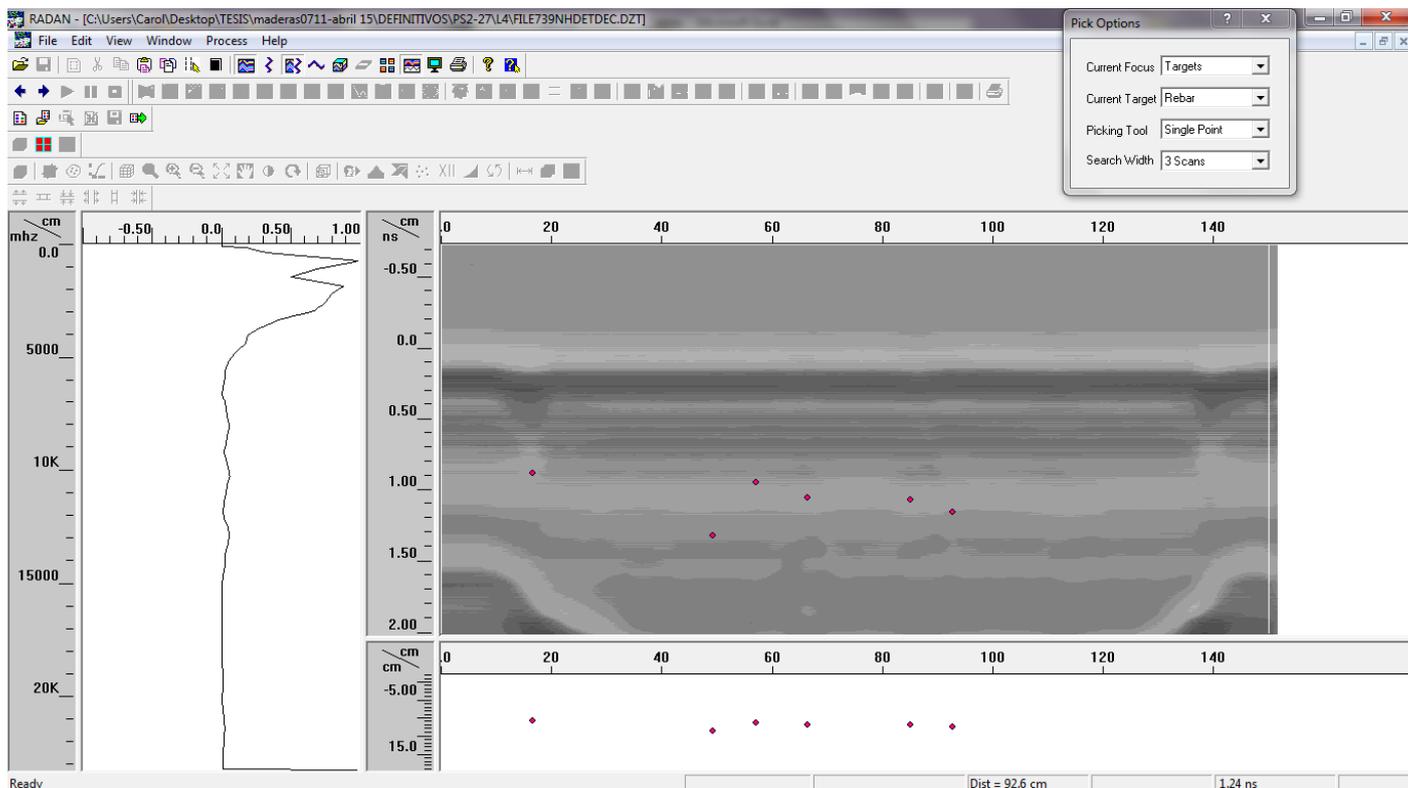


282 TT

En $x=85$ cm detecta el punto 4 de tracción y el 3 del canto 2:

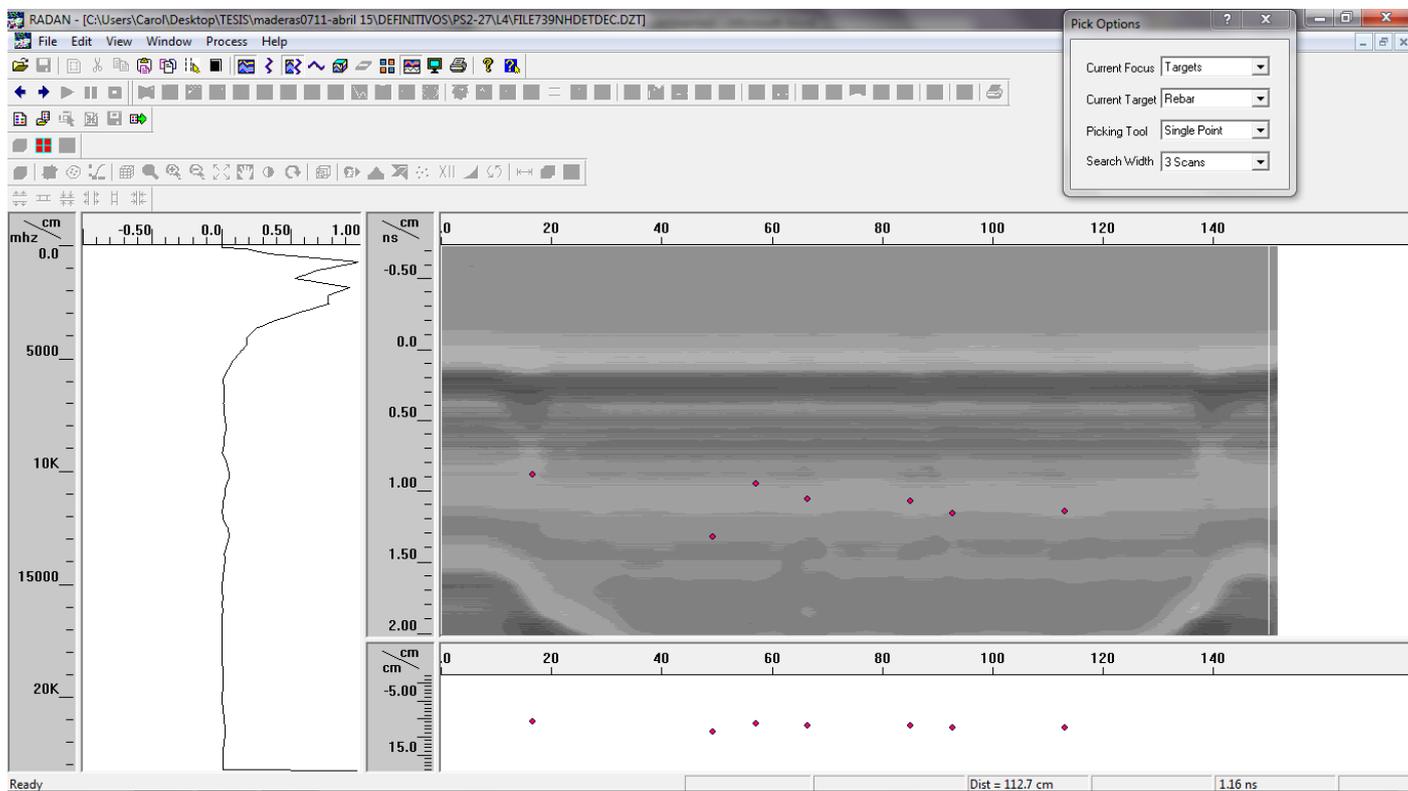


De $x=85$ cm a $x=92$ cm hay una zona con defectos ocultos, por donde también rompe la viga, e identifica el nudo 5 de tracción y el 5 de compresión:

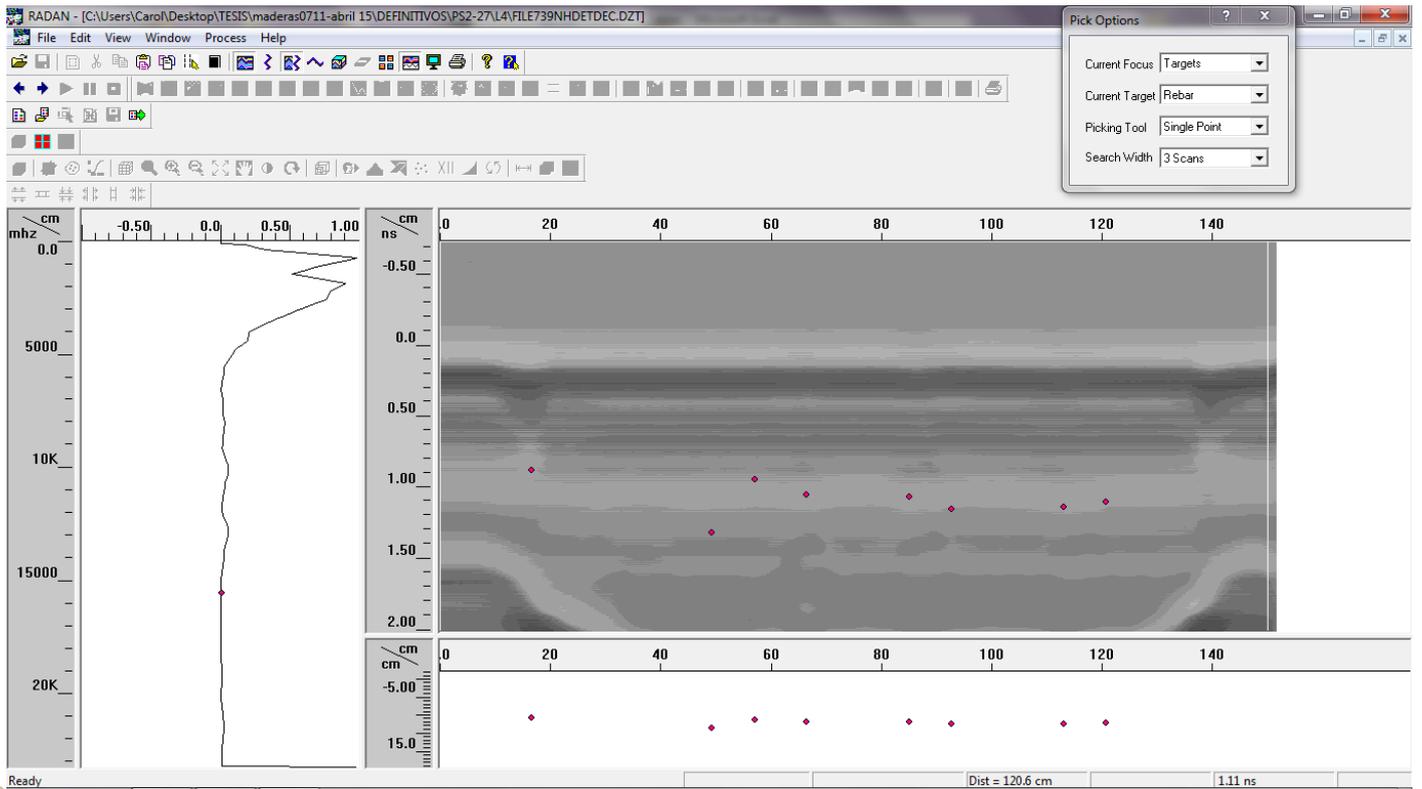


283+

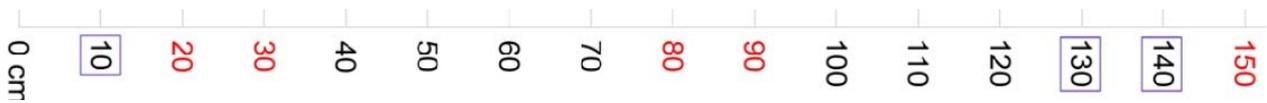
En $x=112$ cm detecta el nudo 1 del canto 1 y el n 4 del canto 2:



En x=120 cm detecta los nudos 6 y 7 de tracción:



PS2-28



Cara tracción



Canto 1



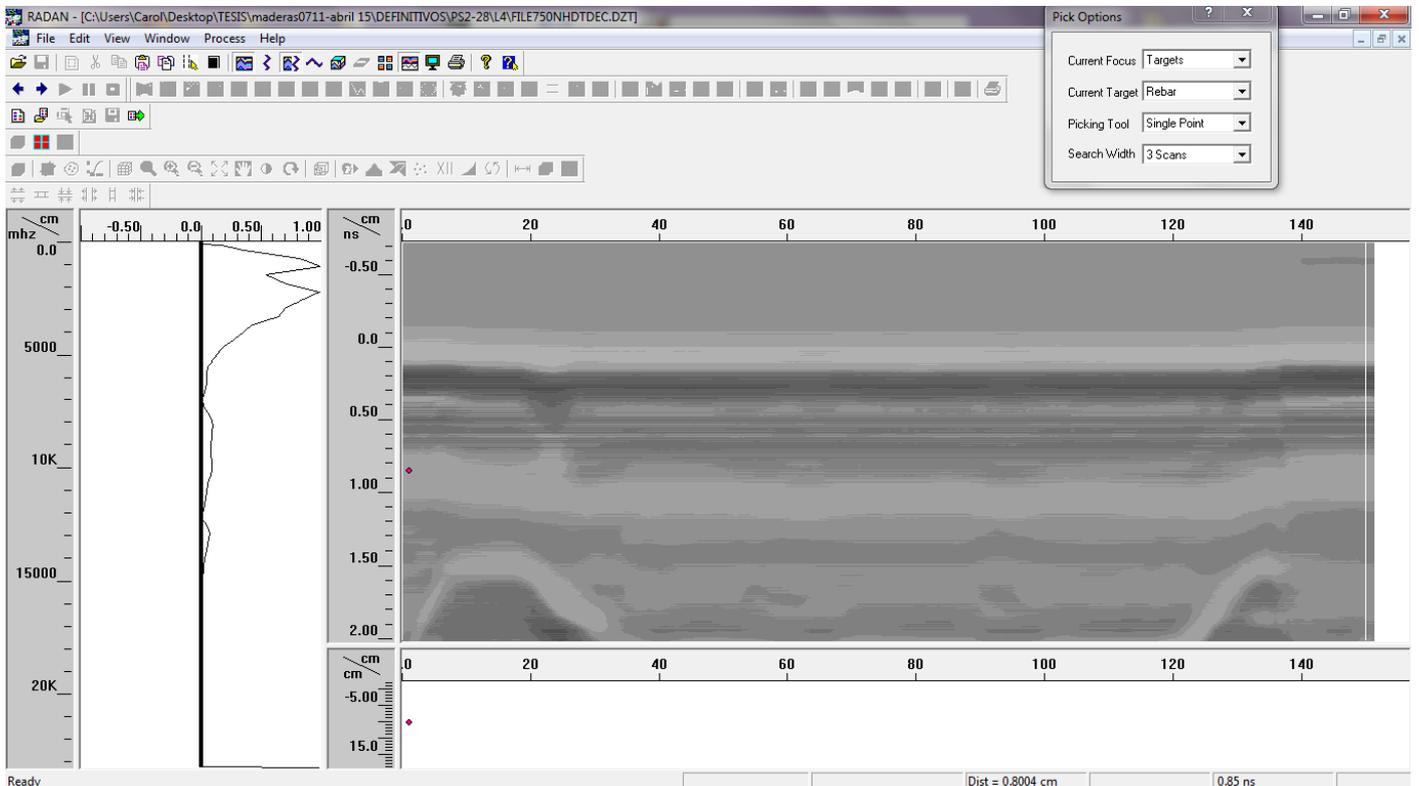
Cara compresión



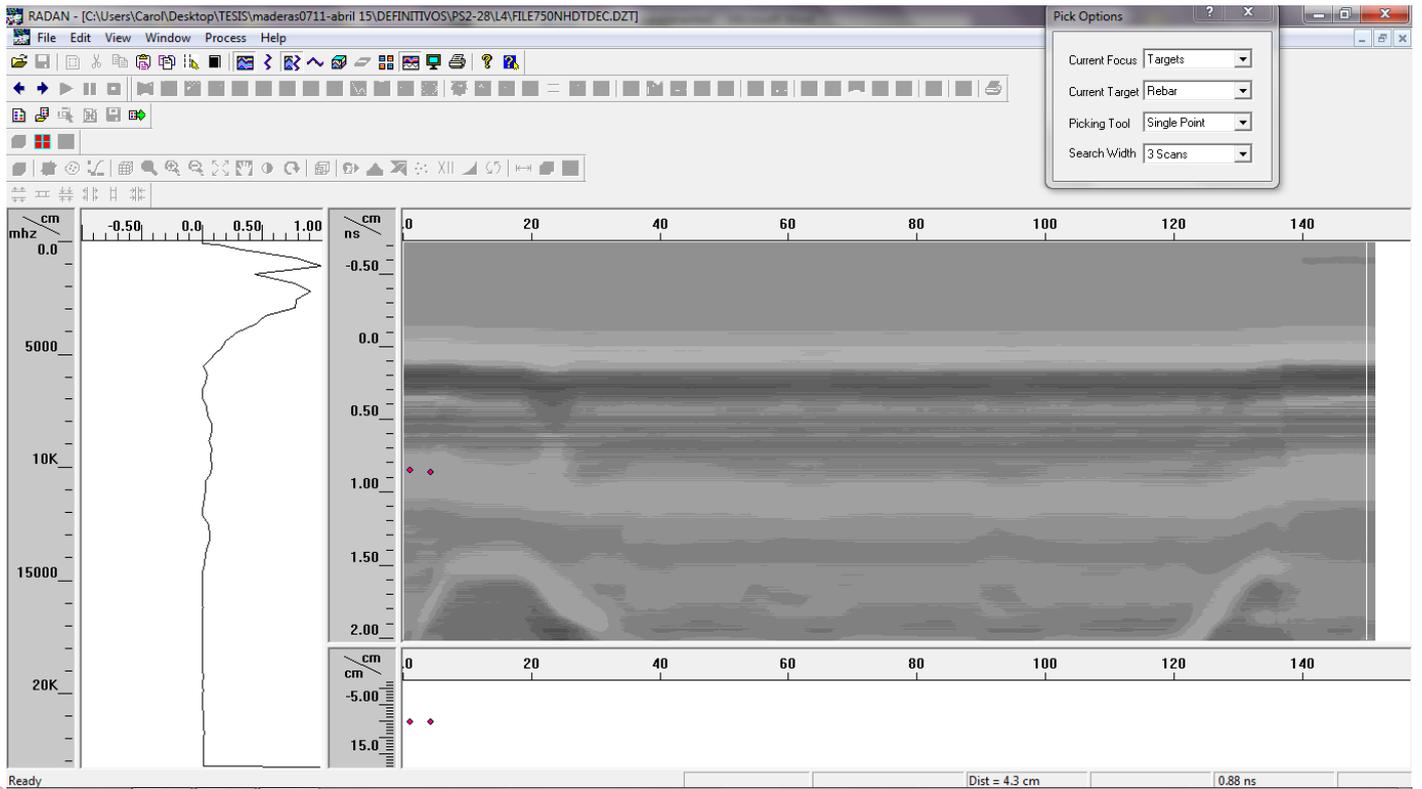
Canto 2

285+

En $x=0$ cm detecta el nudo 1 de tracción, el 1 del canto 1, el 1 y 2 de compresión, y el 1 del canto 2:

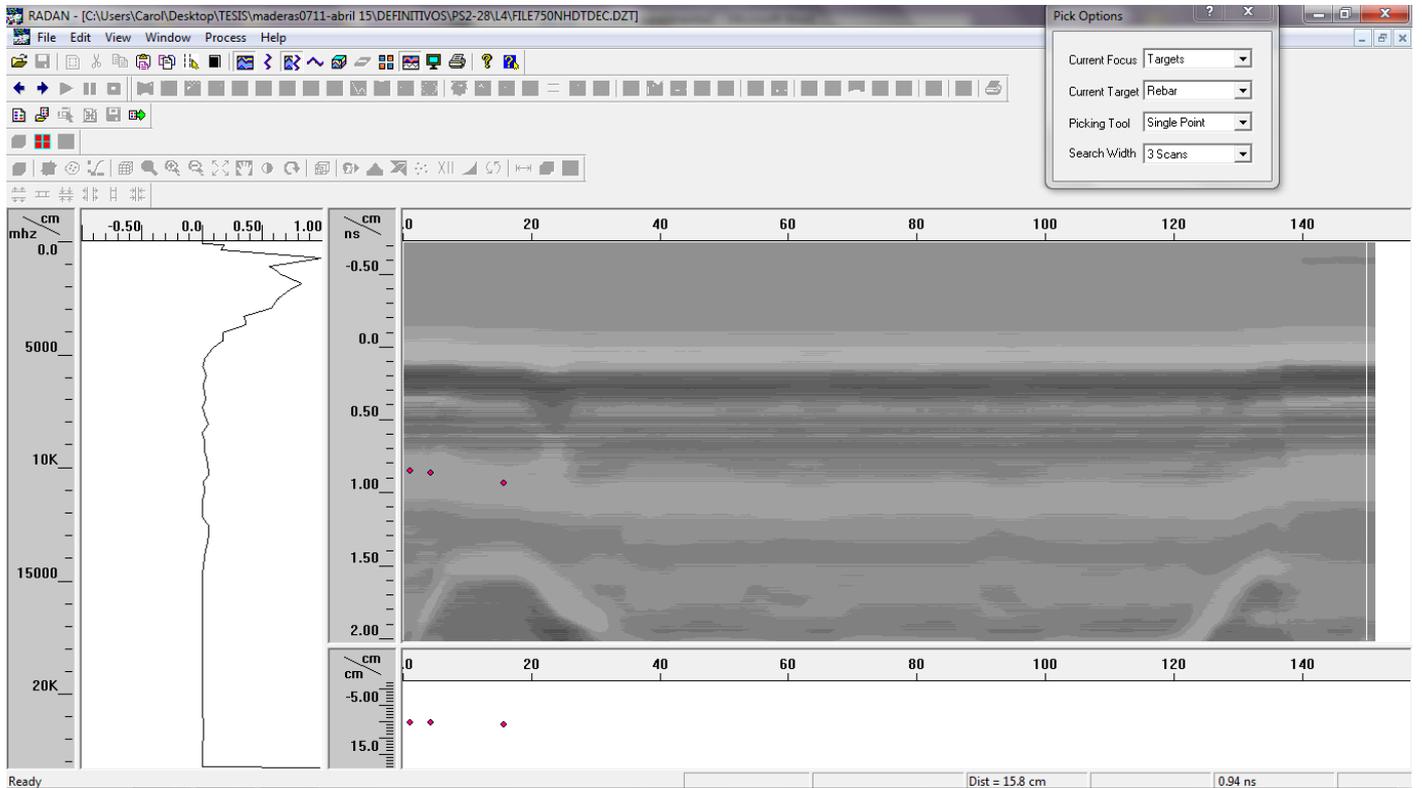


En $x=5$ cm detecta el nudo 2 de tracción:

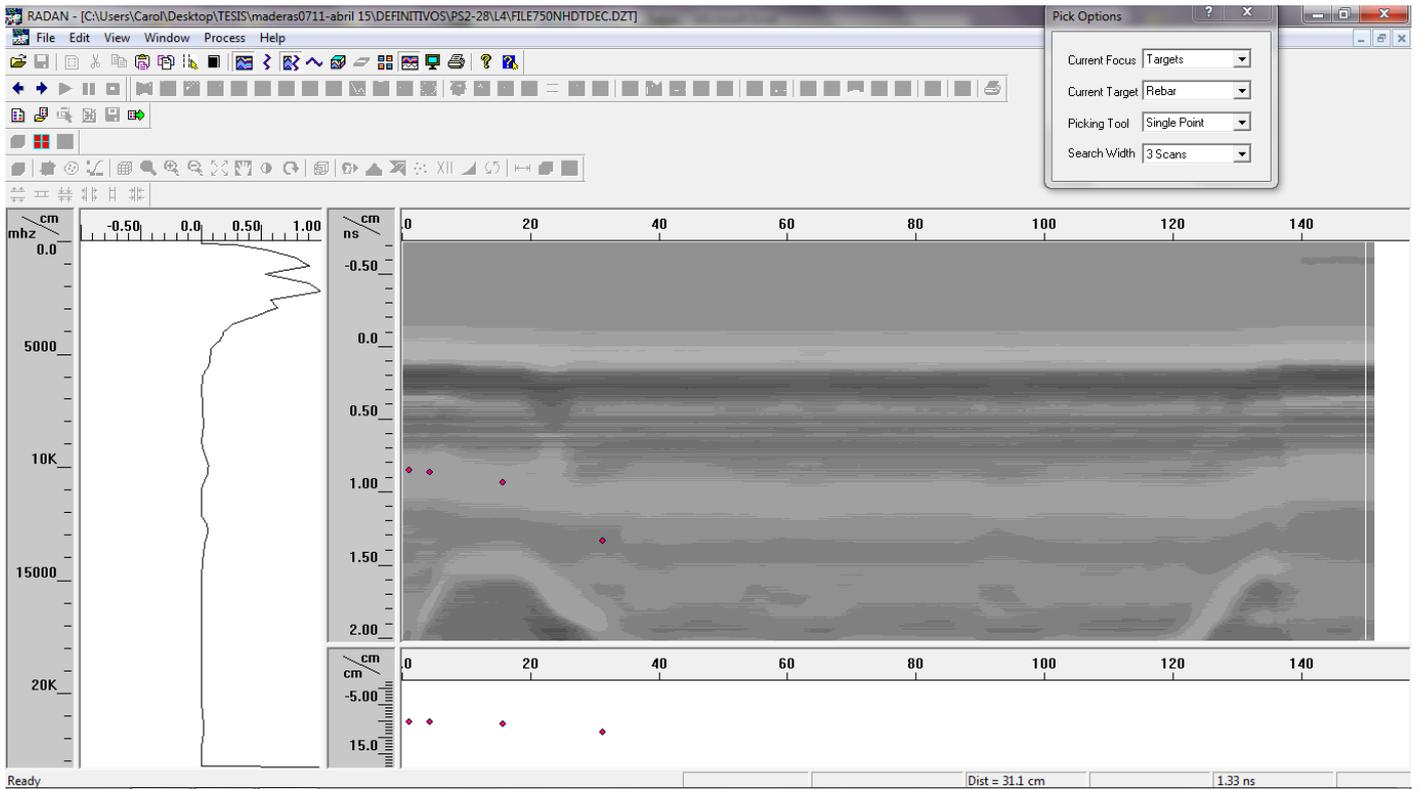


286 TT

En $x=15$ cm detecta el nudo 3 de tracción y el 3 de compresión:

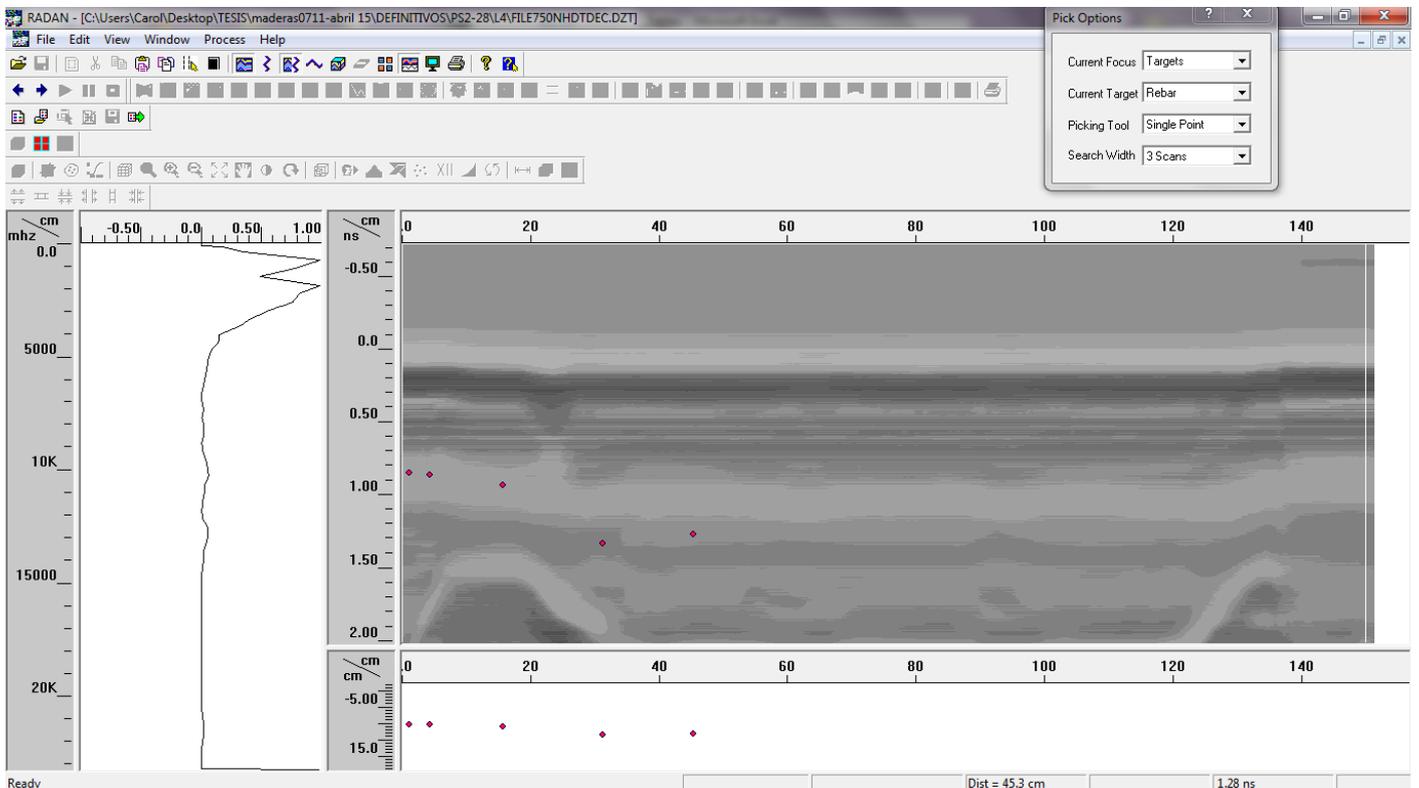


En $x=31$ cm detecta defectos ocultos:

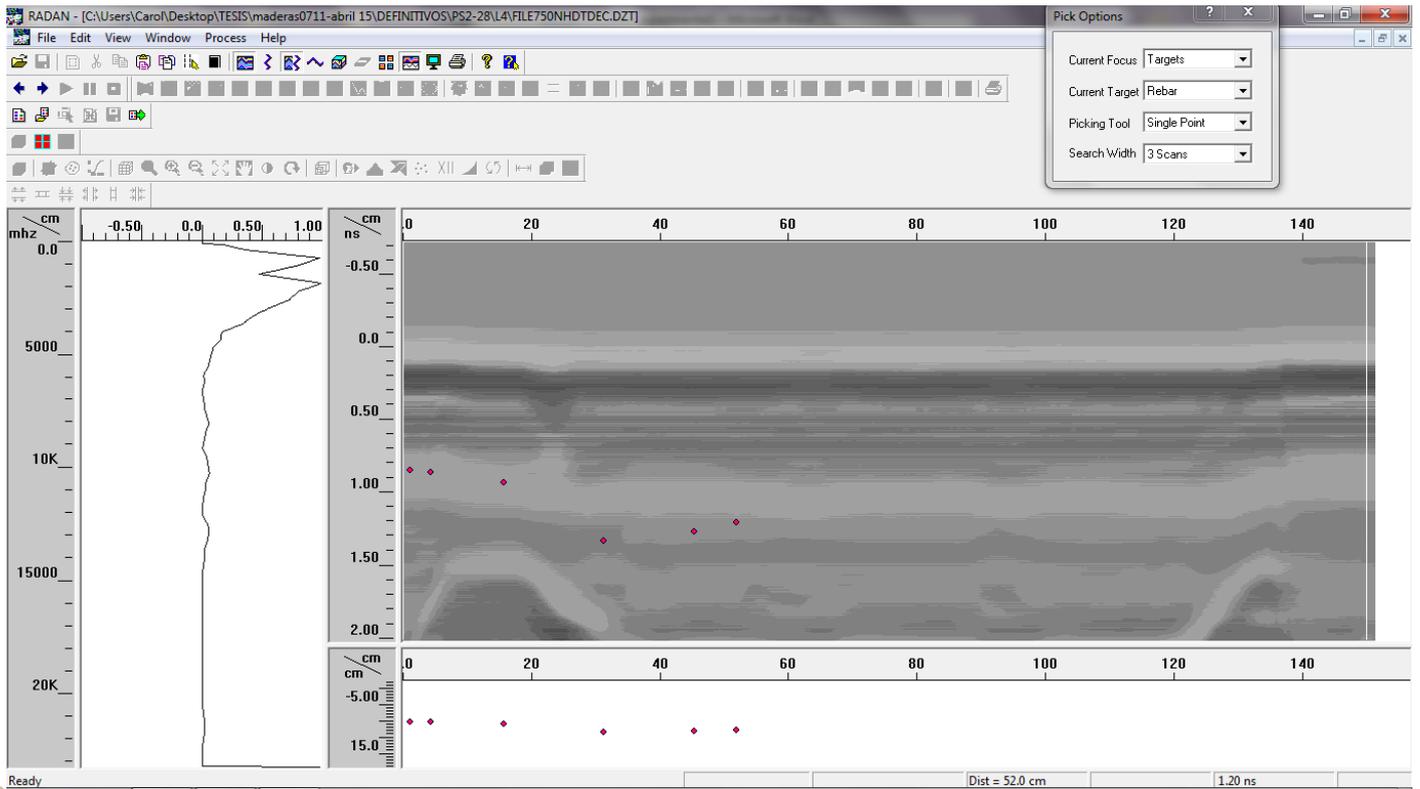


287 †

En $x=45$ cm detecta el nudo 4 de tracción y el 2 del canto 1:

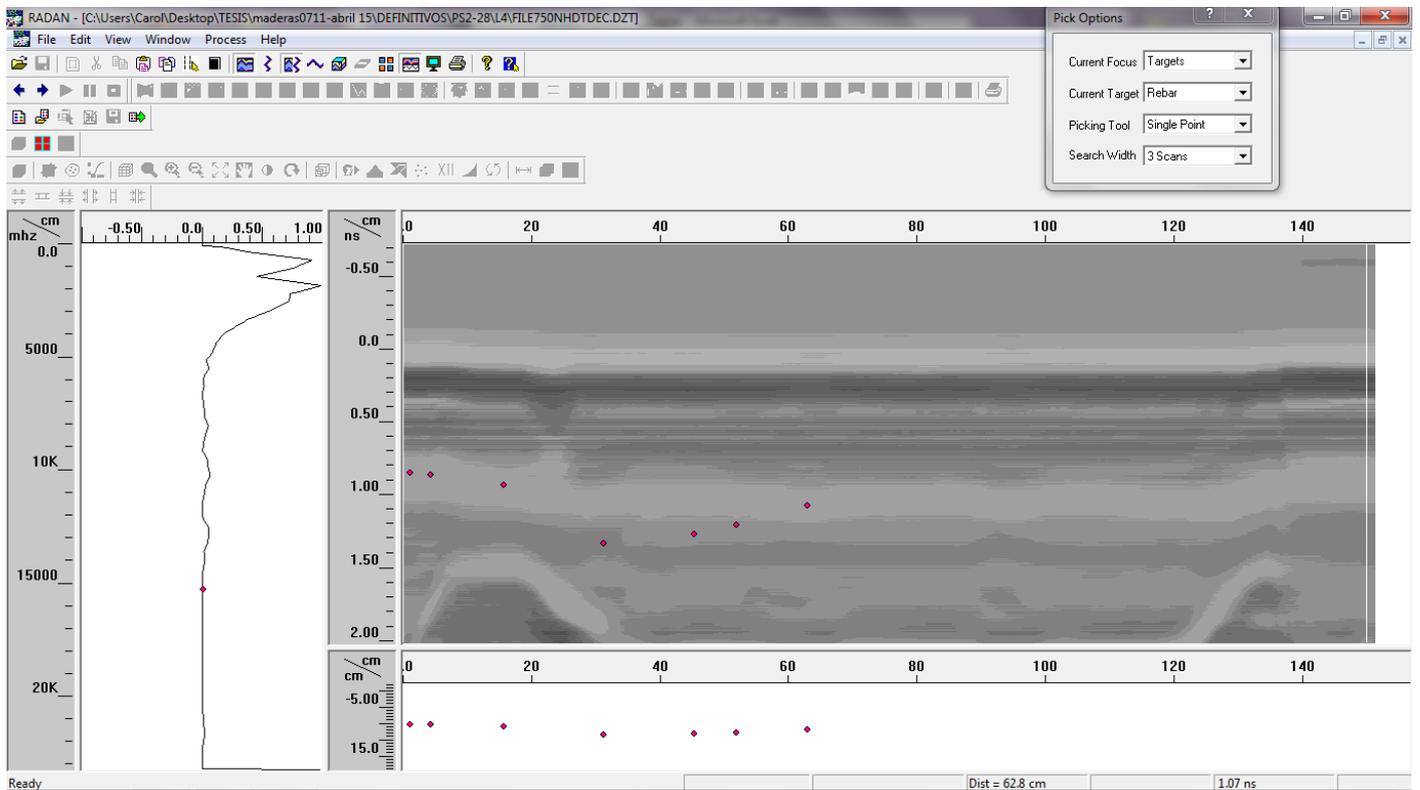


En $x=52$ cm detecta el nudo 2 del canto 1, y el 4 y 5 de compresión:

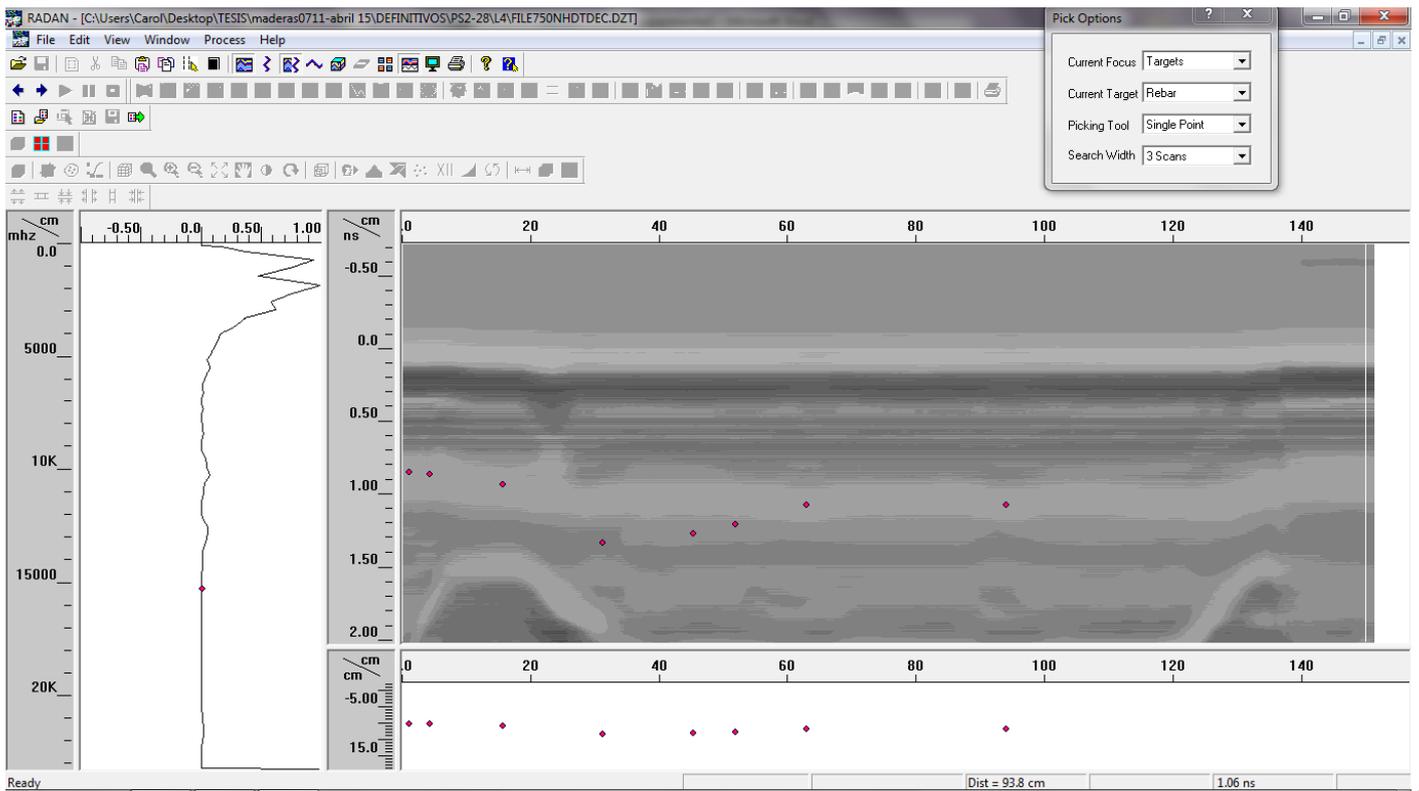


288 TT

En $x=63$ cm detecta el nudo 5 de tracción:

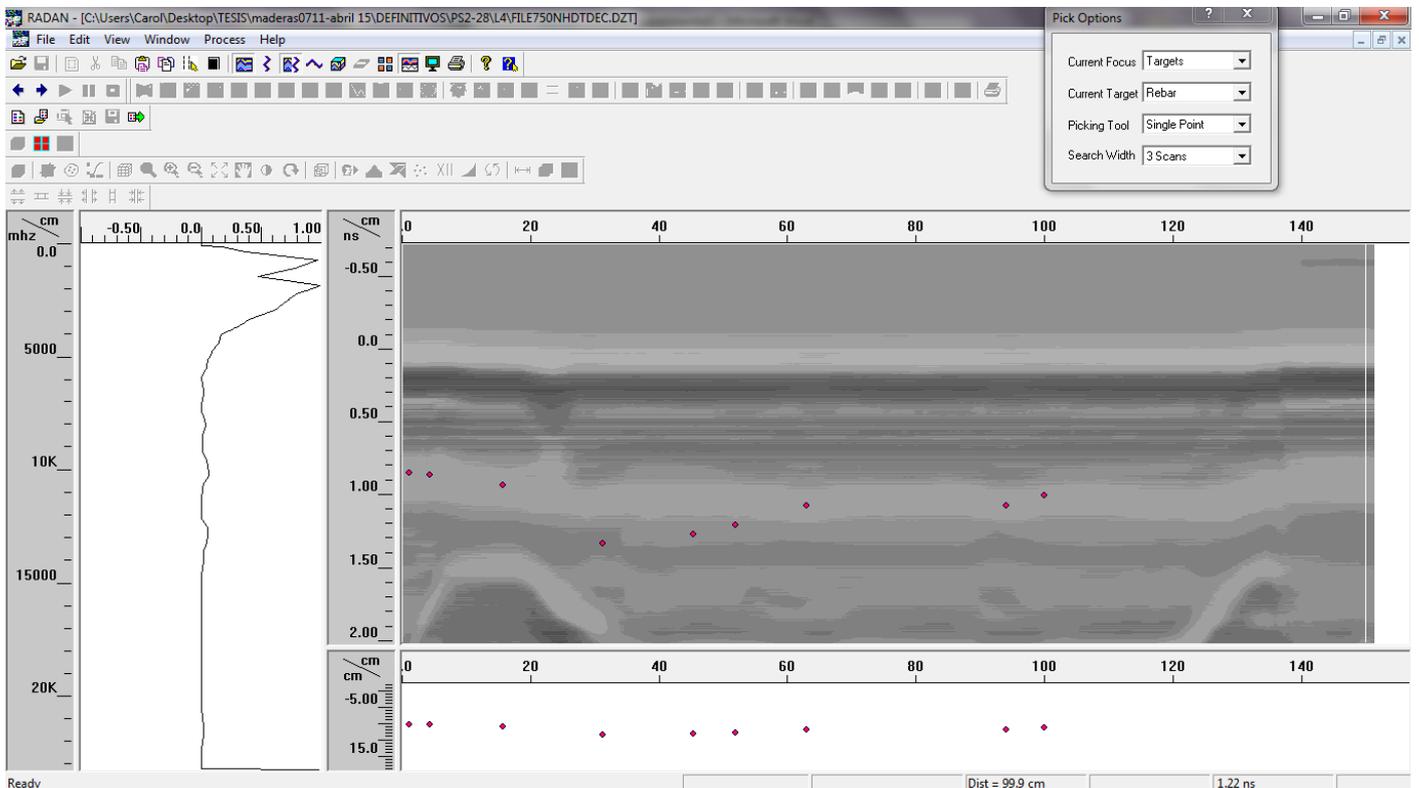


En $x=93$ cm detecta un defecto oculto:

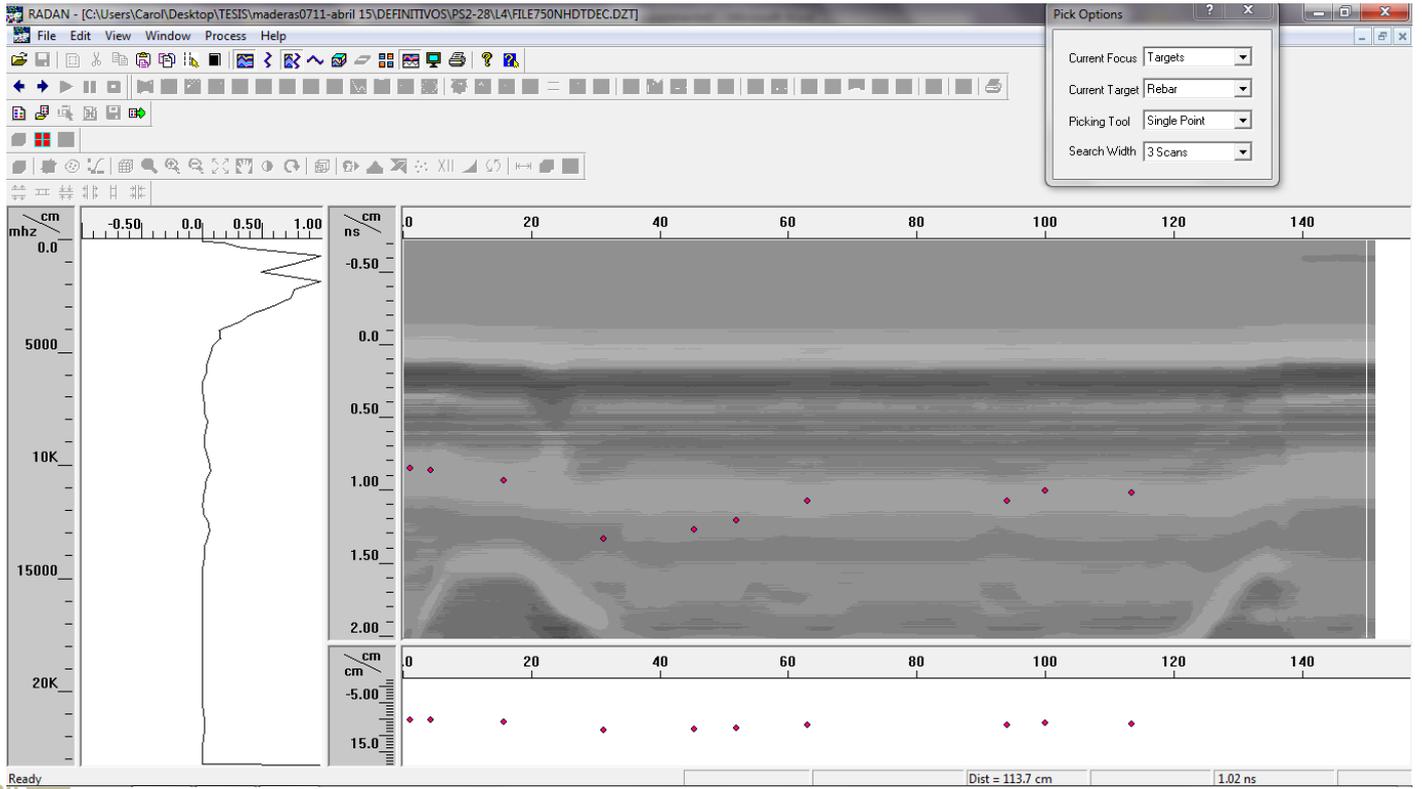


289 †

En $x=100$ cm no es seguro que detecte los nudos 6 y 7 de compresión y 3 del canto 2:



En x=113 cm detecta el nudo 6 de tracción y 3 del canto 1:



PS2-29



Cara tracción



Canto 1



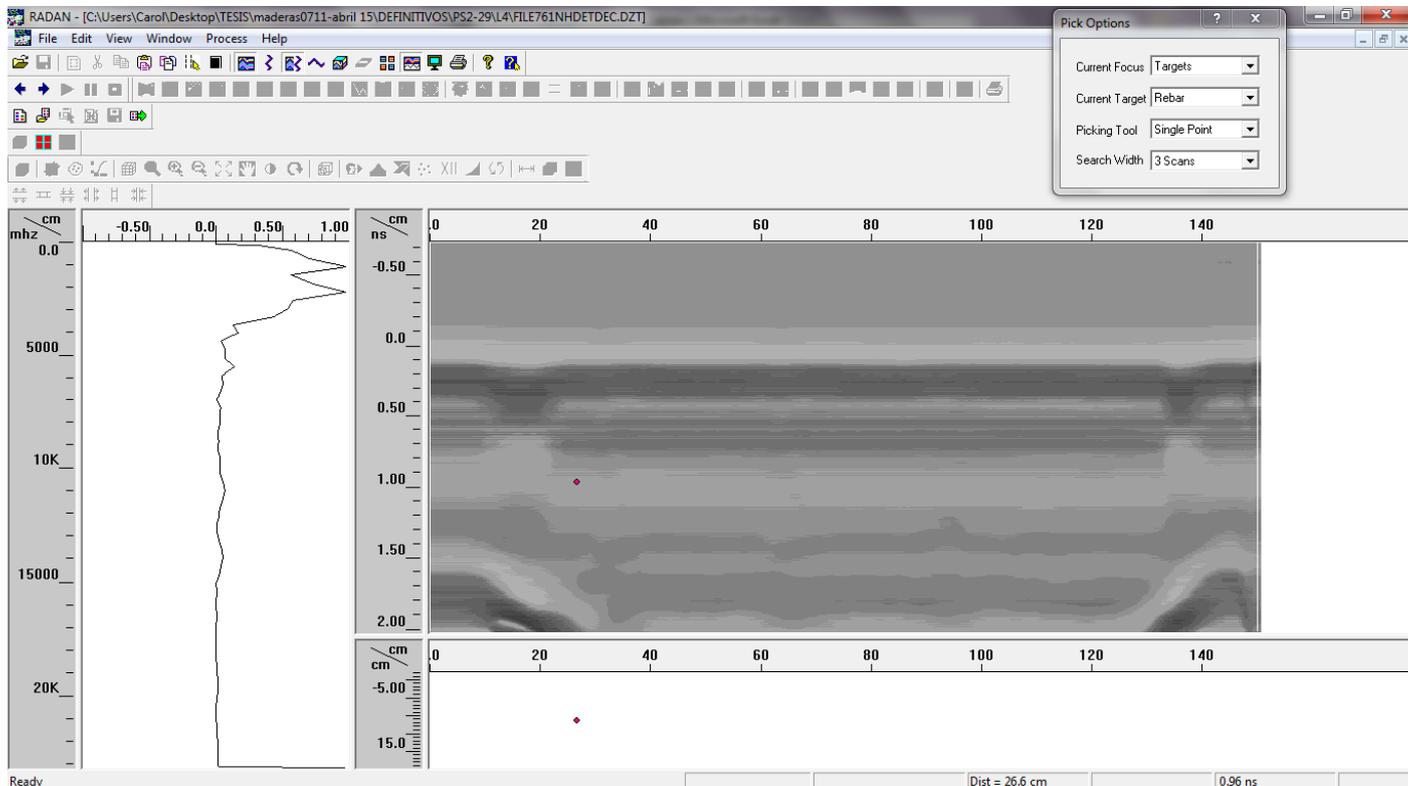
Cara compresión



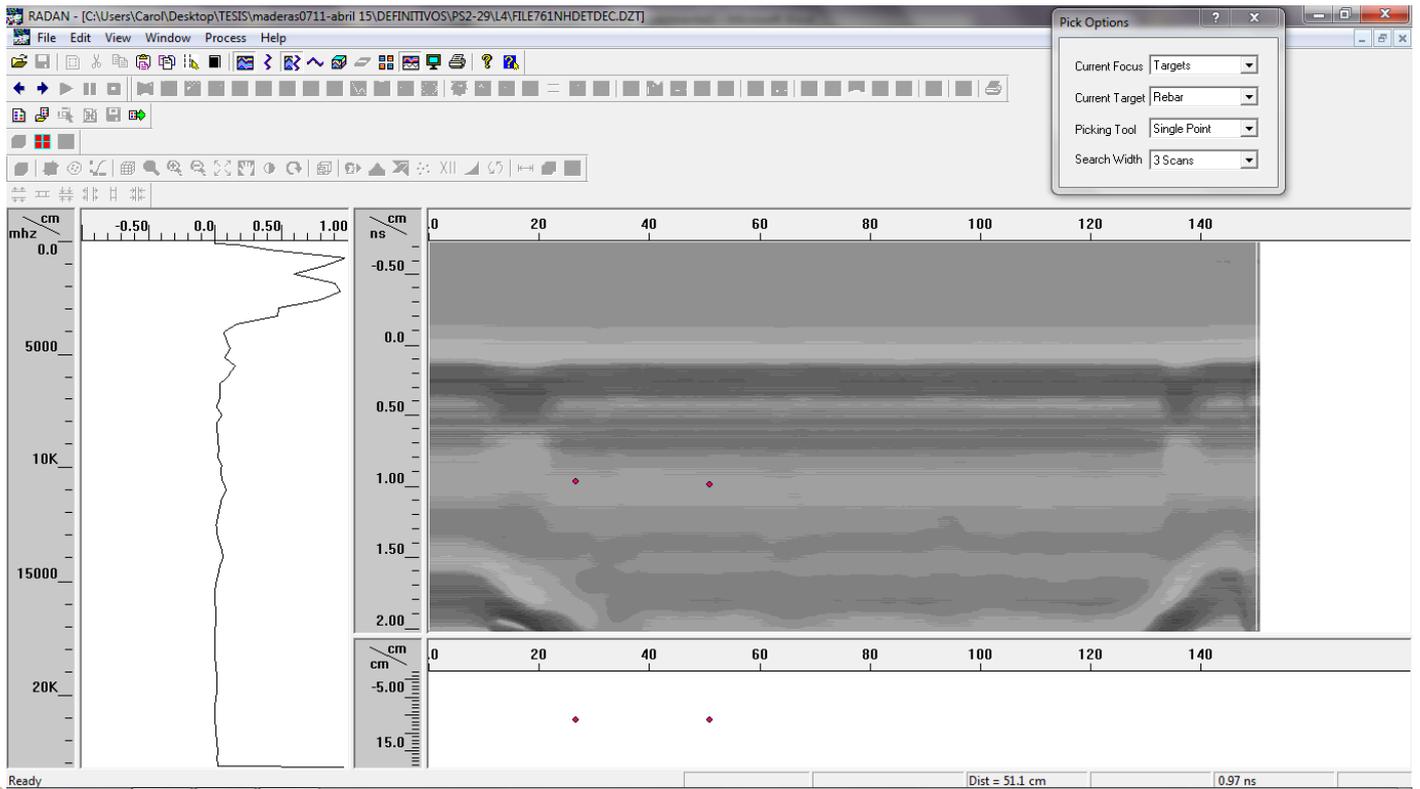
Canto 2

En $x=26$ cm detecta los nudos 1 y 2 de tracción, y el nudo 2 del canto 1:

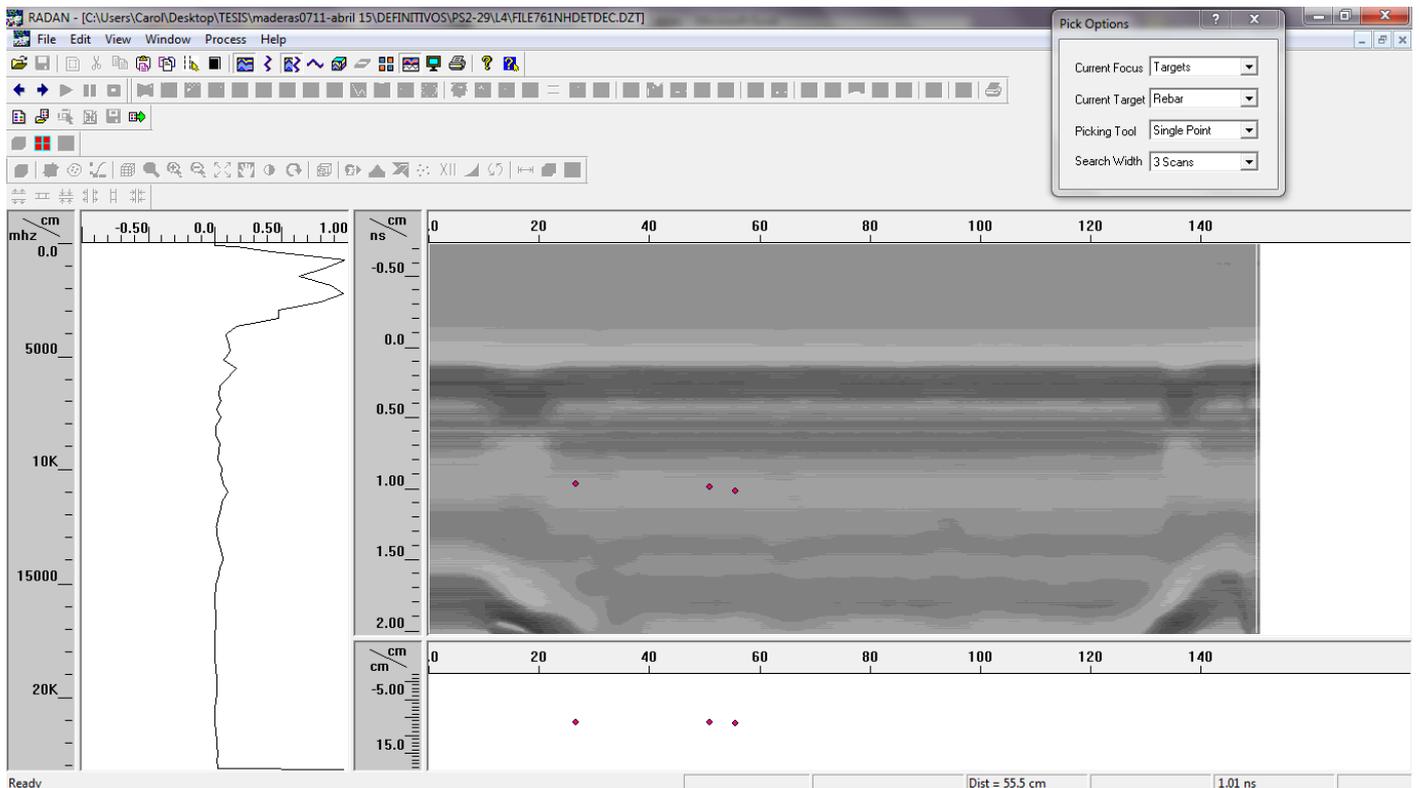
291+



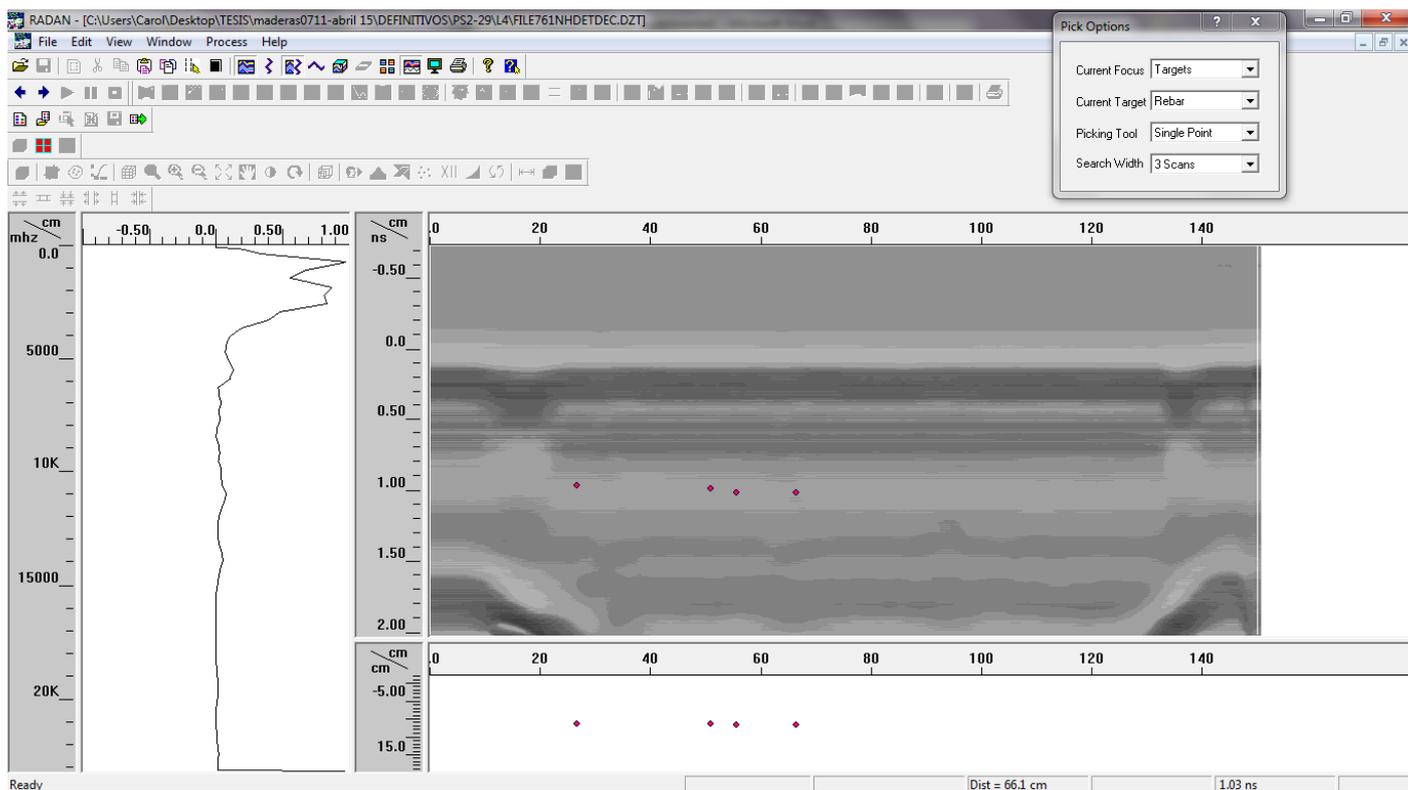
En $x=50$ cm detecta el nudo 3 de tracción y el 3 del canto 1:



En $x=55$ cm detecta el nudo 2 de compresión:

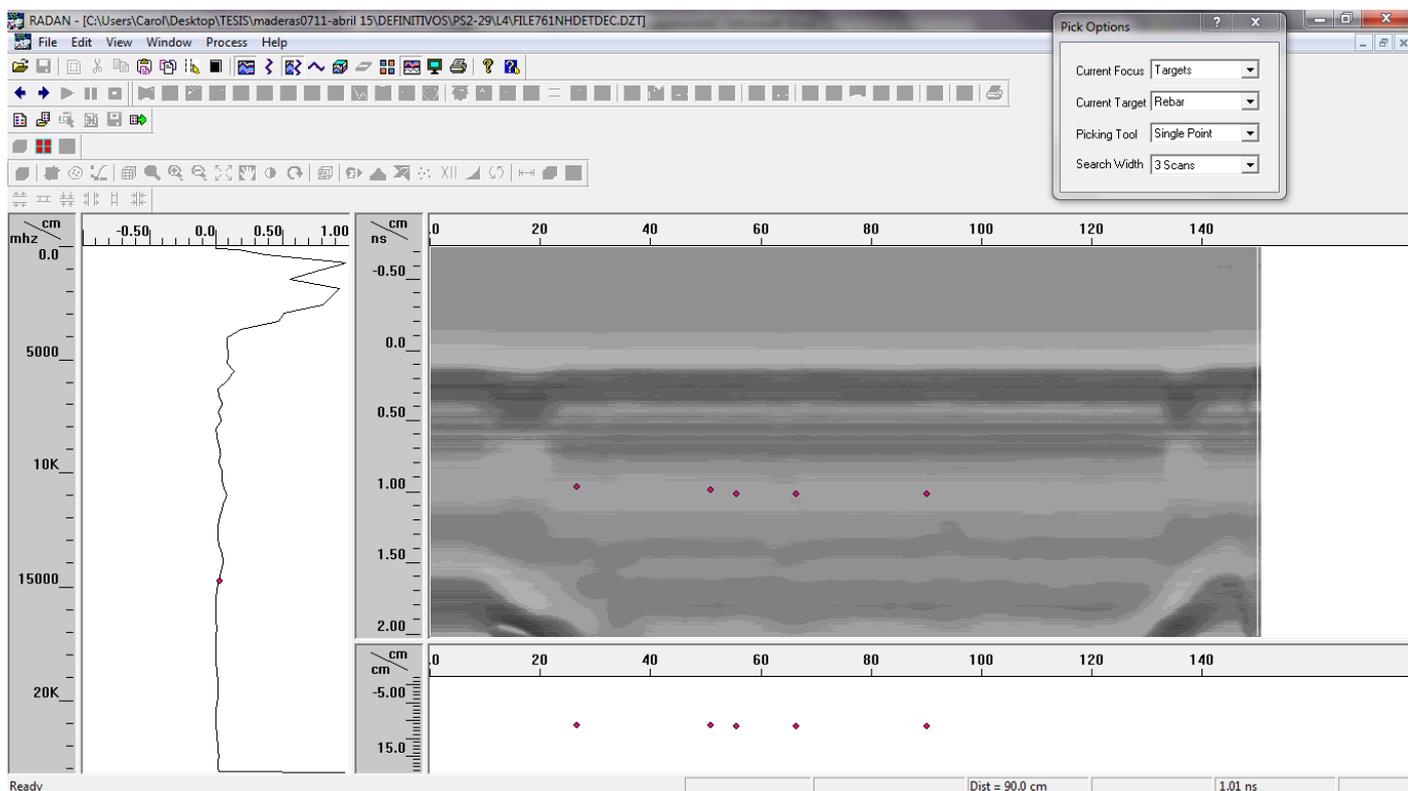


En x=66 cm detecta los nudos 4 y 5 de tracción, y el nudo 4 y 5 de compresión:

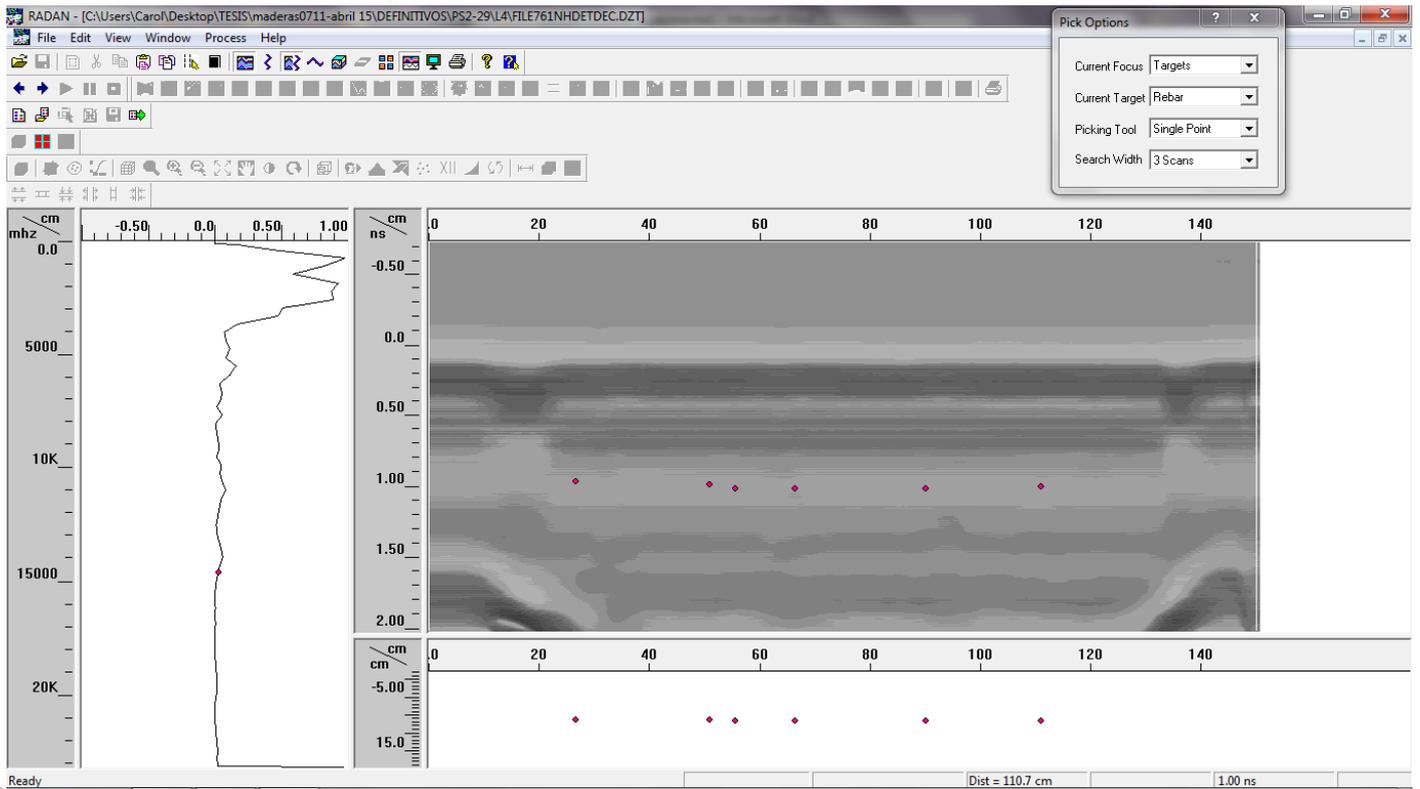


293

En x=90 cm detecta la presencia de defectos ocultos:

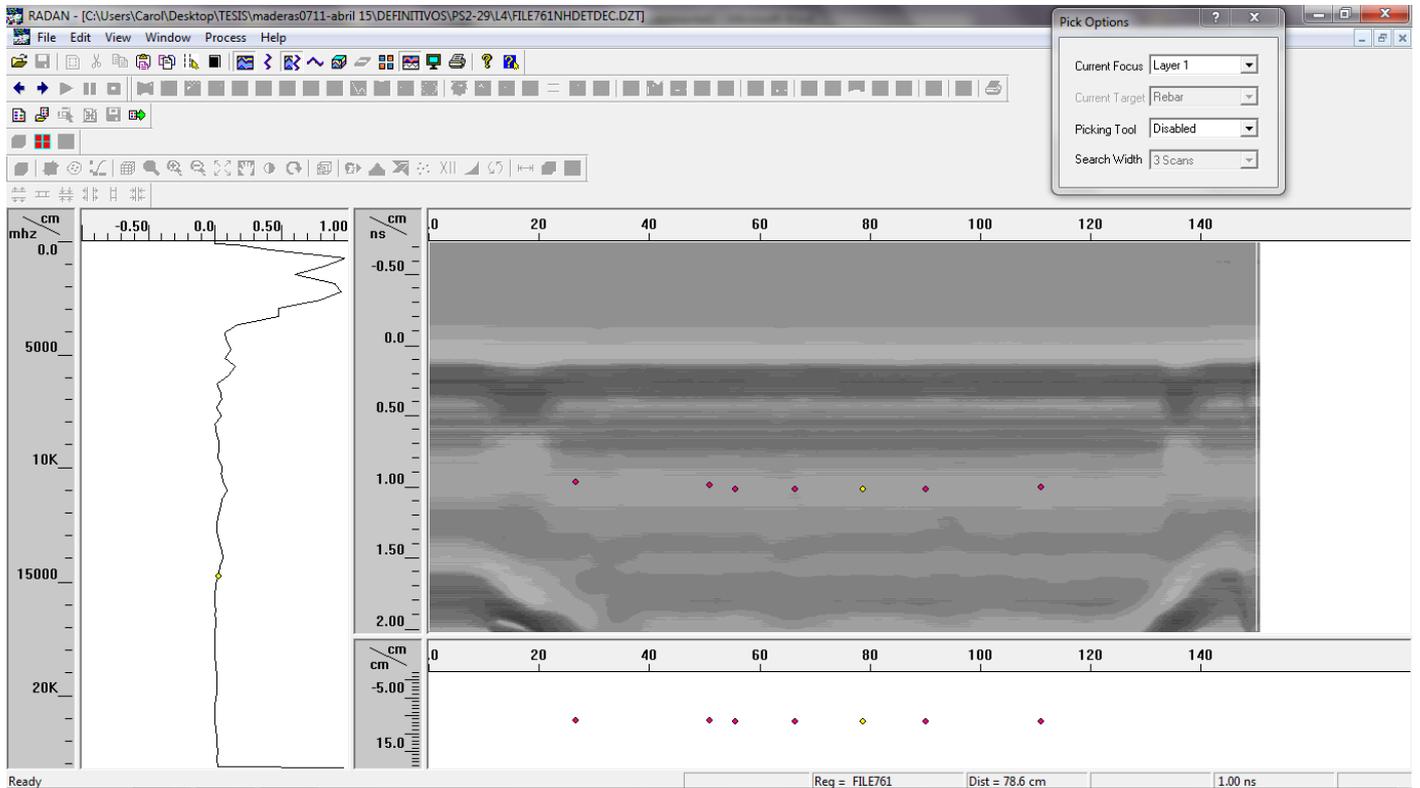


En $x=110$ cm detecta un defecto oculto importante:



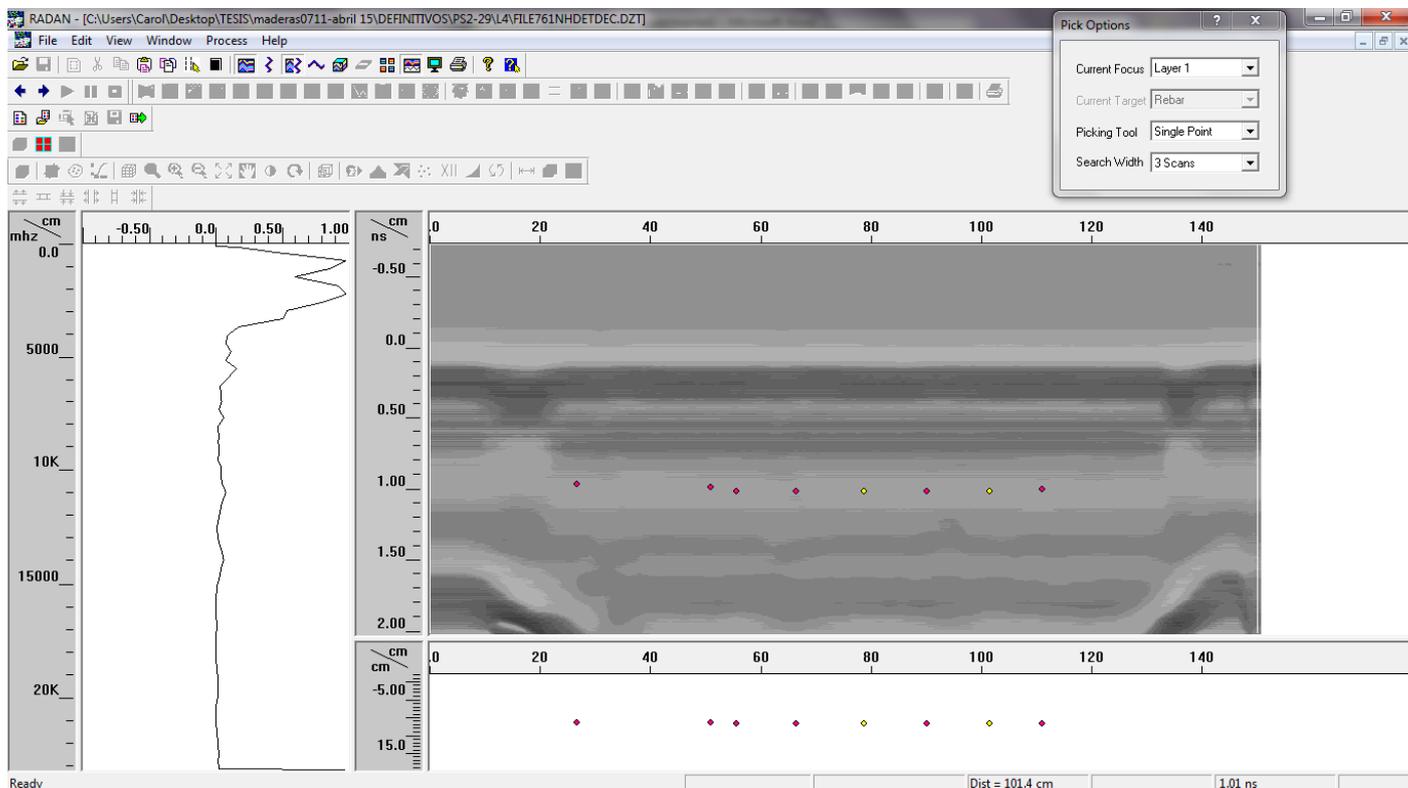
294 TT

De $x=70$ cm a $x=90$ cm detecta una zona continua de irregularidades ocultas:



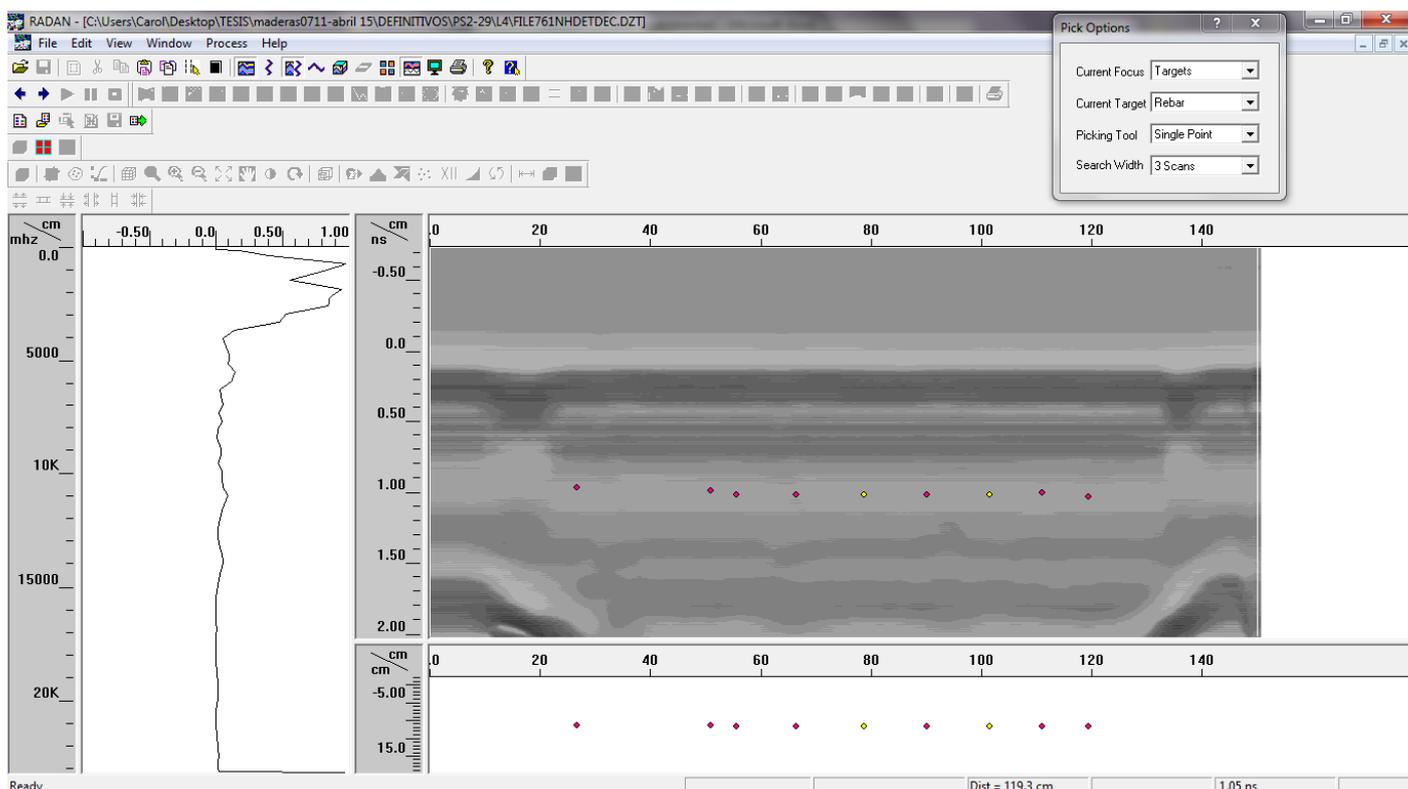
A1 • Datos en bruto del plan experimental + Análisis del espectro y del radargrama

De $x=100$ cm a $x=110$ cm detecta una zona continua de defectos ocultos, posible identificación de todos los nudos de la zona:

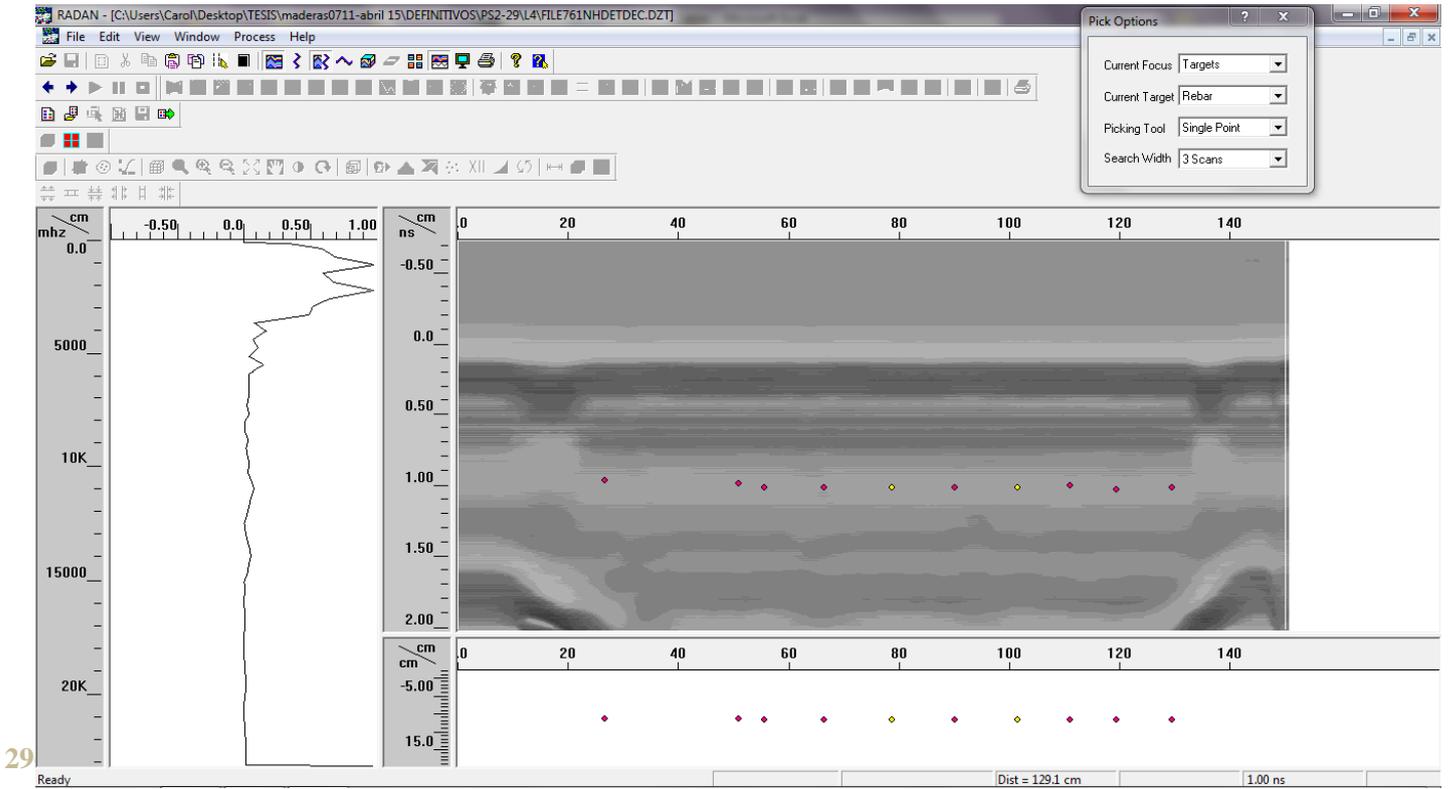


295+

En $x=120$ cm detecta los nudos 8 y 9 de tracción, y 9 y 10 de compresión:



En x=130 cm detecta el nudo 10 de tracción, el nudo 5 del canto 1, el 11 de compresión y el 4 del canto 2:



PS2-32



Cara tracción



Canto 1



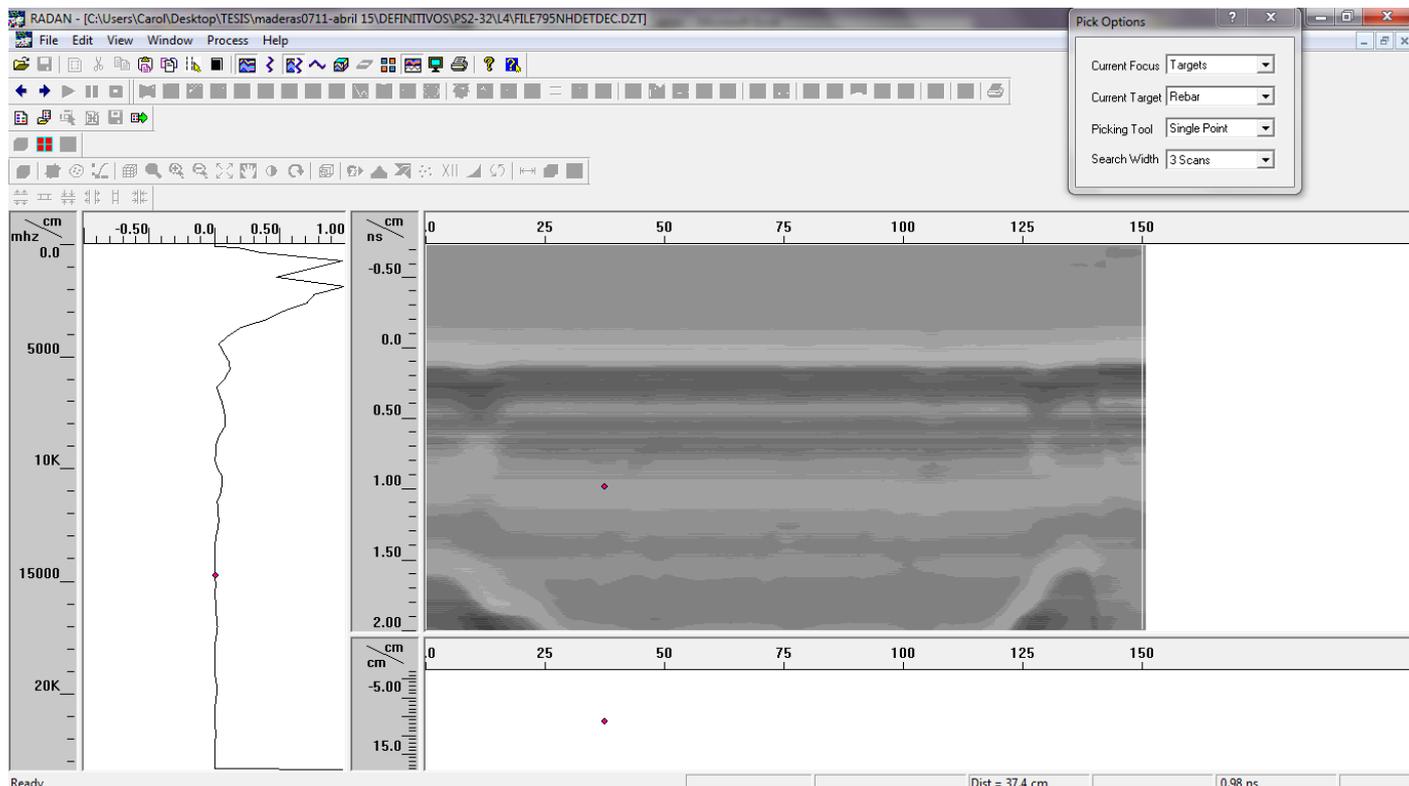
Cara compresión



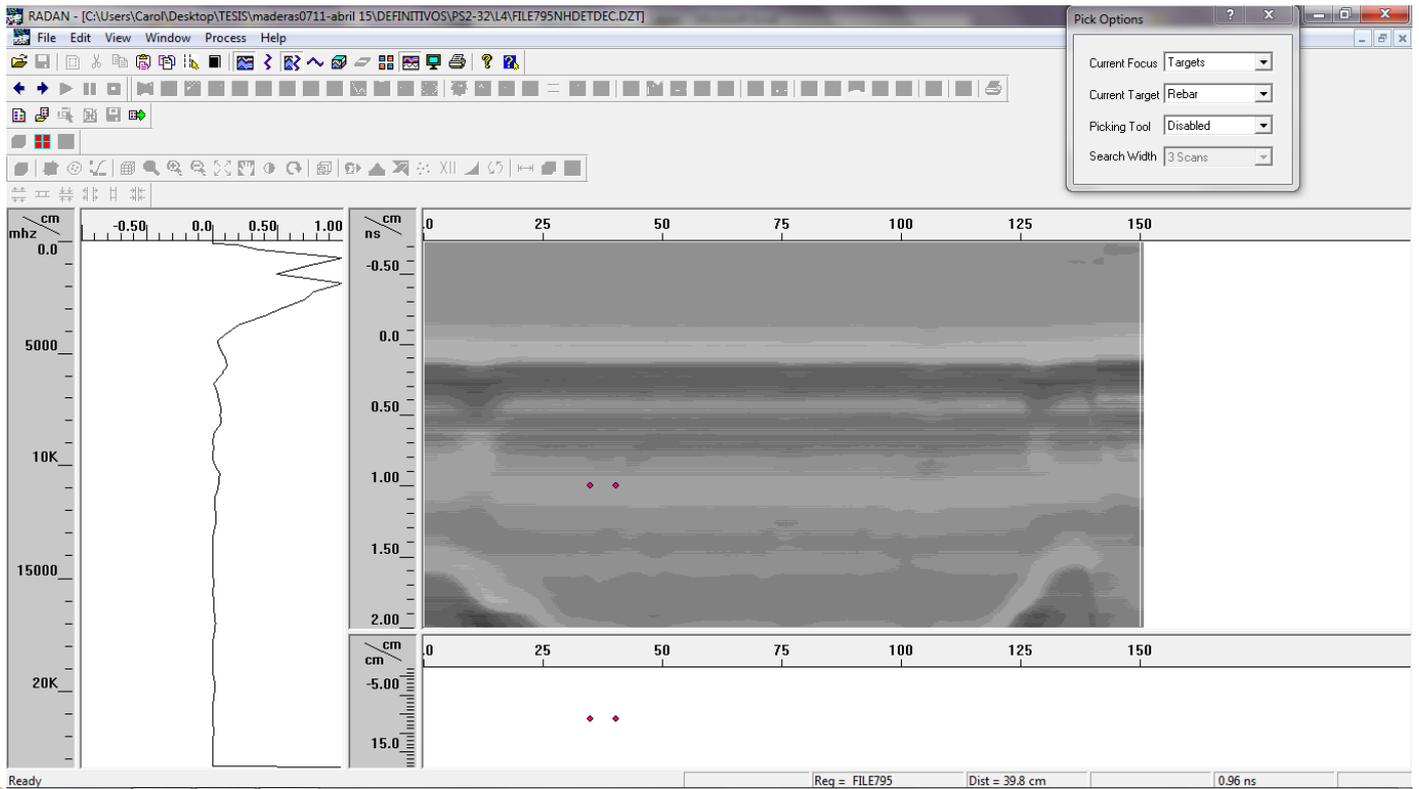
Canto 2

297 +

En $x=37,4$ cm detecta el nudo 1 de tracción y el 1 del canto 1:

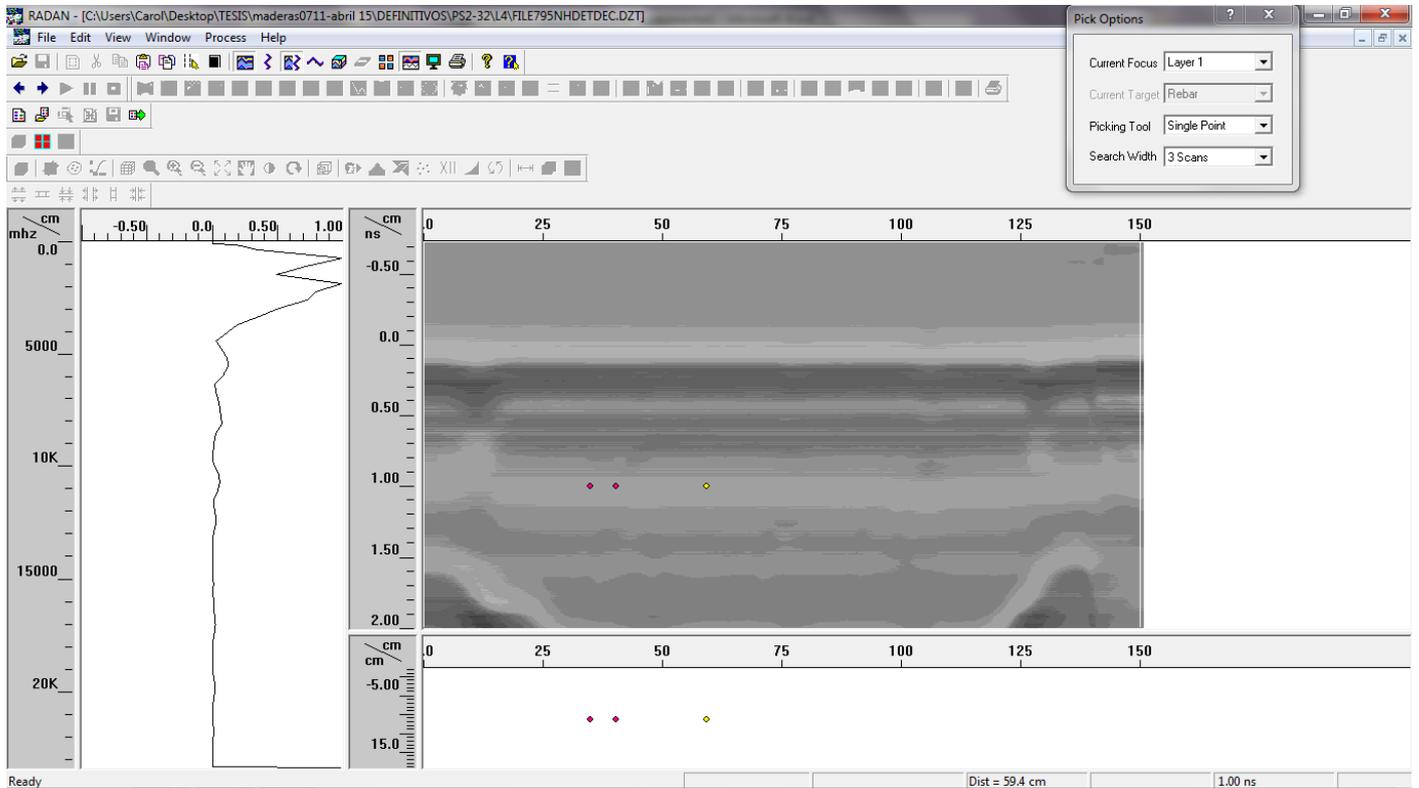


En x=39 cm detecta el nudo 2 de tracción:

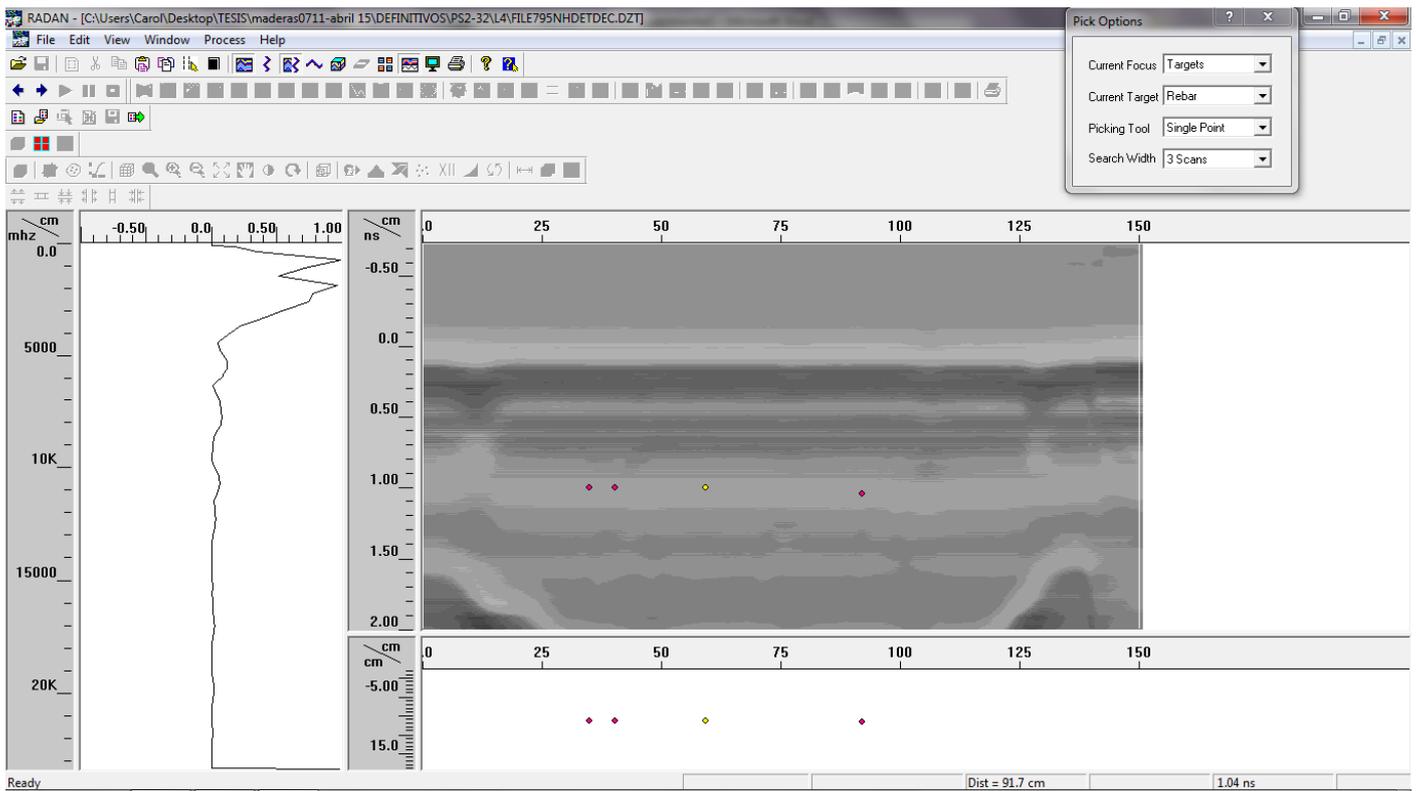


298 TT

En x=60 cm hay una zona de defectos ocultos:

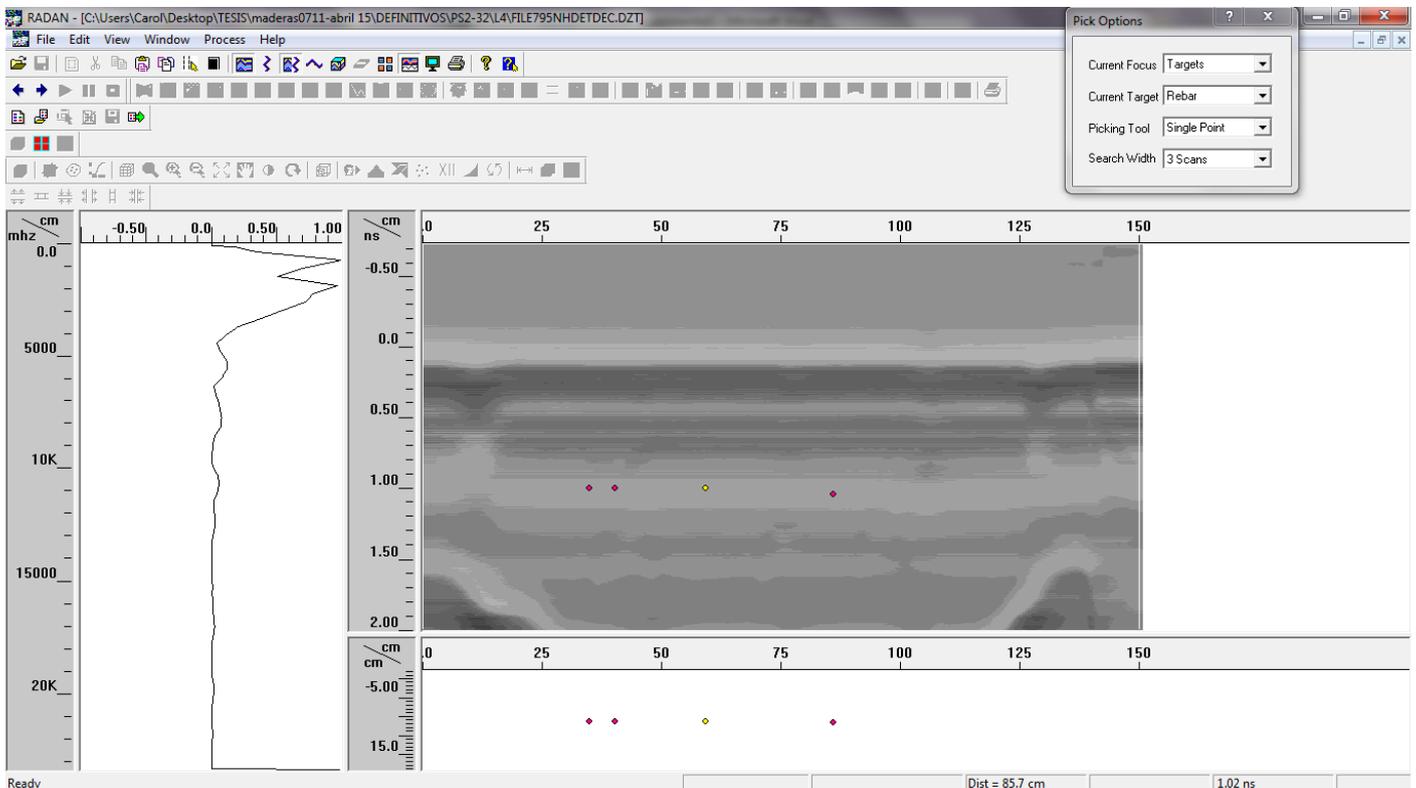


En $x=91$ cm detecta un defecto oculto importante:

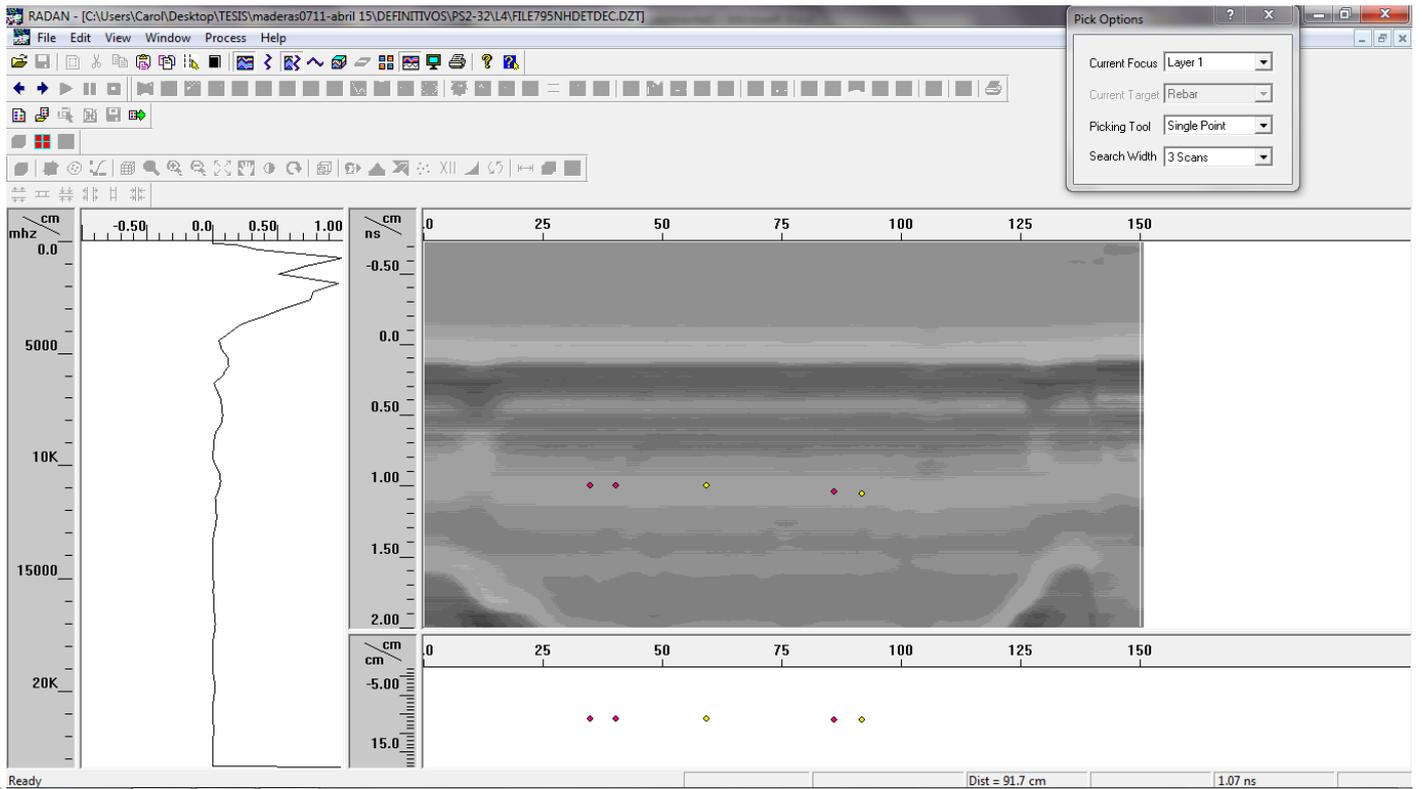


299+

En $x=85$ cm detecta el nudo 3 de tracción, el 2 del canto 1 y el 1 del canto 2:

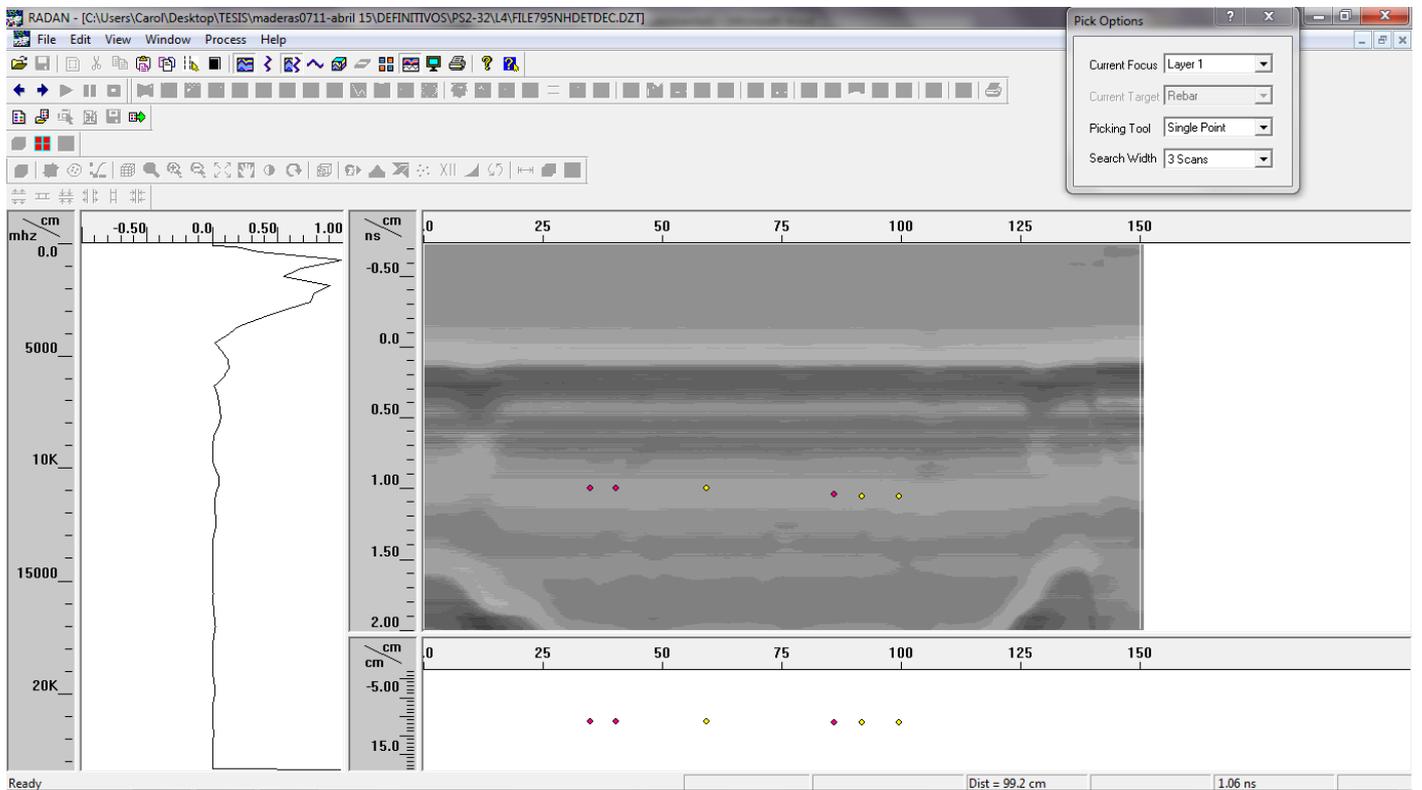


En $x=91$ cm detecta un defecto oculto:

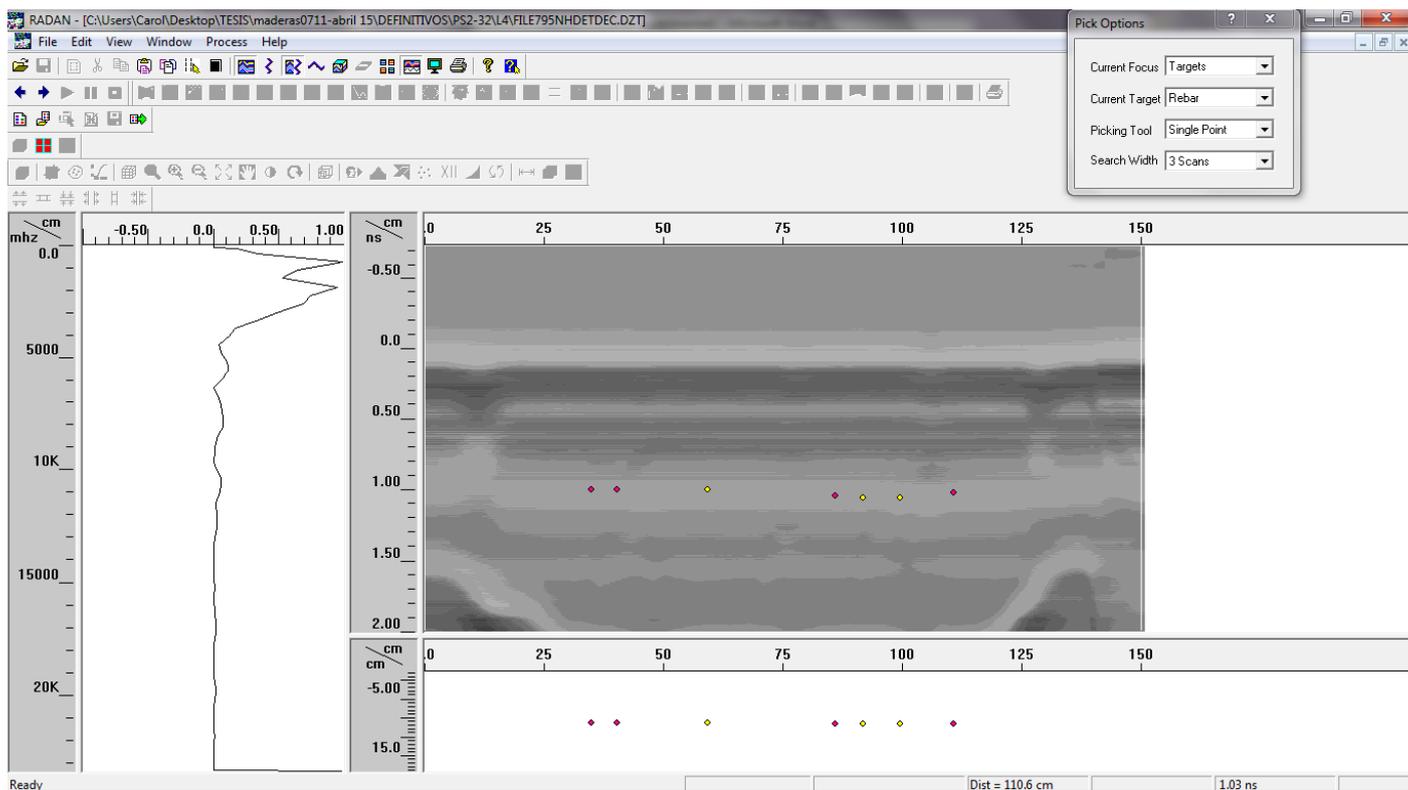


300 TT

En $x=100$ cm detecta un defecto oculto:

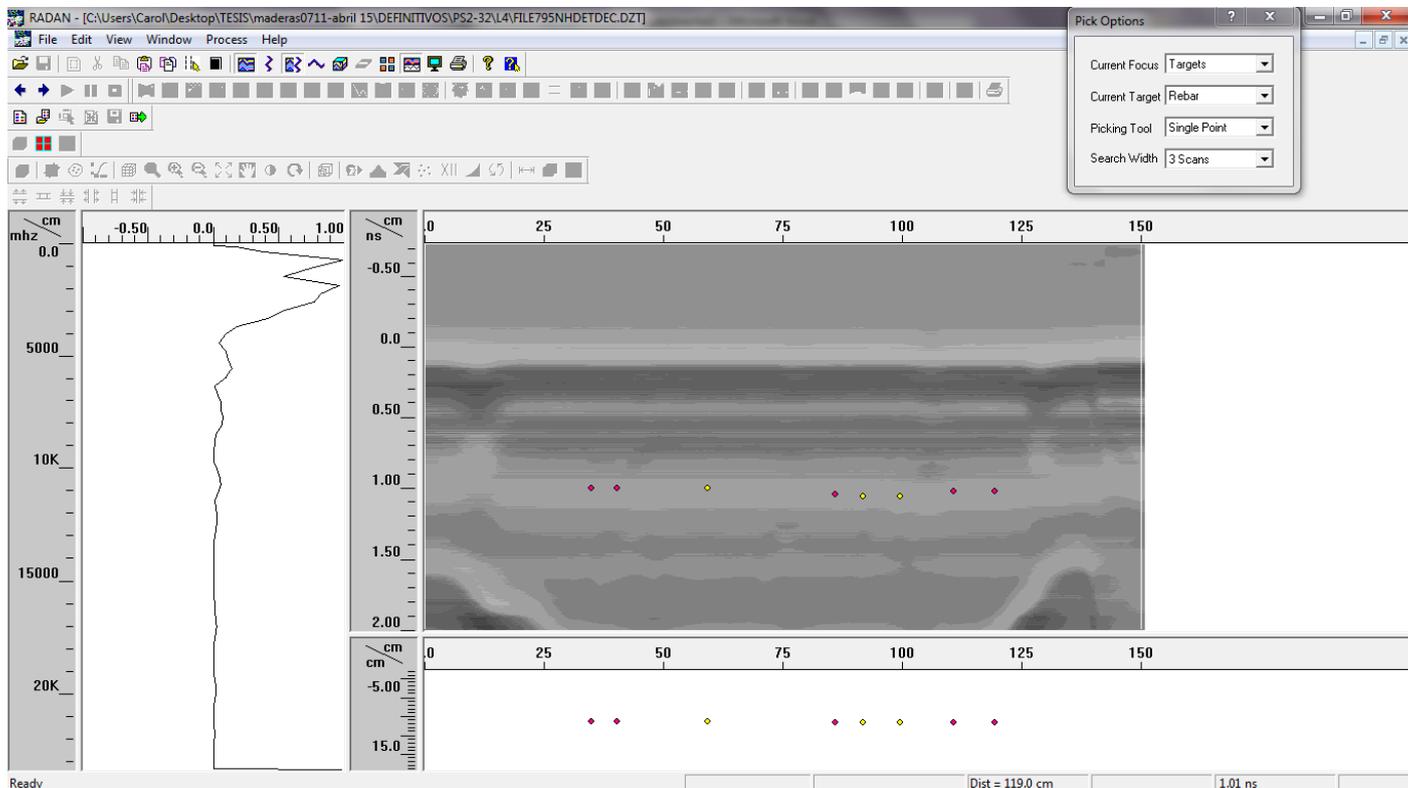


En x=110 cm detecta el nudo 4 de tracción:



301+

En x=117 cm detecta el nudo 3 del canto 1 y el 2 del canto 2:



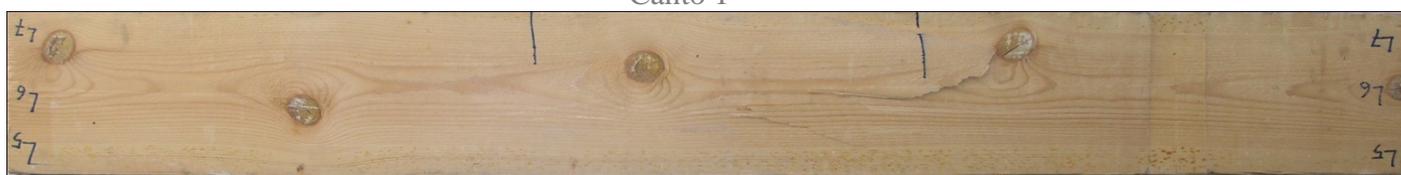
PS2-36



Cara tracción



Canto 1



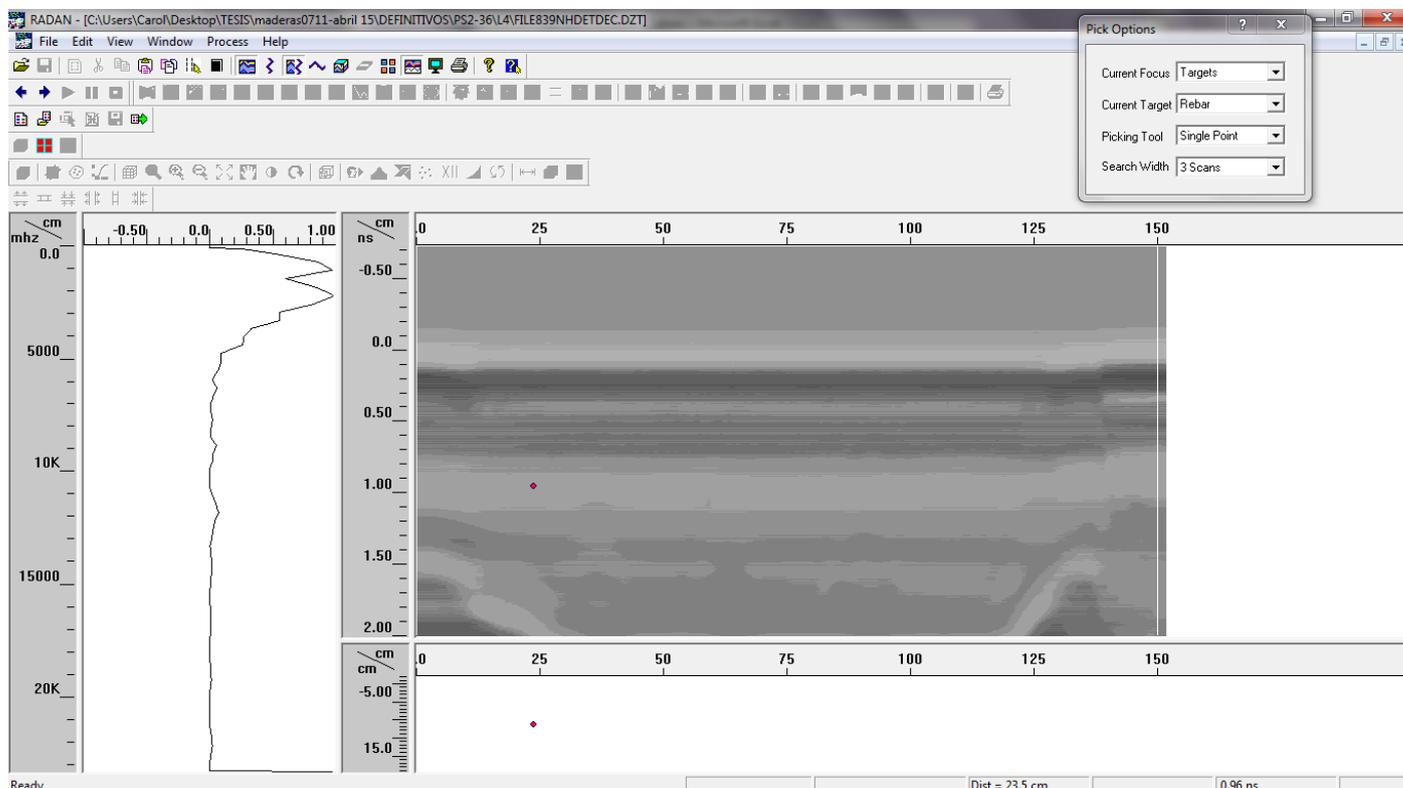
Cara compresión



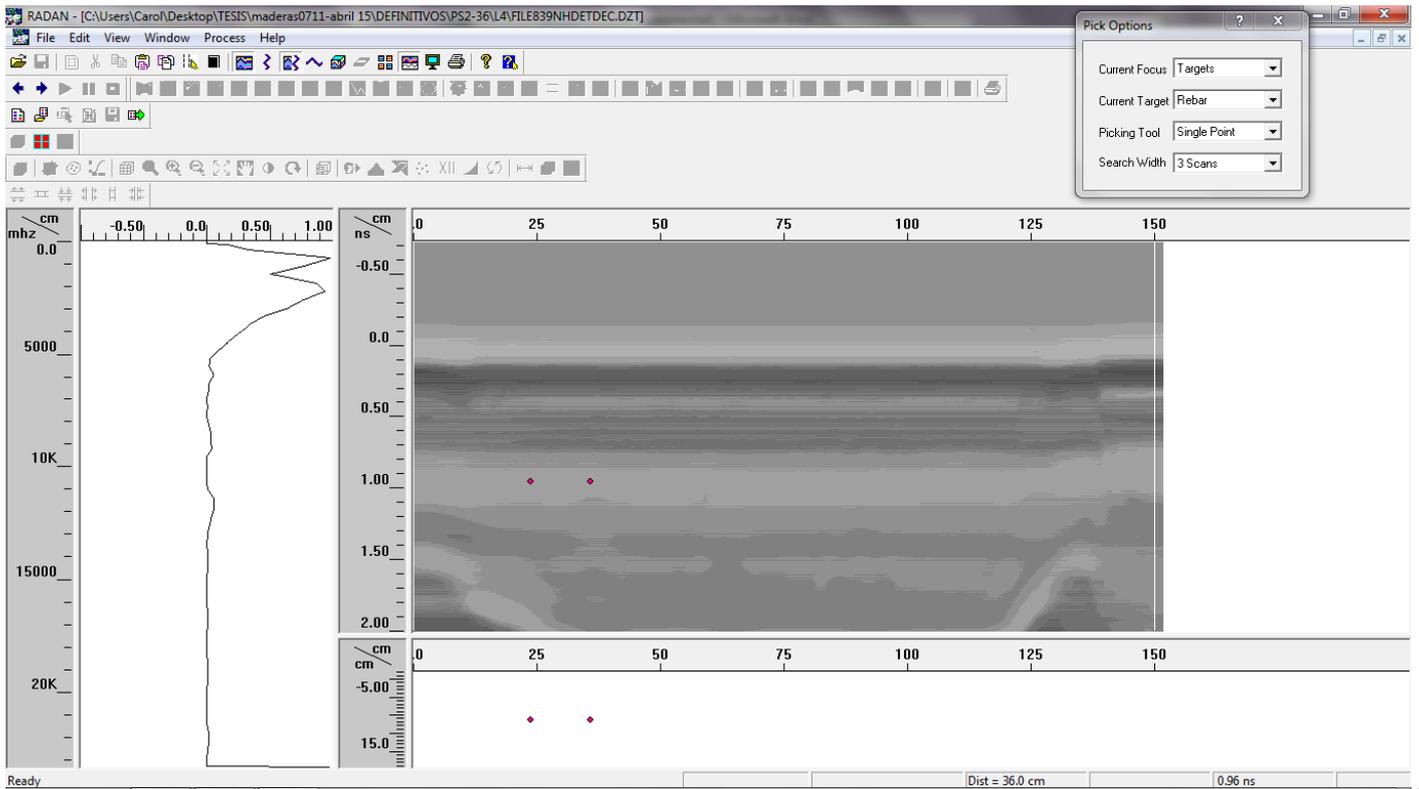
Canto 2

302 †

En $x=22$ cm detecta el nudo 2 de tracción, el 1 del canto 1, y el 1 y 2 de compresión:

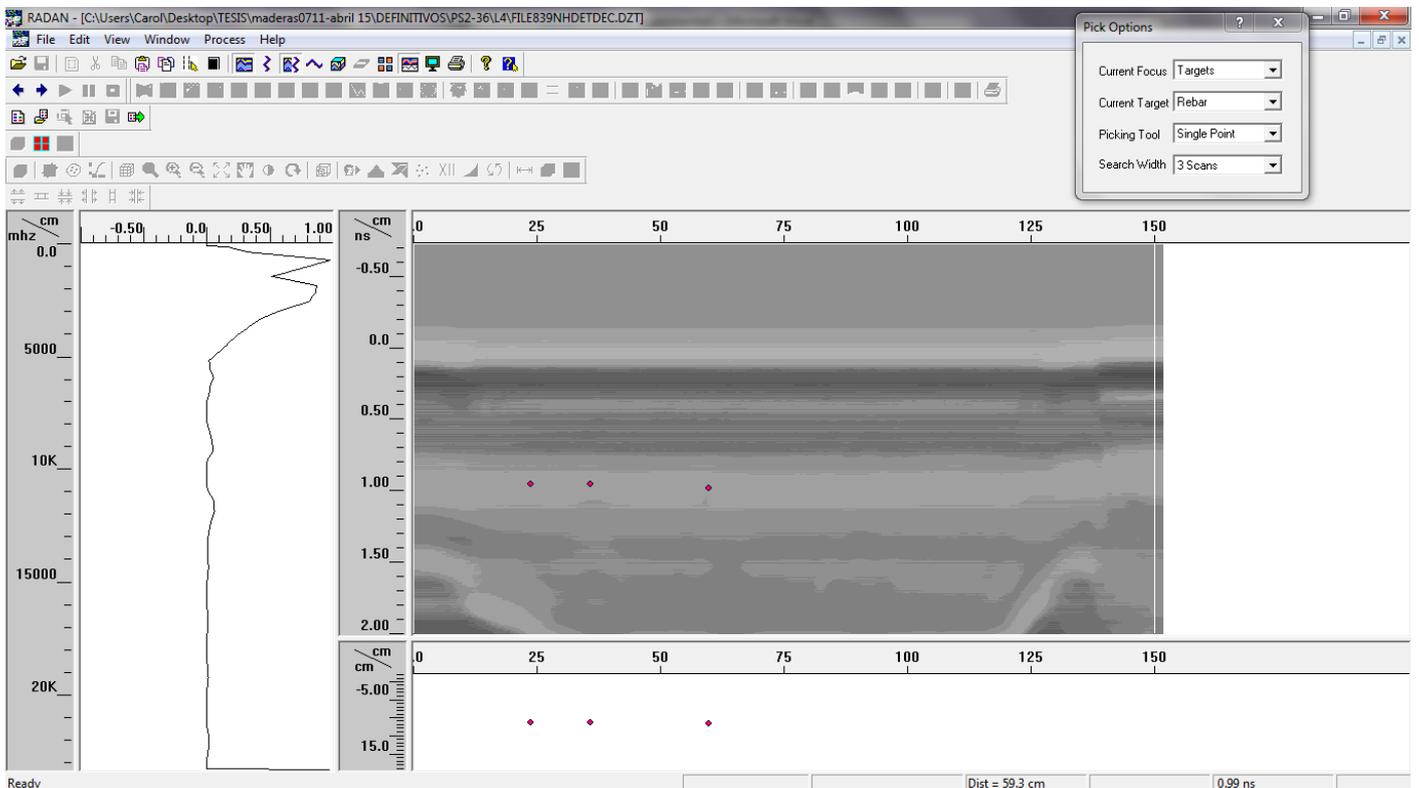


En $x=35$ cm detecta el nudo 2 de tracción, el 1 del canto 1, y el 1 y 2 de compresión:

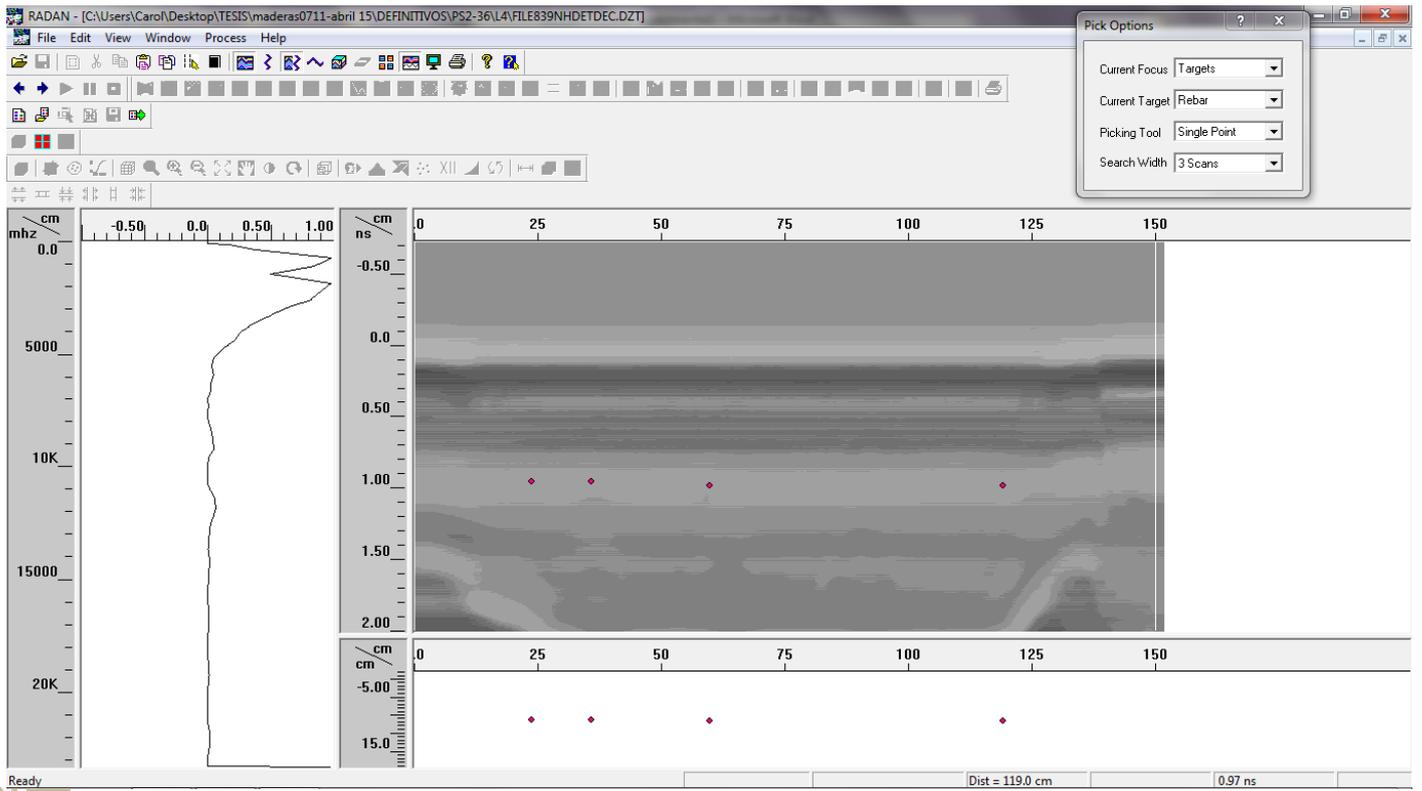


303

En $x=60$ cm detecta el nudo 3 de tracción, y el 2 y el 3 del canto 2:



En $x=119$ cm identifica el nudo 4 de tracción:



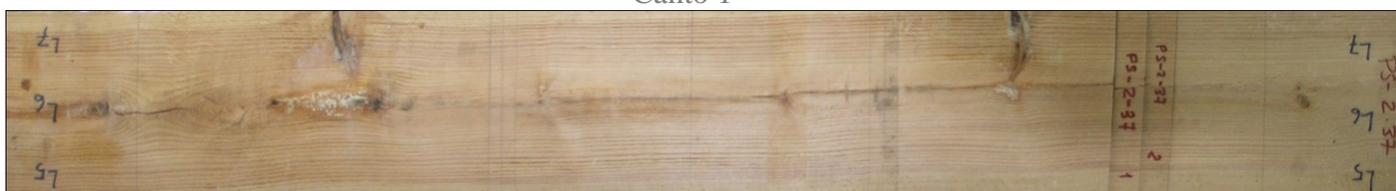
PS2-37



Cara tracción



Canto 1



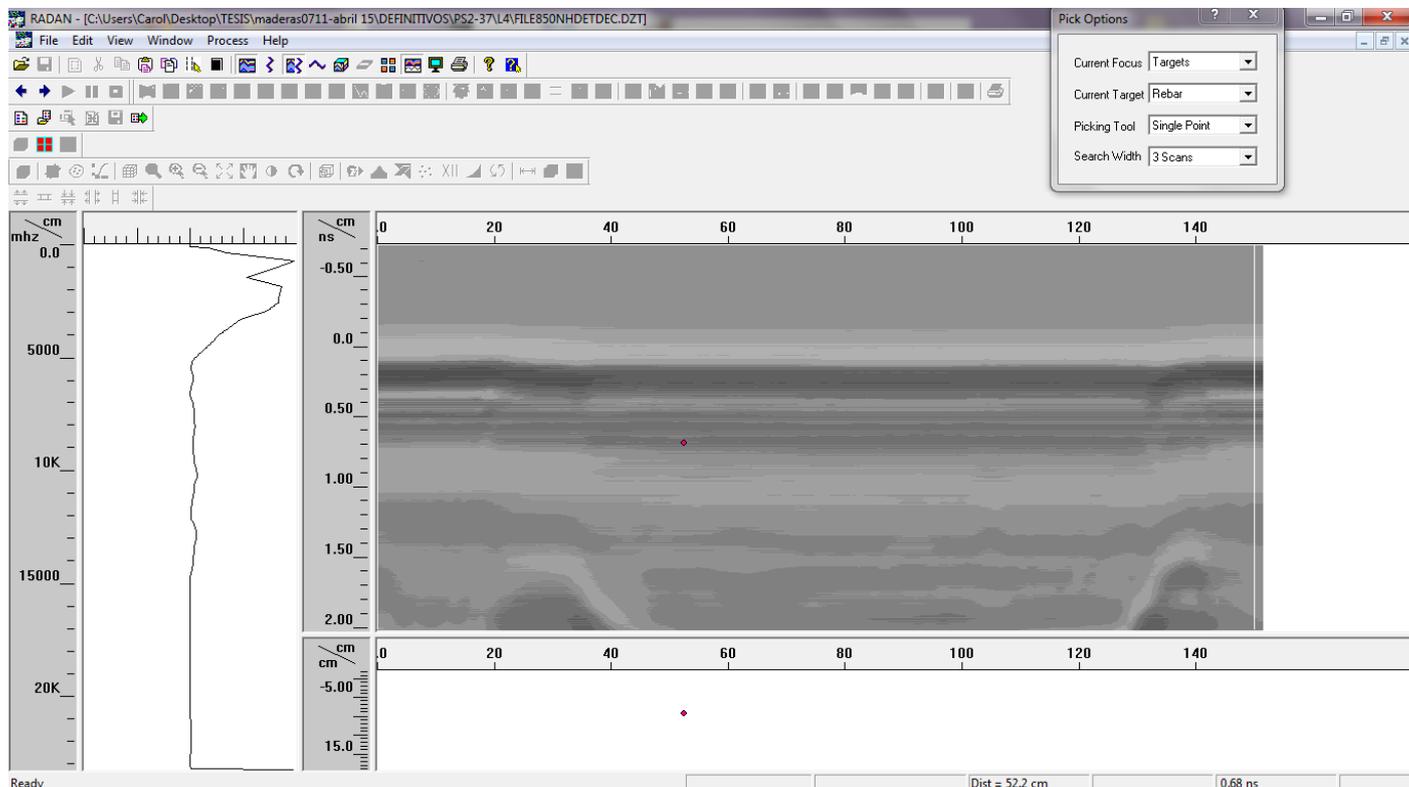
Cara compresión



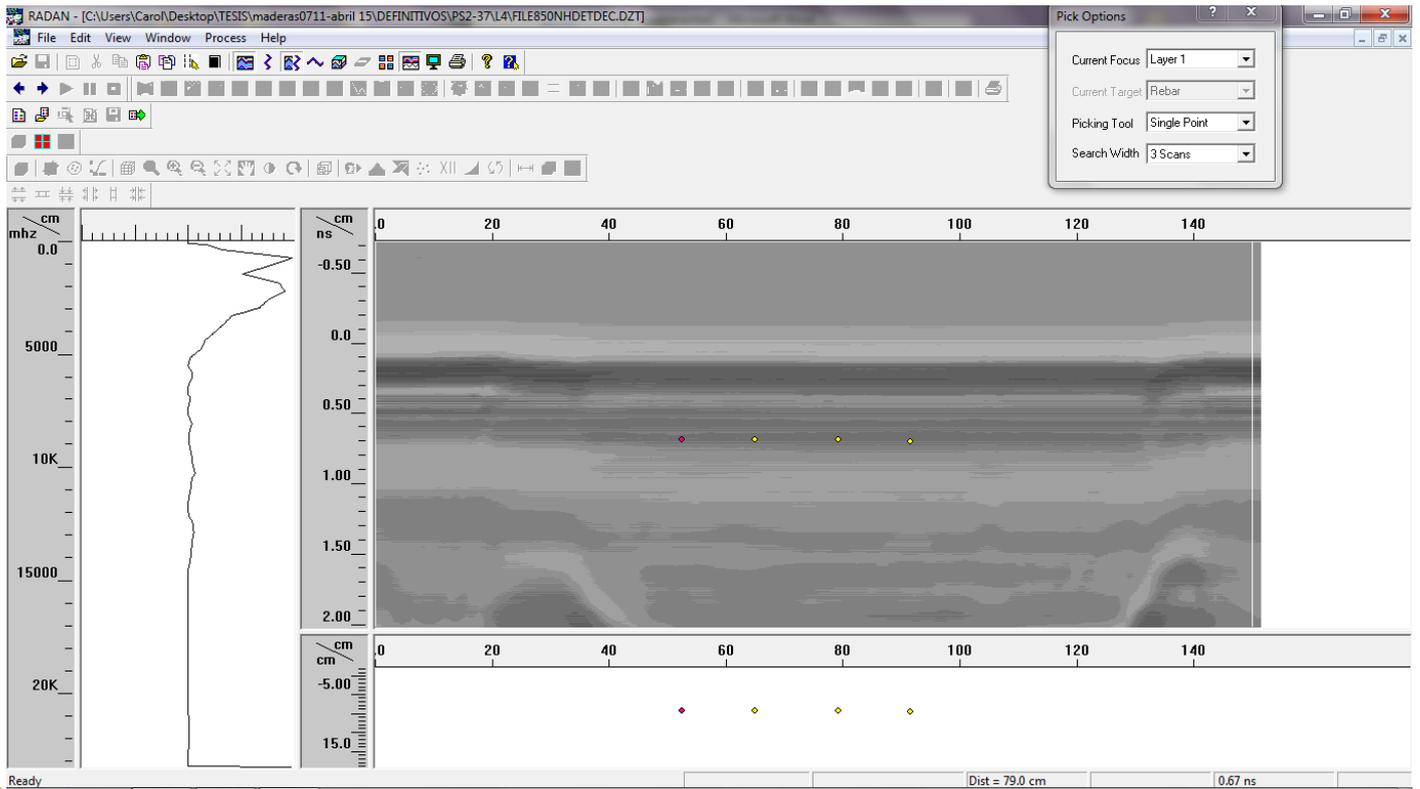
Canto 2

305+

En x=52 cm detecta el nudo 2 del canto 2:

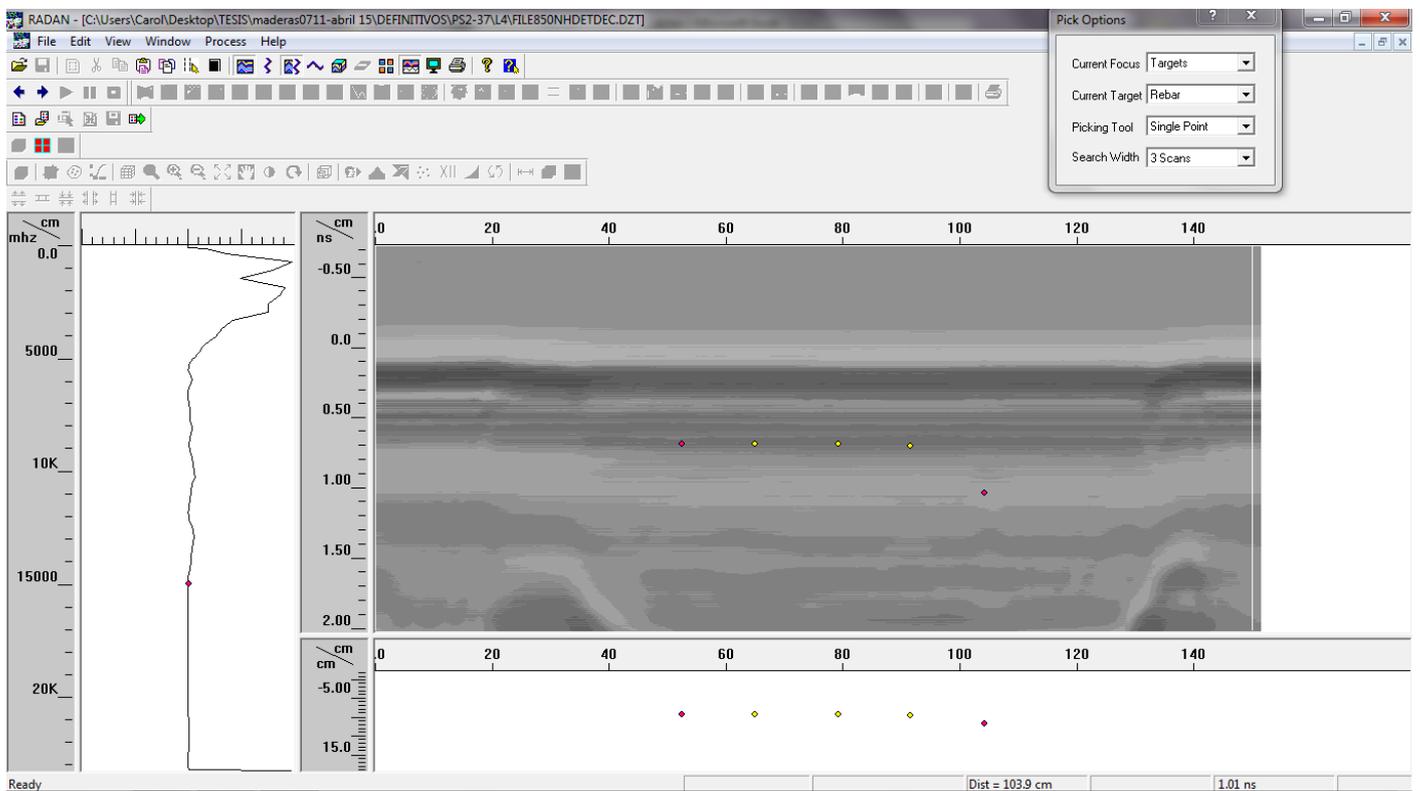


Desde $x=64$ cm hasta $x=90$ cm detecta una zona de defectos ocultos:

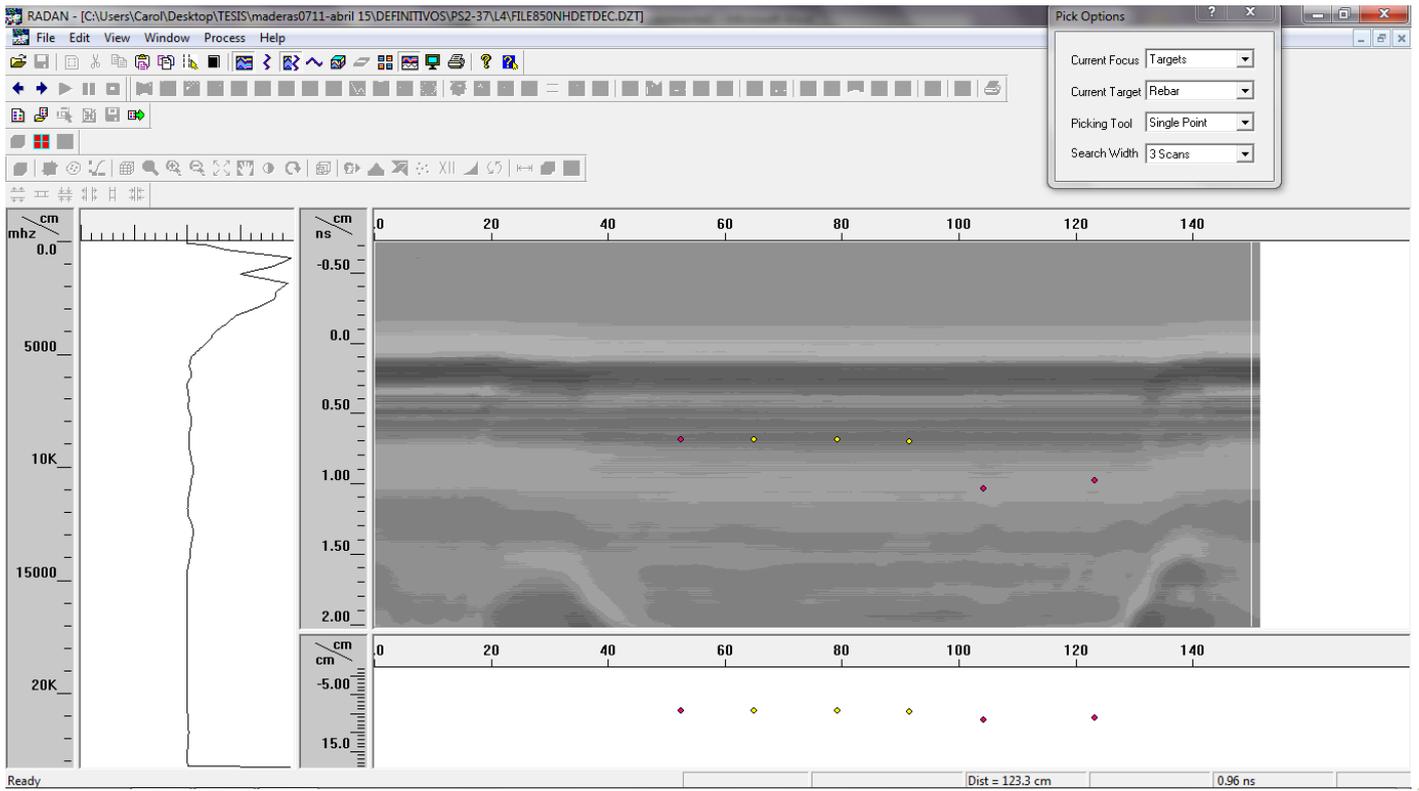


306 TT

En $x=103$ cm detecta los nudos del 1 al 5 de tracción, el nudo 2 del canto 1, el nudo 2 de compresión, y el nudo 3 del canto 2:



En $x=123$ cm detecta un defecto oculto:



PS2-38



Cara tracción



Canto 1



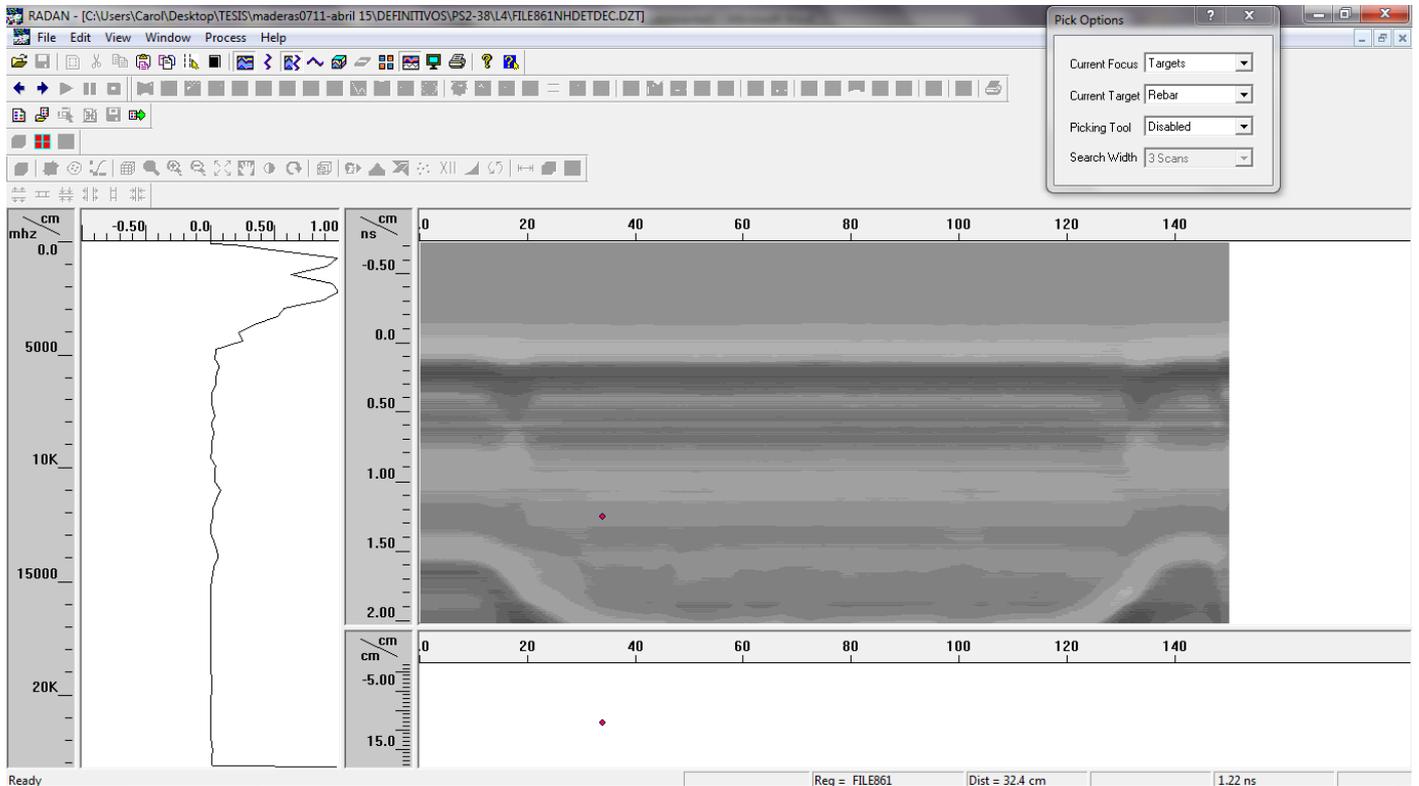
Cara compresión



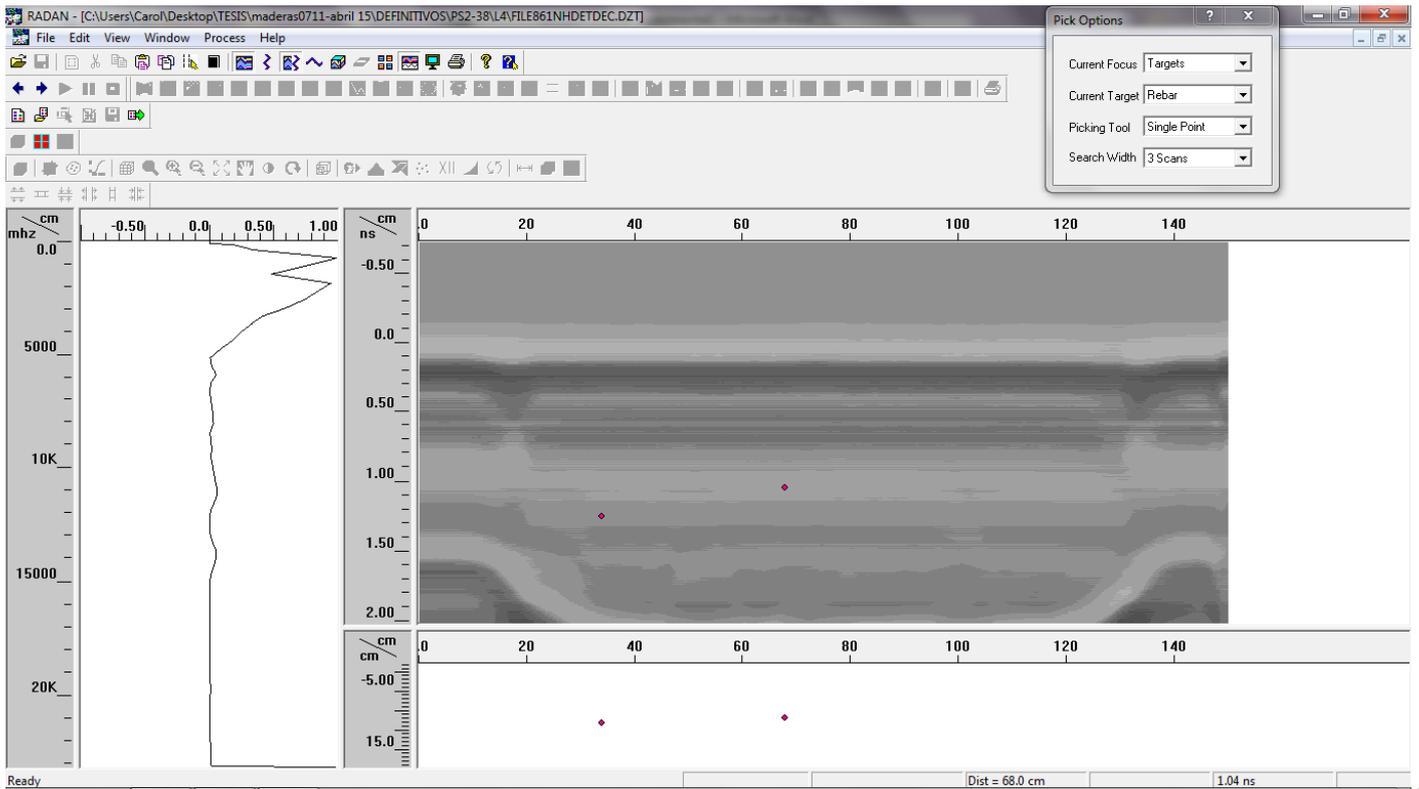
Canto 2

308 †

En $x=32,2$ cm detecta el nudo 2 y 3 de tracción, el 1 de compresión y el 2 del canto 2:

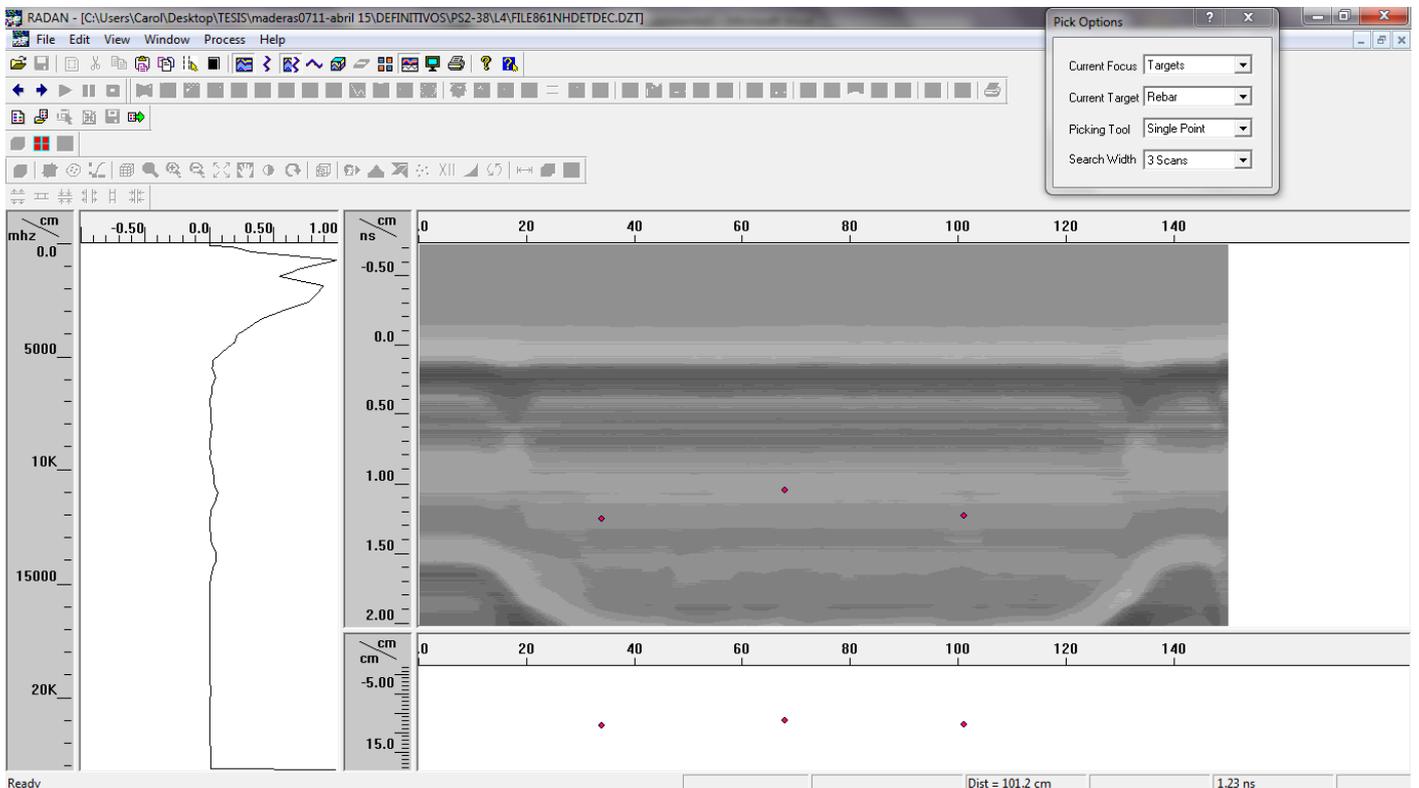


En $x=70$ cm detecta el nudo 4 de tracción, el 2 y el 3 de compresión, y el 3 del canto 2:



309+

En $x=100$ cm detecta el nudo 5 de tracción, el 4 de compresión y el 4 del canto 2:



En x=120 cm detecta un defecto oculto:

